

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
À L'OBTENTION DE LA  
MAÎTRISE EN GÉNIE MÉCANIQUE  
M.Ing.

PAR  
JULES JOBIN

LA MESURE DE LA VITESSE DU VENT DANS UN ÉCOULEMENT  
ATMOSPHERIQUE TURBULENT AYANT DE FORTES VARIATIONS SAISONNIÈRES  
DE TEMPÉRATURE

MONTREAL, LE 15 OCTOBRE 2008

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Christian Masson, Directeur de mémoire  
Département de Génie Mécanique, École de technologie supérieure

M. Jean Lemay, Codirecteur  
Département de Génie Mécanique, Université Laval

M. Louis Lamarche, Président du jury  
Département de Génie Mécanique, École de technologie supérieure

M. Jean Ruel, Examineur externe  
Département de Génie Mécanique, Université Laval

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 3 OCTOBRE 2008

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

## REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de mémoire, le Professeur Christian Masson, ainsi que mon codirecteur, le Professeur Jean Lemay, pour m'avoir proposé ce projet et prodigué de judicieux conseils tout au long de mon cheminement. Je désire également souligner la contribution de la compagnie GPCo. Les appareils et les données fournis ainsi que leur apport financier au projet ont grandement contribué à sa réalisation.

Aussi, je désire exprimer ma reconnaissance envers mes collègues et amis, Nicolas, Monelle, Daniel, Sherif, Benoît, Jonathon, Khaled (...et tout ceux que j'aurais pu oublier) pour leur aide et leurs encouragements au cours de mon séjour à l'ÉTS. En ce qui concerne l'aspect expérimental du projet, je tiens à exprimer mes remerciements au personnel de l'atelier du Département de génie mécanique de l'Université Laval ainsi qu'à Jean Ruel et Richard Fraser pour leur assistance et leur support grandement appréciés lors de la période de tests en soufflerie.

Pour terminer, je voudrais remercier mon épouse, Marie, ma famille et mes amis pour m'avoir apporté support, motivation et conseils à tout moment du projet. Un merci particulier va à mon père pour m'avoir encouragé à me lancer dans un domaine aussi passionnant et motivant qu'est l'ingénierie.

## LA MESURE DE LA VITESSE DU VENT DANS UN ÉCOULEMENT ATMOSPHÉRIQUE TURBULENT AYANT DE FORTES VARIATIONS SAISONNIÈRES DE TEMPÉRATURE

Jules Jobin

### RÉSUMÉ

Si on le compare aux différentes sources d'énergie couramment utilisées, l'éolien reste un secteur encore relativement jeune. Par contre, en observant l'évolution de la puissance éolienne mondiale depuis quelques années, on note, depuis 1994, une croissance annuelle de près de 30%. Au moment d'écrire ces lignes, celle-ci se chiffre à environ 115 GW. Cette hausse s'explique en partie par le fait que la production d'énergie par le vent devient une alternative de plus en plus concurrentielle. La nécessité de réduire nos émissions de gaz à effet de serre aidant, la production d'énergie par des sources renouvelables est de plus en plus envisagée.

Comme tout système de production d'énergie, si on désire l'utiliser efficacement, il est essentiel de bien en connaître la source. Il faut donc, avant l'installation d'une éolienne, effectuer une quantification de la ressource présente sur le site envisagé. Celle-ci passe, entre autre, par la mesure de vent. Il est à noter que, comme pour toute autre mesure, cette dernière est entourée d'une certaine incertitude. Une part de cette instabilité est rattachée à la transposition de l'étalonnage de l'appareil de mesure des conditions de laboratoire aux conditions atmosphériques réelles. La présente étude se consacre à cette problématique en tentant de vérifier l'influence de la température, du choix des instruments et de la composante verticale de vitesse sur la mesure de vent à l'aide d'anémomètres à coupoles et à hélice.

Pour ce faire, différents anémomètres et enregistreurs de données utilisés par l'industrie sont à l'étude. Les enregistreurs utilisés sont : le Go-logger de Omega, le Symphonie de NRG et le Nomad2 de Second Wind. Les anémomètres testés sont : le NRG#40, le NRG IceFreeIII, le Riso P2546A, le RMY-5103 et le RMY-5305. Avant le début du projet, ces instruments ont été installés sur une tour de mesure de 20 mètres. Les données recueillies lors de cette partie du projet ont permis de déterminer les caractéristiques du système de mesure et leurs effets sur la collecte de données. La seconde partie du projet consiste en une analyse en soufflerie de la dépendance en température de la mesure effectuée par les divers instruments. Également, diverses configurations de connections ont été testées.

Les résultats découlant de la mesure extérieure n'ont permis aucune conclusion quant à une influence notable de la température. Ceci s'explique par le fait que la plage de températures observée ne fut pas assez étendue. Pour ce qui est de l'influence de la vitesse verticale, il est reconnu que certains anémomètres y sont très sensible. Toutefois, les faibles vitesses verticales observées n'ont permises aucune conclusion quant à une influence notable. Il a tout de même été noté que la comparaison de données temporelles correspondantes entre deux enregistreurs peut présenter des résultats très divergents.



Pour ce qui est des tests en soufflerie, la plage de température parcourue, de  $-5^{\circ}\text{C}$  à  $25^{\circ}\text{C}$ , n'a pas permis de constater une influence marquée de la variation de température. Les tests d'interconnexion des appareils ont toutefois démontrés des problèmes de traitement avec l'enregistreur de données Omega Go-logger. La mesure des signaux des anémomètres R.M. Young s'est avérée erronée car, pour une portion de la plage de vitesse adoptée, leur fréquence dépasse la limite de lecture de l'enregistreur. Des problèmes d'instabilité de la lecture de l'anémomètre NRG IcefreeIII ont également été observés pour les vitesses de 6 à 10m/s.

## **WIND SPEED MEASUREMENT IN AN ATMOSPHERIC TURBULENT FLOW WITH STRONG SEASONAL TEMPERATURE VARIATION**

Jules Jobin

### **ABSTRACT**

Compared to common energy sources, wind energy is still a relatively young alternative. However, by looking at the evolution of the worldwide installed power since 10 years, we can observe an average annual growth of nearly 30%. From 1997 to 2008, the installed capacity went from 7.5 GW to nearly 115 GW. This increase can be partially explained by the fact that wind energy is now an option that is more and more competitive toward other conventional sources. The necessity to reduce our greenhouse gas emission combined with the growing desire for sustainable development helping, renewable energies are more and more considered.

Like every other power generation system, if we want to use it efficiently, it is fundamental to have a good understanding of its source. Before the installation of wind turbines, an assessment of the available resources must be made, generally with the use of a meteorological tower. One thing that must be kept in mind is that there are different inaccuracies in measurements caused by the use of anemometers, calibrated in a wind tunnel, in real outdoor conditions. The main objective of this project is to verify the influence of the temperature, the instruments choice and the vertical component of the wind speed on cup and propeller anemometer reading.

To analyze those inaccuracies, different loggers and anemometers used by the industry are tested. The loggers studied are the Ohmega Go-logger, the NRG Symphonie and the Nomad2 by Second Wind. The anemometers considered are the NRG IceFreeIII, the NRG#40C, the Riso P2546A, the RMY-5103 and the RMY-5305. Prior to the beginning of the project, those instruments were installed on a 20-meters meteorological tower. In the first part of the project, the data collected by the different anemometers and loggers on the tower were analyzed to validate the characteristics of the measurement systems and their effects on data collection. The second part of the project consisted of temperature and instrument interconnection dependency tests in a temperature-controlled wind tunnel.

The results from outdoor measurement did not allowed any conclusion regarding temperature. As for the vertical speed influence, it is a known fact that some anemometers are heavily sensitive to this parameter. However, the small vertical speeds observed could not lead to any significant conclusion about a notable influence of this speed component. From the instruments tested, none of the variations observed could be explained in good part by the impact of the variation of those parameters. However, it has been noticed that data points taken at the same time by two different data loggers cannot be compared. Tests have shown non-negligible difference between those measurements.

As for the wind tunnel tests, the temperature range considered for the measurements, from  $-5^{\circ}\text{C}$  to  $25^{\circ}\text{C}$ , didn't allowed any conclusion on significant influence of temperature variation. However, the connection tests between the different instruments enabled the observation of data treatment problems on the Go-logger. The frequencies of the signals generated by the two R.M. Young anemometers were, on a part of the considered speed range, too high to be measured by the data logger. Also instability problems were observed, on speed from 6 to 10m/s, on the NRG IcefreeIII.

## TABLE DES MATIÈRES

	Page
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE . . . . .	6
1.1 Caractérisation du vent . . . . .	6
1.1.1 Caractéristiques de base . . . . .	6
1.1.2 Définitions de la vitesse de vent . . . . .	8
1.2 Théorie de caractérisation dynamique des anémomètres à rotor . . . . .	9
1.2.1 Anémomètres à coupoles . . . . .	10
1.2.2 Anémomètres à hélice . . . . .	16
1.3 Historique . . . . .	18
1.3.1 Anémomètres à coupoles . . . . .	19
1.3.2 Anémomètres à hélice . . . . .	22
1.4 Exigences en lien avec la procédure de calibration . . . . .	24
1.4.1 Exigences générales . . . . .	24
1.4.2 Exigences liées à la soufflerie . . . . .	24
1.4.3 Exigences liées à l'instrumentation et au montage . . . . .	26
1.5 Exigences en lien avec les anémomètres . . . . .	26
1.5.1 Procédures de tests de caractérisation d'anémomètres . . . . .	27
1.6 Exigences concernant la mesure extérieure . . . . .	31
1.6.1 Exigences en lien avec le choix du terrain . . . . .	31
1.6.2 Exigences en lien avec le mât de mesure . . . . .	35
1.6.3 Exigences liées à la base de données recueillie . . . . .	40
1.7 Classification des anémomètres . . . . .	41
1.7.1 Modélisation de l'anémomètre . . . . .	42
1.7.2 Classes de sites de mesure . . . . .	42
1.7.3 Index de classification . . . . .	46
1.8 Caractéristiques opérationnelles de divers anémomètres . . . . .	47
1.8.1 Anémomètres à coupoles . . . . .	48
1.8.2 Anémomètres à hélice . . . . .	56
CHAPITRE 2 THÉORIE . . . . .	59
2.1 Forme générale de l'équation de calibration . . . . .	59
2.1.1 Anémomètres à coupoles . . . . .	59
2.1.2 Anémomètres à hélice . . . . .	61
2.2 Procédure de calibration . . . . .	61
2.3 Détermination de l'équation de calibration . . . . .	63
2.4 Calcul de l'incertitude d'étalonnage . . . . .	64
2.4.1 Incertitude de type A . . . . .	65
2.4.2 Incertitude de type B . . . . .	66
2.5 Analyse de données temporelles de vent . . . . .	73

2.5.1	Classification des données	73
2.5.2	Analyse statistique des données temporelles	74
<b>CHAPITRE 3 PROCÉDURES D'EXPÉRIMENTATION ET D'ANALYSE</b>		<b>76</b>
3.1	Traitement des données temporelles	76
3.1.1	Présentation de l'installation	76
3.1.2	Comparaisons effectuées	77
3.1.3	Détermination de la distribution de vent	78
3.1.4	Analyse de l'influence de la température	81
3.1.5	Analyse de l'influence de la vitesse verticale	81
3.2	Tests et étalonnages en soufflerie	82
3.2.1	Tests de stabilité	84
3.2.2	Tests de calibration de la soufflerie	87
3.2.3	Étalonnages des anémomètres	89
3.2.4	Tests de sensibilité aux variations de températures	93
3.2.5	Tests d'impacts des connections avec les enregistreurs de données	95
<b>CHAPITRE 4 RÉSULTATS ET OBSERVATIONS</b>		<b>97</b>
4.1	Résultats de l'analyse des données temporelles	97
4.1.1	Distributions de vent obtenues	99
4.1.2	Influence de la température sur les données temporelles	107
4.1.3	Influence de la vitesse verticale sur les données temporelles	111
4.2	Résultats des tests effectués sur la soufflerie	116
4.2.1	Tests de stabilité	116
4.2.2	Tests de calibration	121
4.3	Résultats des tests sur les anémomètres	121
4.3.1	Résultats des tests de calibration	122
4.3.2	Résultats des tests sur l'influence de la température	130
4.4	Résultats des tests d'impact des enregistreurs de données	140
4.4.1	NRG Symphonie	141
4.4.2	Ohmega Go-Logger	143
4.4.3	SecondWind Nomad2	145
<b>CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS</b>		<b>148</b>
5.1	Retour sur la problématique	148
5.2	Compte rendu des conclusions	148
5.2.1	Conclusions sur les mesures extérieures	148
5.2.2	Conclusions sur les tests en soufflerie	150
5.3	Contributions	153
5.4	Recommandations	153
<b>ANNEXE I FIGURES ADDITIONNELLES</b>		<b>156</b>
I.1	Comparaisons en fonction de la température	156
I.1.1	Mesures avec les anémomètres redondants à 20m	156

I.1.2	Mesures avec les anémomètres redondants à 18m . . . . .	159
I.1.3	Mesures avec l'anémomètre NRG#40 à 20m . . . . .	162
I.1.4	Mesures avec l'anémomètre NRG#40 à 18m . . . . .	169
I.2	Comparaisons en fonction de la vitesse verticale . . . . .	176
I.2.1	Mesures avec les anémomètres redondants à 20m . . . . .	176
I.2.2	Mesures avec les anémomètres redondants à 18m . . . . .	179
I.2.3	Mesures avec l'anémomètre NRG#40 à 20m . . . . .	182
I.2.4	Mesures avec l'anémomètre NRG#40 à 18m . . . . .	189
I.3	Équations de calibration des anémomètres . . . . .	196
I.3.1	Risø P2546a . . . . .	197
I.3.2	NRG#40 . . . . .	198
I.3.3	NRG IcefreeIII . . . . .	199
I.3.4	RMY-5103 . . . . .	201
I.3.5	RMY-5305 . . . . .	202

## LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableau 1.1	Exigences topographiques d'un site de mesure de courbe de puissance d'une éolienne .....	32
Tableau 1.2	Méthodes d'estimation du coefficient $C_T$ .....	39
Tableau 1.3	Critères de rejet de données de vent .....	40
Tableau 1.4	Conditions d'opération des classes A et B .....	43
Tableau 1.5	$\sigma_i$ et $L_i$ pour les trois composantes du spectre de Kaimal .....	45
Tableau 1.6	Constantes de l'anémomètre Risø P2546a .....	50
Tableau 1.7	Constantes de l'anémomètre NRG#40 .....	53
Tableau 3.1	Configurations de branchement pour les tests d'influence des enregistreurs de données .....	95
Tableau 4.1	Plages temporelles utilisées pour les comparaisons .....	97
Tableau 4.2	Comparaison des informations statistiques sur les données recueillies à l'aide de l'enregistreur NRG Symphonie .....	99
Tableau 4.3	Comparaisons des distributions de Weibull obtenues sur l'enregistreur Symphonie .....	100
Tableau 4.4	Comparaison des informations statistiques sur les données recueillies à l'aide des trois enregistreurs .....	103
Tableau 4.5	Comparaisons des distributions de Weibull obtenues sur les trois enregistreurs .....	104
Tableau 4.6	Régressions linéaires résultant des comparaisons de mesures entre les anémomètres redondant en fonction de la température .....	108
Tableau 4.7	Comparaison de mesures entre les enregistreurs de données en fonction de la température .....	111
Tableau 4.8	Comparaison de mesures entre les anémomètres redondant en fonction de la vitesse verticale .....	113



Tableau 4.9	Comparaison de mesures entre les enregistreurs de données en fonction de la vitesse verticale . . . . .	115
Tableau 4.10	Résultats des tests de stabilité de température . . . . .	119
Tableau 4.11	Résultats des tests de stabilité de vitesse . . . . .	120
Tableau 4.12	Conditions des tests de calibration de la mesure de référence . . . . .	121
Tableau 4.13	Incertitude de calibration de l'anémomètre Risø P2546a . . . . .	123
Tableau 4.14	Incertitude de calibration de l'anémomètre NRG#40 . . . . .	125
Tableau 4.15	Incertitude de calibration de l'anémomètre NRG IcefreeIII (chauffé) . . .	127
Tableau 4.16	Incertitude de calibration de l'anémomètre NRG IcefreeIII (non-chauffé) . . . . .	127
Tableau 4.17	Incertitude de calibration de l'anémomètre RMY-5103 . . . . .	129
Tableau 4.18	Incertitude de calibration de l'anémomètre RMY-5305 . . . . .	130
Tableau 4.19	Influence de la température sur la mesure de l'anémomètre Risø P2546a . . . . .	131
Tableau 4.20	Influence de la température sur la mesure de l'anémomètre NRG#40 . . .	133
Tableau 4.21	Influence de la température sur l'anémomètre NRG IcefreeIII (chauffé) . . . . .	135
Tableau 4.22	Influence de la température sur l'anémomètre NRG IcefreeIII (non-chauffé) . . . . .	135
Tableau 4.23	Influence de la température sur la mesure de l'anémomètre RMY-5103 .	138
Tableau 4.24	Influence de la température sur la mesure de l'anémomètre RMY-5305 .	139
Tableau 4.25	Incertitudes des étalonnages des anémomètres à 4m/s et 12m/s . . . . .	141
Tableau 4.26	Influence de l'enregistreur NRG sur la mesure des anémomètres (branchement solo) . . . . .	142
Tableau 4.27	Influence de l'enregistreur NRG sur la mesure des anémomètres (branchement parallèle) . . . . .	142

Tableau 4.28	Influence de l'enregistreur Ohmega sur la mesure des anémomètres (branchement solo) . . . . .	143
Tableau 4.29	Influence de l'enregistreur Ohmega sur la mesure des anémomètres (branchement parallèle) . . . . .	144
Tableau 4.30	Influence de l'enregistreur SecondWind sur la mesure des anémomètres (branchement solo) . . . . .	145
Tableau 4.31	Influence de l'enregistreur SecondWind sur la mesure des anémomètres (branchement parallèle) . . . . .	146

## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Exemple de réponse angulaire plane . . . . .	12
Figure 1.2 Exemple de réponse angulaire de forme cosinusoidale . . . . .	13
Figure 1.3 Anémomètre-girouette de Léonardo Da Vinci . . . . .	19
Figure 1.4 Anémomètre de Robinson . . . . .	20
Figure 1.5 Prototype d'anémomètre à hélice de John Davis . . . . .	22
Figure 1.6 Anémomètre K-Gill de R.M. Young . . . . .	23
Figure 1.7 Recommandation concernant la réponse angulaire . . . . .	28
Figure 1.8 Mesure du couple dynamique à 8 m/s . . . . .	29
Figure 1.9 Exemple de choix de secteur de mesure . . . . .	34
Figure 1.10 Taille de secteur à éliminer pour la présence d'éolienne . . . . .	35
Figure 1.11 Vitesse relative à proximité d'une tour tubulaire . . . . .	37
Figure 1.12 Vitesse relative en fct de la distance $p/r$ à la tour tubulaire . . . . .	38
Figure 1.13 Vitesse relative en fct de la distance $p/r$ à la tour de treillis . . . . .	39
Figure 1.14 Zone d'ombrage créée par la tour de mesure . . . . .	41
Figure 1.15 Limites d'intensité de turbulence en fonction de la vitesse . . . . .	44
Figure 1.16 Index de classification basée sur l'erreur de mesure . . . . .	47
Figure 1.17 Anémomètre Risø P2546 . . . . .	48
Figure 1.18 Réponse angulaire de l'anémomètre Risø P2546a . . . . .	49
Figure 1.19 Modélisation de la dépendance face à la température du Risø P2546a . . . . .	51
Figure 1.20 Anémomètre NRG#40 . . . . .	52
Figure 1.21 Réponse angulaire de l'anémomètre NRG#40 . . . . .	53

Figure 1.22 Couple de friction en fonction de la température . . . . .	54
Figure 1.23 Anémomètre NRG IcefreeIII . . . . .	55
Figure 1.24 Anémomètre RMY-5103 . . . . .	57
Figure 1.25 Anémomètre RMY-5305 . . . . .	58
Figure 2.1 Illustration de la non-linéarité à basse vitesse . . . . .	60
Figure 3.1 Esquisse de la section d'essai de la soufflerie . . . . .	82
Figure 3.2 Vue d'ensemble de la soufflerie utilisée pour les tests . . . . .	83
Figure 3.3 Interface Labview des tests de stabilité . . . . .	85
Figure 3.4 Interface Labview des tests de calibration de la soufflerie . . . . .	88
Figure 3.5 Pression dynamique dans le plan de mesure de l'anémomètre. . . . .	91
Figure 3.6 Interface Labview des tests d'étalonnage des anémomètres . . . . .	93
Figure 4.1 Graphique de comparaison des distributions de vitesse entre les anémomètres NRG#40 (20m) et Risø P2546a . . . . .	101
Figure 4.2 Graphique de comparaison des distributions de vitesse entre les anémomètres NRG#40 (18m) et RMY-5103 . . . . .	102
Figure 4.3 Graphique des distributions de vitesse de l'anémomètre NRG#40 à 20m . .	105
Figure 4.4 Graphique des distributions de vitesse de l'anémomètre NRG#40 à 18m . .	106
Figure 4.5 Graphique type des tests de stabilité . . . . .	116
Figure 4.6 Photo illustrant le système de climatisation lors de son installation . . . . .	120
Figure 4.7 Influence de la température sur la mesure de l'anémomètre Risø P2546a . .	132
Figure 4.8 Influence de la température sur la mesure de l'anémomètre NRG#40 . . . .	134
Figure 4.9 Influence en température l'anémomètre NRG IcefreeIII (chauffé) . . . . .	136
Figure 4.10 Influence en température sur l'anémomètre NRG IcefreeIII (non chauffé) . . . . .	137
Figure 4.11 Influence de la température sur la mesure de l'anémomètre RMY-5103 . . .	138

Figure 4.12	Influence de la température sur la mesure de l'anémomètre RMY-5305 . . . . .	140
Figure I.1	Lecture des anémomètres NRG#40 (20m) et Risø P2546a en fonction de la température . . . . .	157
Figure I.2	Variation de lecture des anémomètres NRG#40 (20m) et Risø P2546a en fonction de la température . . . . .	158
Figure I.3	Lecture des anémomètres NRG#40 (18m) et RMY-5103 en fonction de la température . . . . .	160
Figure I.4	Variation de lecture des anémomètres NRG#40 (18m) et RMY-5103 en fonction de la température . . . . .	161
Figure I.5	Lecture de l'anémomètre NRG#40 (20m) sur les enregistreurs NRG et Omega en fonction de la température . . . . .	163
Figure I.6	Lecture de l'anémomètre NRG#40 (20m) sur les enregistreurs NRG et SecondWind en fonction de la température . . . . .	164
Figure I.7	Lecture de l'anémomètre NRG#40 (20m) sur les enregistreurs Omega et SecondWind en fonction de la température . . . . .	165
Figure I.8	Variation de lecture de l'anémomètre NRG#40 (20m) sur les enregistreurs NRG et Omega en fonction de la température . . . . .	166
Figure I.9	Variation de lecture de l'anémomètre NRG#40 (20m) sur les enregistreurs NRG et SecondWind en fonction de la température . . . . .	167
Figure I.10	Variation de lecture de l'anémomètre NRG#40 (20m) sur les enregistreurs Omega et SecondWind en fonction de la température . . . . .	168
Figure I.11	Lecture de l'anémomètre NRG#40 (18m) sur les enregistreurs NRG et Omega en fonction de la température . . . . .	170
Figure I.12	Lecture de l'anémomètre NRG#40 (18m) sur les enregistreurs NRG et SecondWind en fonction de la température . . . . .	171
Figure I.13	Lecture de l'anémomètre NRG#40 (18m) sur les enregistreurs Omega et SecondWind en fonction de la température . . . . .	172
Figure I.14	Variation de lecture de l'anémomètre NRG#40 (18m) sur les enregistreurs NRG et Omega en fonction de la température . . . . .	173
Figure I.15	Variation de lecture de l'anémomètre NRG#40 (18m) sur les enregistreurs NRG et SecondWind en fonction de la température . . . . .	174

Figure I.16	Variation de lecture de l'anémomètre NRG#40 (18m) sur les enregistreurs Omega et SecondWind en fonction de la température . . . . .	175
Figure I.17	Lecture des anémomètres NRG#40 (20m) et Risø P2546a en fonction de la vitesse verticale . . . . .	177
Figure I.18	Variation de lecture des anémomètres NRG#40 (20m) et Risø P2546a en fonction de la vitesse verticale . . . . .	178
Figure I.19	Lecture des anémomètres NRG#40 (18m) et RMY-5103 en fonction de la vitesse verticale . . . . .	180
Figure I.20	Variation de lecture des anémomètres NRG#40 (18m) et RMY-5103 en fonction de la vitesse verticale . . . . .	181
Figure I.21	Lecture de l'anémomètre NRG#40 (20m) sur les enregistreurs NRG et Omega en fonction de la vitesse verticale . . . . .	183
Figure I.22	Lecture de l'anémomètre NRG#40 (20m) sur les enregistreurs NRG et SecondWind en fonction de la vitesse verticale . . . . .	184
Figure I.23	Lecture de l'anémomètre NRG#40 (20m) sur les enregistreurs Omega et SecondWind en fonction de la vitesse verticale . . . . .	185
Figure I.24	Variation de lecture de l'anémomètre NRG#40 (20m) sur les enregistreurs NRG et Omega en fonction de la vitesse verticale . . . . .	186
Figure I.25	Variation de lecture de l'anémomètre NRG#40 (20m) sur les enregistreurs NRG et SecondWind en fonction de la vitesse verticale . . . . .	187
Figure I.26	Variation de lecture de l'anémomètre NRG#40 (20m) sur les enregistreurs Omega et SecondWind en fonction de la vitesse verticale . . . . .	188
Figure I.27	Lecture de l'anémomètre NRG#40 (18m) sur les enregistreurs NRG et Omega en fonction de la vitesse verticale . . . . .	190
Figure I.28	Lecture de l'anémomètre NRG#40 (18m) sur les enregistreurs NRG et SecondWind en fonction de la vitesse verticale . . . . .	191
Figure I.29	Lecture de l'anémomètre NRG#40 (18m) sur les enregistreurs Omega et SecondWind en fonction de la vitesse verticale . . . . .	192
Figure I.30	Variation de lecture de l'anémomètre NRG#40 (18m) sur les enregistreurs NRG et Omega en fonction de la vitesse verticale . . . . .	193

Figure I.31	Variation de lecture de l'anémomètre NRG#40 (18m) sur les enregistreurs NRG et SecondWind en fonction de la vitesse verticale . . . .	194
Figure I.32	Variation de lecture de l'anémomètre NRG#40 (18m) sur les enregistreurs Ohmega et SecondWind en fonction de la vitesse verticale . .	195
Figure I.33	Calibration de l'anémomètre Risø P2546a . . . . .	197
Figure I.34	Calibration de l'anémomètre NRG#40 . . . . .	198
Figure I.35	Calibration de l'anémomètre NRG IcefreeIII (avec chauffage) . . . . .	199
Figure I.36	Calibration de l'anémomètre NRG IcefreeIII (sans chauffage) . . . . .	200
Figure I.37	Calibration de l'anémomètre RMY-5103 . . . . .	201
Figure I.38	Calibration de l'anémomètre RMY-5305 . . . . .	202



## LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES

$A$	Aire projetée d'une coupole [m <sup>2</sup> ]
$B$	Pression barométrique [Pa]
$c$	Facteur d'échelle de la distribution de Weibull
$C_h$	Coefficient de tête du tube de pitot
$C_T$	Coefficient de poussée
$D_e$	Diamètre de rotor équivalent [m]
$D_n$	Diamètre du rotor de l'éolienne [m]
$f$	Fréquence de turbulence [Hz]
$f_{aero}$	Forces aérodynamiques sur le disque [N]
$h$	Hauteur de l'obstacle [m]
$\tilde{h}$	Vitesse horizontale instantanée [m/s]
$H$	Hauteur du moyeu du rotor de l'éolienne [m]
$I$	Inertie du disque [kg·m <sup>2</sup> ]
$IT_i(t)$	Intensité de turbulence dans la direction longitudinale [%]
$IT_j(t)$	Intensité de turbulence dans la direction transversale [%]
$IT_k(t)$	Écart-type de vitesse dans la direction verticale [m/s]
$k$	Facteur de forme de la distribution de Weibull
$k_b$	Facteur de correction due au ratio de blocage
$k_c$	Facteur de calibration de la soufflerie
$K_a$	Constante de l'équation du couple de friction [s/rad]
$K_f$	Facteur de proportionnalité de l'équation du couple de friction [N/m <sup>2</sup> ]
$l$	Distance de calibration [m]
$l_w$	Largeur de l'obstacle [m]
$l_0$	Constante de distance [m]
$L_n$	Distance entre le mât de mesure et l'éolienne [m]
$M_{friction}$	Couple de friction du rotor [N·m]
$n$	Exposant du profil de vitesse

$P_w$	Pression de vapeur de l'eau [Pa]
$P_0$	Porosité de l'obstacle [m]
$r$	Rayon du disque [m]
$R$	Rayon du rotor de l'anémomètre à coupole [m]
$R_w$	Constante des gaz de la vapeur d'eau [J/kg·K]
$R_0$	Constante des gaz de l'air sec [J/kg·K]
$s$	Facteur de solidité d'une tour de treillis
$\dot{s}$	Fréquence instantanée de rotation [rad/s]
$S$	Fréquence de rotation du rotor de l'anémomètre [Hz]
$S_k(f)$	Spectre de puissance de la fréquence $f$
$T$	Température absolue [K]
$u(t)$	Fluctuation de la composante longitudinale du vecteur de vitesse de vent [m/s]
$u_{\text{soufflerie}}$	Incertitude de mesure due à la soufflerie [m/s]
$u_{\text{calib souff}}$	Incertitude de mesure due à la calibration de la soufflerie [m/s]
$u_{\text{sensib pr}}$	Incertitude de mesure due à la sensibilité du capteur de pression [m/s]
$u_{\text{amplif pr}}$	Incertitude de mesure due à la l'amplif. du signal du capteur de pression [m/s]
$u_{\text{echant pr}}$	Incertitude de mesure due à la l'échant. du signal du capteur de pression [m/s]
$u_{\text{temp}}$	Incertitude de mesure due au capteur de température [m/s]
$u_{\text{signal temp}}$	Incertitude de mesure due au traitement du signal du capteur de température [m/s]
$u_{\text{pitot}}$	Incertitude de mesure due au coefficient de tête du tube de pitot [m/s]
$u_{\text{echantillon}}$	Incertitude de mesure due à l'échantillonnage de la vitesse moyenne [m/s]
$u_{\text{humidite}}$	Incertitude de mesure due à la correction en humidité de la densité [m/s]
$u_*$	Vitesse de friction [m/s]
$U$	Vitesse horizontale moyenne [m/s]
$U_{\text{energie}}$	Vitesse de vent d'énergie équivalente [m/s]
$U_{\text{long}}$	Vitesse de vent longitudinale [m/s]
$U_{\text{hor}}$	Vitesse de vent horizontale [m/s]
$U_{\text{vec}}$	Vitesse de vent scalaire vectorielle [m/s]
$U_x(t)$	Composante longitudinale du vecteur de vitesse de vent [m/s]

$U_y(t)$	Composante transversale du vecteur de vitesse de vent [m/s]
$U_z(t)$	Composante verticale du vecteur de vitesse de vent [m/s]
$U_h$	Vitesse moyenne à la hauteur de l'obstacle [m/s]
$U_i$	Vitesse moyenne à la classe de vitesse $i$ [m/s]
$U_{\max}$	Rafale de vent maximale [m/s]
$\vec{U}$	Vecteur de vitesse du vent [m/s]
$v(t)$	Fluctuation de la composante transversale du vecteur de vitesse de vent [m/s]
$\hat{w}$	Vitesse verticale instantanée [m/s]
$w(t)$	Fluctuation de la composante verticale du vecteur de vitesse de vent [m/s]
$\bar{W}$	Vitesse verticale moyenne [m/s]
$x$	Distance entre le mât de mesure et l'obstacle [m]
$z$	Altitude de mesure [m]
$z_0$	Longueur de rugosité [m]
$\alpha$	Décélération angulaire [ $\text{rad/s}^2$ ]
$\delta_{\text{ort}}$	Biais de mesure causé par le désalignement de l'anémomètre [m/s]
$\delta_{\text{mvt}}$	Biais de mesure causé par le déplacement de l'hélice [m/s]
$\delta_{\text{turb}}$	Biais de mesure causé par la turbulence [m/s]
$\delta_u$	Biais de mesure causé par la fluctuation de vitesse longitudinale [m/s]
$\delta_v$	Biais de mesure causé par la fluctuation de l'orientation du vent [m/s]
$\delta_w$	Biais de mesure causé par la fluctuation de vitesse verticale [m/s]
$\delta_*$	Biais de mesure causé par la réponse angulaire [m/s]
$\Delta p_{\text{ref}}$	Pression différentielle de référence [Pa]
$\varepsilon_i$	Erreur maximale de mesure à la classe de vitesse $i$ [m/s]
$\theta$	Angle d'inclinaison de l'anémomètre à coupoles [°]
$\kappa$	Constante de Von Karman [m]
$\Lambda$	Constante du modèle dynamique [m]
$\mu_1, \mu_2$	Paramètres de la réponse angulaire
$\nu$	Viscosité dynamique de l'air [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
$\rho$	Densité du disque [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$\sigma_k(t)$	Intensité de turbulence dans la direction verticale [%]
$\sigma_i(t)$	Écart-type de vitesse dans la direction longitudinale [m/s]
$\sigma_j(t)$	Écart-type de vitesse dans la direction transversale [m/s]
$\sigma_t$	Écart-type de la vitesse moyenne [m/s]
$\tau_{\text{mech}}(\omega)$	Couple de friction des roulements [N·m]
$\tau$	Constante de temps de la réponse de l'anémomètre [s]
$\Upsilon$	Orientation du rotor de l'éolienne [°]
$\phi$	Orientation du vent [°]
$\psi$	Inclinaison du vent par rapport à l'horizontale [°]
$\omega$	Vitesse de rotation du rotor [rad/s]

## INTRODUCTION

Ce chapitre expose l'origine du projet, ses objectifs ainsi que la méthodologie adoptée. La structure du mémoire est également présentée en fin de chapitre.

### **Mise en contexte**

Dans le monde moderne dans lequel nous vivons, la production d'énergie occupe une position de premier ordre. Son influence est observable dans tous les aspects de notre société. Traditionnellement, la plus grande part de cette production a été attribuée au pétrole, au charbon et au gaz naturel. Les dernières années semblent toutefois présager d'importants changements.

La baisse des ressources mondiales de combustibles fossiles combinée à une volonté grandissante de la population de se tourner vers des énergies renouvelables poussent de plus en plus les gouvernements à créer des incitatifs afin d'encourager leur développement. Les pressions des groupes environnementaux en ce qui concerne le réchauffement climatique viennent également faire pencher la balance vers les énergies vertes. En tête de liste de ces énergies émergentes, on retrouve l'éolien.

### **Progression de l'énergie éolienne**

L'utilisation du vent par l'homme afin d'effectuer un travail mécanique date de plusieurs siècles et couvre une multitude de champs d'application. Que l'on pense aux voiles de bateaux ou aux moulins servant à moudre le grain ou à pomper l'eau, le vent est exploité partout.

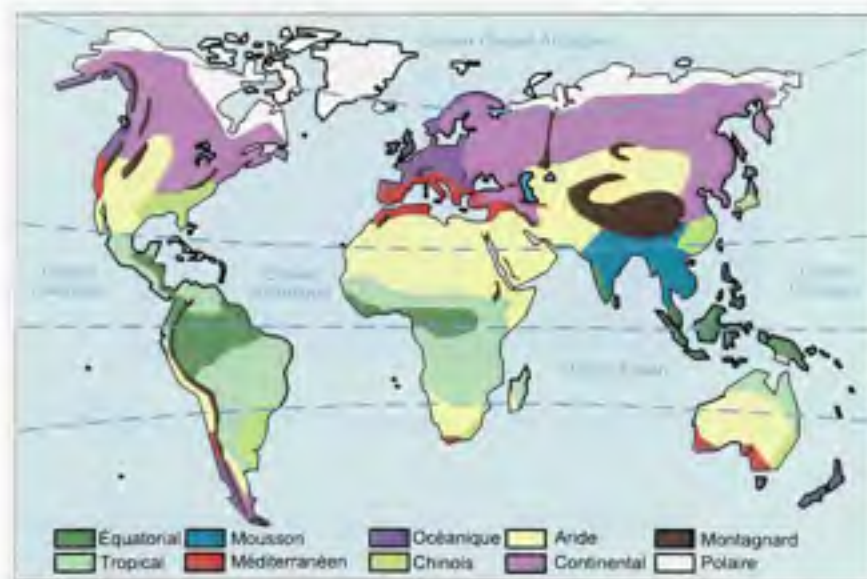
La conversion de l'énergie éolienne en électricité est par contre beaucoup plus récente. La première éolienne dédiée à cette tâche fut construite à la fin du 19<sup>e</sup> siècle à Cleveland, Ohio. Celle-ci était surmontée d'un rotor de 17m de diamètre, composé de 144 pales, générant une puissance de 12kW.

Il y eut une certaine stagnation dans la production éolienne d'électricité jusqu'aux années 1970. Cette époque marqua le réel début de l'industrie éolienne. C'est à ce moment que des appareils de l'ordre de quelques centaines de kilowatts firent leur apparition sur le marché. L'amélioration de la capacité de stockage des batteries fut également une aide majeure pour le milieu. La production étant contrainte de se satisfaire de ce que la nature veut bien offrir, la possibilité de conserver l'énergie produite en période creuse fut un gain majeur.

Les efforts de recherche, sans cesse croissants, permirent aux éoliennes qui firent leur apparition dans les années 1990 de passer le cap du mégawatt et on retrouve de nos jours des appareils produisant jusqu'à 5MW, autant sur terre que sur l'eau. Ceux-ci ont également la possibilité de se raccorder au réseau électrique afin de rendre leur énergie disponible à l'ensemble de la population. Afin d'ouvrir la production éolienne à de nouvelles régions, il est maintenant primordial d'adapter le fonctionnement des éoliennes aux différentes conditions climatiques présentes sur le globe.

### Impact de la diversité des conditions climatiques

La diversité climatique présente sur notre planète (figure 0.1) nous oblige constamment à nous adapter lors de nos déplacements. Il en va de même pour la majorité des équipements et produits que l'on fabrique. L'industrie éolienne n'est pas en reste, les performances aérodynamiques des rotors, et donc l'énergie produite, sont grandement affectées par les variations de température. Il est donc important de bien comprendre et quantifier l'impact qu'a le climat sur les outils utilisés aux divers stades de l'implantation d'un projet éolien.



**Figure 1** *Carte mondiale des climats.*

Source : Cette figure est tirée de l'encyclopédie en ligne Wikipedia sous la rubrique climat. (<http://fr.wikipedia.org/wiki/Climat>)



Dès le début d'un projet de production d'énergie d'éolienne, divers sites sont évalués afin de déterminer celui pour lequel le potentiel éolien est le plus élevé. Différents types de capteurs sont utilisés pour la mesure de vent, mais cette étude ne porte que sur les anémomètres à coupes (figure 0.2) et les anémomètres à hélice (figure 0.3).



**Figure 2** *Anémomètre à coupes de marque NRG.*

Source : Cette figure est tirée de la fiche de l'anémomètre NRG#40, sur le site internet de la compagnie. (<http://www.nrgsystems.com>)



**Figure 3** *Anémomètre à hélice de marque RM-Young.*

Source : Cette figure origine de photos personnelles prises de l'anémomètre.

Comme pour les rotors d'éoliennes, le comportement aérodynamique des anémomètres est affecté par les propriétés physique de l'air, qui sont elles mêmes influencées par la température. De plus, selon le principe de fonctionnement utilisé, la mécanique interne et l'électronique de l'instrument peuvent également s'en trouver affectés. C'est donc à cette étape qu'entre en jeu la présente étude.



## Objectifs et méthodologie

L'objectif premier de ce projet est d'obtenir une bonne compréhension ainsi que la maîtrise des techniques de mesure de vitesse de vent, à l'aide d'anémomètres à rotor, dans un écoulement atmosphérique turbulent sur un site sujet à de fortes variations saisonnières de température. Pour ce faire, une approche globale sera adoptée afin de bien cerner la problématique de mesure du vent. L'analyse débutera au début de la chaîne de mesure, avec l'anémomètre, et se prolongera jusqu'à l'influence du système d'acquisition de données. Plus spécifiquement, cette étude cherche à quantifier les effets de la variation de température sur la qualité de la mesure de vitesse du vent.

Afin d'en arriver à l'atteinte des objectifs fixés, deux installations seront utilisées selon une approche expérimentale. La première installation est la soufflerie aérodynamique du département de génie mécanique de l'Université Laval. La seconde se situe près des bureaux de GPCo, partenaire industriel de ce projet. Il s'agit d'une tour de mesure météorologique équipée de plusieurs anémomètres commerciaux reliés en parallèle à différents systèmes d'acquisition de données.

La soufflerie a dernièrement été modifiée afin d'obtenir un contrôle sur la température de l'écoulement et, également, pour permettre un fonctionnement approprié à faible vitesse de vent. Celle-ci sera utilisée afin de vérifier l'impact de la température sur l'anémomètre à l'aide de diverses mesures et étalonnages, selon les recommandations du MEASNET. Cette installation permettra également de vérifier l'influence des configurations de branchement des enregistreurs de données sur les informations recueillies.

L'installation extérieure sera exploitée afin d'étudier le comportement des anémomètres dans un écoulement atmosphérique turbulent. Pour ce faire, plusieurs types d'anémomètres seront installés sur la tour à des élévations telles qu'il y aura redondances entre les mesures.

## Structure du mémoire

Dans le but de présenter clairement le traitement des objectifs présentés ci-haut, la subdivision de ce mémoire s'effectuera comme suit :

- Le **chapitre 2** présente une revue de la littérature traitant de sujets liés au présent projet ;
- Le **chapitre 3** expose les bases de théorie nécessaire à la compréhension du projet à l'étude ;
- Le **chapitre 4** traite des procédures adoptées lors de la partie expérimentale du projet ainsi que des méthodes d'analyse utilisées ;
- Le **chapitre 5** rapporte les observations et les résultats découlant des tests effectués ainsi qu'une analyse de ceux-ci ;
- Le **chapitre 6** propose certaines recommandations quant à la suite possible du projet ainsi qu'une brève conclusion sur le travail effectué.

## CHAPITRE 1

### REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre présente une revue de la littérature ayant trait à l'anémométrie, en particulier les anémomètres à rotor. On y retrouve, pour débiter, la description des différentes définitions de vitesse de vent. Ensuite, un historique de l'anémométrie est présenté. Par après, l'aspect normatif régissant la calibration et l'utilisation de ce type d'appareil est détaillé. Pour terminer, les caractéristiques opérationnelles des instruments utilisés dans le cadre de ce projet sont présentées. Les concepts théoriques et les caractéristiques de fonctionnement abordés ne seront présentés en détail qu'au chapitre 2.

#### 1.1 Caractérisation du vent

Il est primordial, avant de se lancer dans ce travail, de s'assurer que la mesurande de l'instrument que l'on désire étudier, c'est-à-dire le vent, est adéquatement définie et que ses caractéristiques sont bien connues et comprises. Il n'est pas question ici de s'attarder à l'aspect météorologique du vent mais plutôt à sa définition mathématique dans l'espace.

##### 1.1.1 Caractéristiques de base

Le vent étant une quantité vectorielle, il peut être présenté sous différentes formes. Selon un référentiel cartésien,  $x$  et  $y$  formant le plan horizontal et  $z$  étant dans le sens de l'écoulement, il est défini comme suit :

$$\vec{U} = \begin{pmatrix} U_x(t) \\ U_y(t) \\ U_z(t) \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

De façon générale, on présente la mesure de vitesse de vent comme étant une quantité moyennée sur une certaine période de temps  $T$ . Statistiquement parlant, le vent est plus souvent présenté comme une vitesse horizontale moyenne  $U$  :

$$U = \frac{1}{T} \int_0^T \sqrt{U_x^2(t) + U_y^2(t)} dt \quad (1.2)$$

On donne également la direction horizontale du vent  $\phi$ , de  $0^\circ$ , au nord, jusqu'à  $360^\circ$ , selon le sens horaire :

$$\phi = \frac{1}{T} \int_0^T \arctan \left( \frac{U_x(t)}{U_y(t)} \right) dt \quad (1.3)$$

En plus des caractéristiques horizontales de vent, on donne la vitesse verticale  $W$  et l'inclinaison du vent selon l'horizontale  $\psi$

$$W = \frac{1}{T} \int_0^T U_z(t) dt \quad (1.4)$$

$$\psi = \arctan \left( \frac{W}{U} \right) \quad (1.5)$$

Suite à la définition de ces variables, le vecteur de vitesse peut maintenant être présenté en fonction de valeurs moyennes accompagnées de fluctuations selon les trois directions cartésiennes :

$$\vec{U} = \begin{pmatrix} U + u(t) \\ U + v(t) \\ W + w(t) \end{pmatrix} \quad (1.6)$$

Ces fluctuations étant fonction du temps, il est possible de déterminer pour chacune d'elles l'écart-type  $\sigma$  sur la période  $T$  choisie. Ces valeurs permettent également d'obtenir des informations sur le caractère turbulent du vent dans les directions  $x$ ,  $y$  et  $z$ . Pour ce faire, le concept d'intensité de turbulence ( $IT$ ) est introduit. Celle-ci est représentée par le rapport entre l'écart-type, selon les trois directions cartésiennes, et la vitesse horizontale moyenne.

$$IT_j = \frac{\sigma_j}{U} \quad (1.7)$$

Finalement, on obtient l'essentiel de la définition statistique complète du vent, sur une période de temps  $T$ , à l'aide des six paramètres suivants (Pedersen *et al.*, 2002) :

- La vitesse horizontale ( $U$ );
- La vitesse verticale ( $W$ );
- La direction du vent ( $\phi$ );
- Les écarts-type dans chaque direction cartésienne ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  et  $\sigma_z$ ).

### 1.1.2 Définitions de la vitesse de vent

Le développement d'appareils interagissant avec le vent a mené à diverses définitions de ce dernier permettant de prendre en considération l'aspect physique du vent adapté à chaque application. Les quatre principales définitions abordées dans la littérature en lien avec l'énergie éolienne sont présentées dans les sous-sections qui suivent.

#### Vitesse de vent totale (3D)

La définition de vitesse de vent scalaire vectorielle se base sur l'hypothèse que les trois composantes de vents contribuent à la production de l'éolienne. La définition de la vitesse moyenne mesurée se présente donc comme suit :

$$U_{\text{vec}} = \frac{1}{T} \int_0^T \sqrt{U_x^2(t) + U_y^2(t) + U_z^2(t)} dt \equiv \sqrt{U^2 + W^2} \quad (1.8)$$

#### Vitesse de vent horizontale (2D)

La définition de vitesse de vent horizontale, quant à elle, exclut la composante verticale de vent. On considère ici que la puissance extraite par l'éolienne n'est fonction que des composantes horizontales de vent. Dans ce cas, la vitesse est définie ainsi :

$$U_{\text{hor}} = \frac{1}{T} \int_0^T \sqrt{U_x^2(t) + U_y^2(t)} dt \equiv U \quad (1.9)$$

### Vitesse de vent longitudinale (1D)

La définition de vitesse de vent longitudinale ressemble à la définition de vitesse horizontale par le fait qu'elle exclut la composante de vent verticale. La différence vient du fait que seule la composante de vent perpendiculaire au rotor est retenue comme étant génératrice de puissance. L'équation ci-dessous illustre la définition mathématique de cette interprétation de la vitesse. L'argument du cosinus représente l'angle d'incidence du vent sur le rotor, l'angle  $\gamma$  étant l'orientation du rotor.

$$U_{\text{long}} = \frac{1}{T} \int_0^T \sqrt{U_x^2(t) + U_y^2(t)} \cos \left( \arctan (U_x(t)/U_y(t)) - \gamma \right) dt \quad (1.10)$$

De façon générale, dans les codes de modélisation de puissance générée par une éolienne, cette définition de vitesse de vents est celle utilisée. (Pedersen *et al.*, 2002)

### Vitesse de vent d'énergie équivalente

On en vient, pour terminer, à la définition de vitesse de vent d'énergie équivalente. Cette définition se base sur l'hypothèse que l'éolienne est un appareil influencé par le flux d'énergie contenu dans l'air. Le but ici n'étant pas de démontrer l'origine mathématique de cette définition, le rapport de Pedersen *et al.* (2002) expose plus en détail cette démarche, seule l'expression simplifiée est présentée :

$$U_{\text{energie}} \approx U \left[ 1 + 3 \frac{\sigma_x^2}{U^2} + \frac{\sigma_y^2}{U^2} + \frac{\sigma_z^2}{U^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (1.11)$$

Cette façon de concevoir la vitesse de vent équivaut donc à déterminer la vitesse d'un écoulement non turbulent véhiculant la même quantité d'énergie que l'écoulement réel (Frandsen *et al.*, 2000).

## 1.2 Théorie de caractérisation dynamique des anémomètres à rotor

Cette section présente les paramètres de base permettant de caractériser et modéliser le comportement d'un anémomètre ainsi que les erreurs de mesure liées à son utilisation en écoulement atmosphérique réel.

### 1.2.1 Anémomètres à coupoles

L'anémomètre à coupoles étant l'instrument de mesure de vent le plus répandu pour les campagnes de mesure éolienne, son comportement ainsi que les différents facteurs pouvant affecter son fonctionnement sont très bien documentés. La grande popularité de cet instrument s'explique par trois principales qualités (Kristensen, 1993, 1994, 1999). Premièrement, il s'agit d'un instrument de mesure omnidirectionnel. Il n'est nécessaire que de s'assurer que l'axe du rotor soit à la verticale, l'orientation n'a aucune importance. Deuxièmement, c'est un instrument robuste et facile d'utilisation. Troisièmement, c'est un instrument pouvant être aisément calibré et avec un très haut degré de précision.

#### Modélisation de la dynamique de l'instrument

L'objectif à la base de la compréhension de la dynamique de l'anémomètre est de bien cerner les différents paramètres influençant le comportement de l'instrument afin de bien maîtriser son utilisation en conditions réelles.

Un modèle représentant le comportement de l'anémomètre à coupoles fut développé par Kristensen (1993). Celui-ci prend la forme suivante :

$$F(\bar{s}, \bar{h}, \bar{w}) = \frac{(\bar{h} + \mu_1 \bar{w} - l\bar{s})(\bar{h} + \mu_1 \bar{w} + \Lambda \bar{s})}{l_0(l + \Lambda)} + \frac{\mu_2 \bar{w}^2}{2l_0 l} \quad (1.12)$$

Cette équation,  $F$ , représente le taux de variation de la fréquence de rotation ( $ds/dt$ ). Les trois variables de l'équation sont définies comme suit :

- $\bar{s}$  représente la fréquence instantanée de rotation, en  $rad/s$ ;
- $\bar{h}$  représente la vitesse horizontale instantanée ( $\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}$ ), en  $m/s$ ;
- $\bar{w}$  représente la vitesse verticale instantanée, en  $m/s$ .

Il est bon ici de noter le fait qu'un nombre fini de coupoles compose le rotor, une certaine irrégularité dans la vitesse de rotation sera alors observée car il y aura un changement de couple en fonction de la position de celles-ci. La résolution temporelle minimale sera donc égale au temps que prend le rotor pour effectuer un tour.



Les paramètres restants sont des constantes propres à chaque instrument. Dans l'équation 1.12,  $l$  représente la distance de calibration, en unité de longueur. La constante  $l_0$  est appelée la constante de distance, elle correspond à la longueur de la colonne d'air passant par le rotor pour que l'instrument atteigne 63% de sa réponse à un changement de vitesse. Elle représente l'équivalent en distance de la constante de temps d'un système linéaire du premier ordre. Le paramètre  $\lambda$ , quant à lui, n'a pas de représentation physique pour aider à sa visualisation. Comme les deux constantes précédentes, il est également en unité de longueur. D'après les travaux de Kristensen (1993), il serait en lien avec le phénomène de survitesse. Les deux derniers éléments de l'équation,  $\mu_1$  et  $\mu_2$ , servent à caractériser la réponse angulaire de l'anémomètre, ils sont adimensionnels.

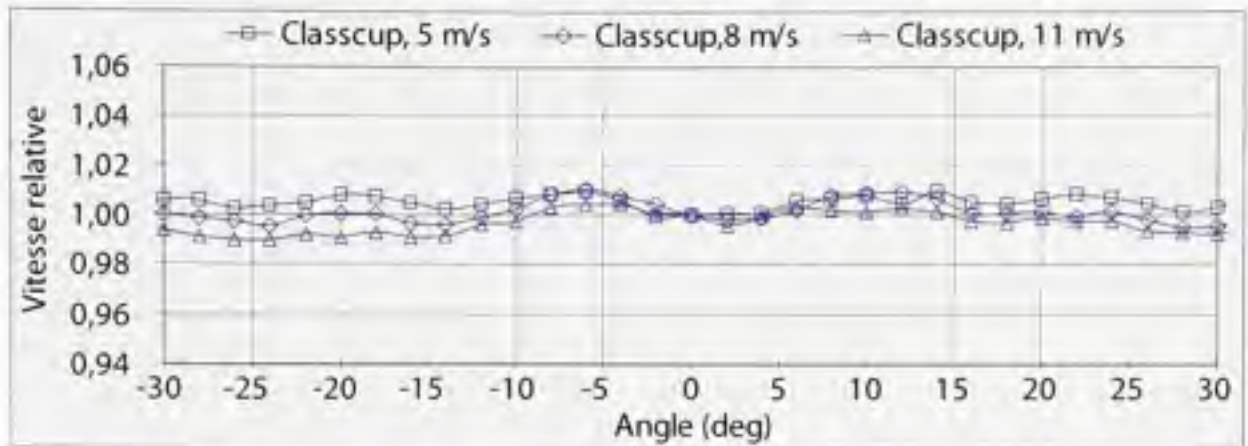
### Réponse angulaire

De par la topographie du terrain environnant, l'écoulement d'air passant par le rotor n'est pas toujours dans le plan horizontal. Ceci a pour effet de changer, pour une même vitesse moyenne de vent, la lecture de l'instrument. L'équation 1.13, proposée par Kristensen (1993), présente une approximation de la réponse angulaire d'un anémomètre à coupoles en fonction de l'inclinaison et des paramètres  $\mu_1$  et  $\mu_2$ .

$$g(\theta) \approx \cos \theta + \mu_1 \theta + \frac{1}{2} \mu_2 \theta^2 \quad (1.13)$$

Le comportement des anémomètres à coupoles face à l'inclinaison du flot d'air est influencé par leur design. Ces anémomètres sont conçus de manière à mesurer soit la vitesse totale ou seulement la vitesse horizontale (voir section 1.1.2). En ce qui concerne les deux définitions restantes, longitudinale et énergie équivalente, aucun instrument de ce type n'est commercialement disponible pour l'instant. Il est toutefois possible d'obtenir une lecture de la vitesse longitudinale en combinant un anémomètre à coupole à une girouette (Kristensen, 1999).

Les anémomètres conçus pour répondre à la vitesse de vent totale ont une réponse angulaire plane, donc insensible à l'inclinaison du vent. Ce type de comportement, lors de calcul de courbes de puissance en terrain incliné, résultera en une sous-évaluation non négligeable de la production annuelle d'énergie par rapport à un terrain plat (Pedersen, 2004b).



**Figure 1.1** Graphique illustrant une réponse angulaire plane  
(Adaptation de Pedersen, 2003)

Source : Cette figure est tirée de Pedersen, 2003 « Development of a Classification System for Cup Anemometers - CLASSCUP » et correspond à une adaptation de « Figure 4-1 Angular response of the four classified cup anemometers and the cosine function, » présentée en page 31 dans le document original.

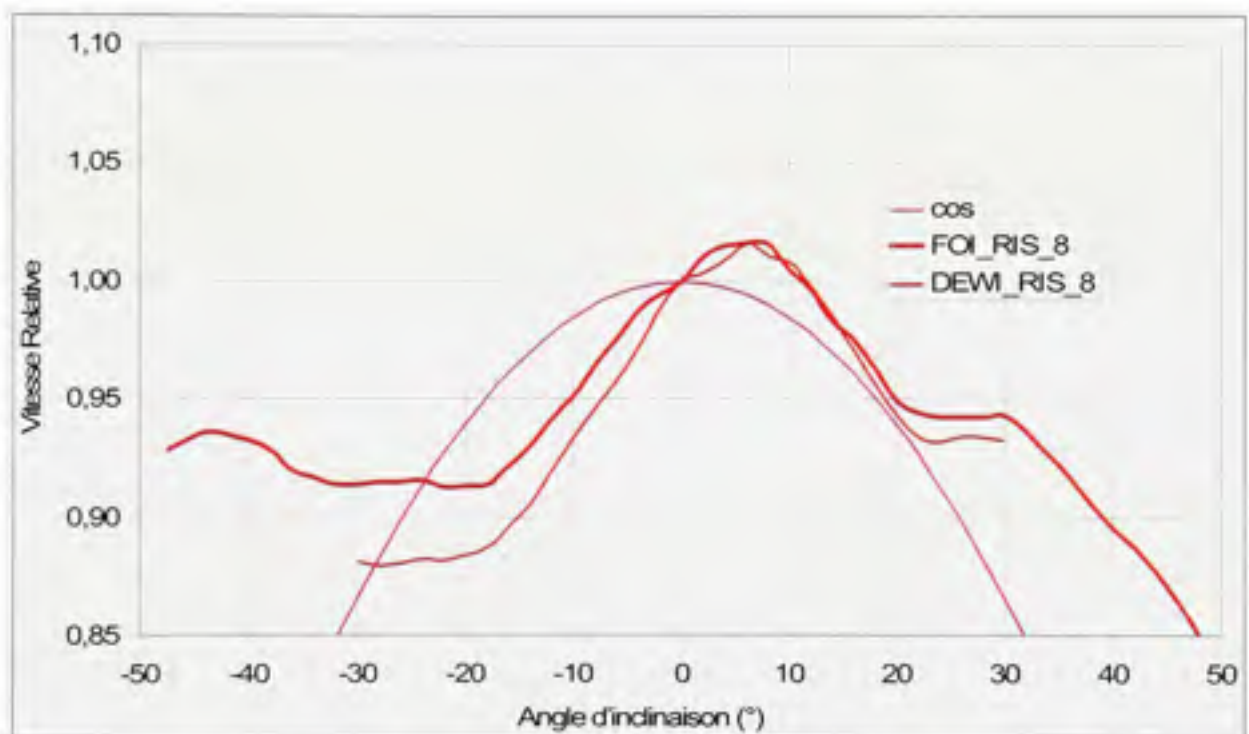
Un anémomètre présentant ce type de réponse a été conçu dans le cadre du projet CLASSCUP. La figure 4 présente la vitesse relative lue par l'anémomètre en fonction de diverses inclinaisons, l'inclinaison positive indiquant que l'écoulement arrive par le dessus du rotor, on y remarque une très faible influence de la lecture à l'inclinaison. Les caractéristiques de survitesse<sup>1</sup> de l'instrument furent par contre anormalement élevées (Pedersen *et al.*, 2002)

Si l'on se penche maintenant sur les anémomètres répondant à la vitesse de vent horizontale, on observe une réponse à l'inclinaison ayant une forme cosinusoidale. Un instrument ayant des paramètres  $\mu_1$  et  $\mu_2$  nuls présente une approximation du quatrième ordre de cette réponse. Il a été démontré que pour ce type de réponse à l'inclinaison, lors de calcul de courbes de puissance en terrain incliné, la production annuelle d'énergie sera légèrement sous-évaluée par rapport à une évaluation en terrain plat (Pedersen, 2004b).

La figure 5 illustre la réponse d'un anémomètre de ce type. Il s'agit de résultat de tests d'inclinaison effectués sur l'anémomètre Risø P2546 par deux laboratoires de recherche, FOI, de Suède, et DEWI, d'Allemagne. On y remarque une réponse ayant la forme cosinusoidale attendue. Toutefois, lors d'une inclinaison négative, l'anémomètre sous estime la vitesse réelle. Le phénomène contraire est observé lors d'inclinaison positive.

<sup>1</sup>Ce phénomène réfère au biais de mesure causé par la turbulence de l'écoulement présenté en page 14

Si l'on considère les instruments actuellement sur le marché, aucun ne présente une réponse angulaire correspondant parfaitement aux définitions présentées ci-dessus. Des travaux dans le cadre du projet CLASSCUP ont par contre démontré qu'il était possible d'optimiser la réponse angulaire cosinusoidale et la minimisation du phénomène de survitesse pour un anémomètre répondant à la vitesse horizontale (Pedersen *et al.*, 2002). En conséquence à cette réponse angulaire non idéale, des biais de lecture viennent fausser la mesure de vitesse de vent faite par l'appareil.



**Figure 1.2** Exemple de réponse angulaire de forme cosinusoidale  
(Adaptation de Dahlberg *et al.*, 2006)

Source : Cette figure est tirée de Dahlberg *et al.*, 2006 « ACCUWIND - Methods for Classification of Cup Anemometers » et correspond à une adaptation de « Figure 6-3 Angular response measurements on Risø cup anemometer by FOI and DEWI at 8m/s » présentée en page 54 dans le document original.

### Analyse des biais de mesure

L'utilisation d'un anémomètre en condition atmosphérique réelle entraîne inévitablement des biais de mesure ( $\delta$ ). Il est important de comprendre ces différentes sources d'erreur afin d'obtenir une lecture plus exacte. Une de ces sources d'erreur a été présentée à la section précé-



dente, il s'agit de la réponse à l'inclinaison. Il est également possible d'attribuer une part du biais à la température, que ce soit par son effet sur la friction ou par le phénomène de givre. Le vieillissement de l'appareil peut également entraîner des déviations de mesure, d'où l'importance de recalibrer l'appareil après un certain temps d'utilisation. Aussi, par l'influence du mât de mesure et d'instrument à proximité, la configuration d'installation peut s'avérer une source probable de biais. La dernière source notable de déviation de lecture, celle sur laquelle porte la suite de cette section, est la turbulence de l'écoulement.

Le biais de mesure causé par la turbulence, également appelé survitesse, est généralement décomposé en quatre composantes (Kristensen, 1999, 2002) :

$$\delta_{\text{turb}} = \delta_u + \delta_v + \delta_w + \delta_r \quad (1.14)$$

La première contribution,  $\delta_u$ , provient de la fluctuation de vitesse dans la direction de l'écoulement. Elle s'explique par le fait que le rotor de l'anémomètre ne répond pas de façon symétrique aux variations de vitesse. Il est possible de la réduire par un design judicieux du rotor permettant de réduire ce paramètre. Il est rapporté qu'un rotor léger et de petite taille diminuerait l'apport au biais causé par ce phénomène.

La seconde contribution,  $\delta_r$ , provient du fait que l'orientation du vent n'est pas constante. On la retrouve régulièrement dans la littérature sous le nom de "DP-error" (MacCready, 1965), il s'agit d'une erreur systématique provenant de la méthode de traitement des données. Il a été démontré expérimentalement par Kristensen (1999) que cet apport à la survitesse peut être éliminé par la synchronisation de la mesure instantanée de l'anémomètre avec celle d'une girouette. La procédure consiste à effectuer l'addition vectorielle des vecteurs instantanés de mesure plutôt que de considérer les moyennes d'orientation et de vitesse sur la période de mesure. Cette méthode, en plus d'éliminer  $\delta_u$ , permet également de résoudre un problème fréquemment rencontré par le calcul de la direction moyenne de l'écoulement. Lorsque la direction oscille autour du Nord, un peu plus de  $0^\circ$  ou un peu moins de  $360^\circ$ , la méthode standard de calcul donne une direction moyenne totalement erronée. La méthode proposée par Kristensen, utilisant l'addition vectorielle, contourne donc ce problème.

Les deux dernières contributions,  $\delta_w$  et  $\delta_r$ , proviennent de la réponse angulaire de l'instrument. Dans un contexte se rattachant à l'énergie éolienne, la réponse angulaire cosinusoidale étant privilégiée (voir section 1.2.1), la déviation entre celle-ci et le comportement réel de

l'instrument constitue un biais de mesure. Il est possible de minimiser cet apport en réduisant les paramètres  $\mu_1$  et  $\mu_2$  de l'appareil. Dans l'éventualité d'un anémomètre présentant une valeur nulle pour ces constantes, ces biais peuvent être négligés.

Les équations ci-dessous présentent des approximations de ces différents apports (Kristensen *et al.*, 2003) :

$$\delta_u \approx 2 \frac{u_*^2}{U^2} \left( \frac{l_0}{z} \right)^{2/3} \quad (1.15)$$

$$\delta_v \approx 1.8 \frac{u_*^2}{U^2} \quad (1.16)$$

$$\delta_w \approx 0.78 \mu_2 \frac{u_*^2}{U^2} \quad (1.17)$$

$$\delta_s \approx -\mu_1 \frac{u_*^2}{U^2} \left( \frac{l_0}{z} \right)^{4/3} \quad (1.18)$$

Dans les équations (1.15) et (1.18),  $z$  représente l'altitude. Dans tous les cas, elles sont fonctions du rapport entre la vitesse de friction  $u_*$  et la vitesse de l'écoulement  $U$ .<sup>2</sup> Considérant la couche atmosphérique de surface neutre, on note que :

$$\frac{u_*^2}{U^2} = \left[ \kappa / \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) \right]^2 \quad (1.19)$$

Où  $\kappa$  représente la constante de Von Karman, on utilise généralement une valeur de 0.41, et  $z_0$  est une mesure de l'irrégularité du terrain, la longueur de rugosité.

Si l'on s'attarde maintenant aux ordres de grandeur de ces différentes contributions, on observe d'assez grandes variations. Le biais  $\delta_v$  est généralement beaucoup plus important que les autres, par contre, si la combinaison "anémomètre-girouette" est utilisée, il devient quasi-nul. Les biais  $\delta_u$  et  $\delta_w$  sont d'importance comparable et, en conditions de fonctionnement normales, de l'ordre de 1% et moins. La contribution de  $\delta_s$ , étant généralement deux à trois ordres de grandeur inférieure aux biais en  $u$  et en  $w$ , est couramment négligée dans des applications de routine.

<sup>2</sup>La vitesse de friction représente une mesure de l'influence de la rugosité de surface et de la vitesse du vent sur les contraintes de surface. Ce paramètre est utilisé pour quantifier les interactions air-surface.

Pour conclure cette discussion, il faut également considérer l'influence de la complexité du terrain environnant. Lors de l'utilisation d'un anémomètre en terrain plat et dans une couche limite atmosphérique stable, les biais observés seront tous inférieurs à 1% (Kristensen *et al.*, 2003). Par contre, dans le cas d'un écoulement en terrain complexe et en situation de couche limite atmosphérique instable, le même instrument présentera des biais de mesure beaucoup plus importants. Ceci est également vrai pour tous les autres types d'anémomètres.

### 1.2.2 Anémomètres à hélice

La présente section ne porte que sur les observations au sujet d'anémomètres à hélice couplée à une girouette. Les variantes présentées à l'historique (section 1.3.2) ne sont pas détaillées car leur étude n'est pas pertinente au travail présentement en cours.

Malgré sa faible pénétration dans le domaine de l'énergie éolienne, l'anémomètre à hélice possède des avantages notables sur l'anémomètre à coupoles. Premièrement, par le fait qu'il combine en un seul instrument la mesure de vitesse et de direction du vent. Ensuite, il présente une vitesse de démarrage très faible. Les travaux de Desjardins *et al.* (1986) ont mené à la conception d'un instrument répondant, de façon linéaire, à une vitesse de vent aussi faible que 0.08m/s. Il est également rapporté que le phénomène de survitesse serait de moindre importance que pour un rotor à coupoles (Hunter *et al.*, 1999).

Par contre, des désavantages de poids, particulièrement à basse vitesse, viennent entacher ces caractéristiques. Le principal problème vient de l'inaptitude de ces appareils à suivre les variations dans l'orientation de l'écoulement. Ceci a comme répercussion que la vitesse mesurée sera généralement inférieure à la vitesse réelle. De plus, en conditions de turbulence élevée, un décrochage de l'écoulement de la surface des pales a été observé. Il est précisé par Hunter *et al.* (1999) que, pour des mesures de performance d'un parc éolien, l'erreur de mesure de vitesse horizontale de vent peut excéder 25% sous certaines conditions atmosphériques. Il est donc fortement recommandé de ne pas utiliser ce type d'instrument dans ce contexte.

### Modélisation de la dynamique de l'instrument

Le modèle mathématique représentant le comportement dynamique de l'anémomètre à hélice est très similaire à celui de l'anémomètre à coupoles. Selon Kristensen (1994), le modèle qu'il a développé (voir équation 1.12) est aisément adaptable au modèle à hélice. Pour ce faire, il ne suffit que de poser une valeur infinie au paramètre  $\Lambda$ . La différence majeure dans

le comportement dynamique des deux types d'instruments vient du fait que le rotor à hélice possède une réponse symétrique aux variations de vitesse, contrairement à celui à coupole qui répond plus vite à une hausse qu'à une baisse de vitesse. Cette réponse est également plus rapide pour celui à hélice, lorsqu'il est correctement aligné dans le vent.

Il faut toutefois noter le fait que la constante de distance  $l_0$  varie en fonction du désalignement de l'instrument par rapport à la direction de l'écoulement. La réponse dynamique de l'appareil diminuera donc avec l'augmentation de l'angle entre l'axe du rotor et le vecteur de vitesse horizontal. Par exemple, il est indiqué dans Hunter *et al.* (1999) que, lorsque cet angle atteint  $85^\circ$ , la constante de distance atteint le triple de sa valeur initiale.

### Réponse angulaire

Les anémomètres à hélice montés sur girouette étant conçus pour répondre à la vitesse horizontale de vent, ils présentent une réponse de type cosinusoidale. Pour faire un parallèle avec la caractérisation de l'anémomètre à coupoles, la réponse angulaire est ici décrite par un seul paramètre, la constante  $\mu_2$  présentée précédemment (Section 1.2.1).

### Analyse des biais de mesure

De façon générale, les sources de biais pour l'anémomètre à hélice sont similaires à celles présentées pour l'anémomètre à coupoles. Le biais causé par la turbulence atmosphérique présente toutefois quelques différences.

$$\delta_{\text{turb}} = \delta_v + \delta_w + \delta_{\text{ori}} + \delta_{\text{inv}} \quad (1.20)$$

Tout d'abord, on remarque l'absence de biais dans la direction de l'écoulement ( $\delta_u$ ). Ceci s'explique par le fait que la réponse de l'hélice est symétrique quant à l'augmentation ou la diminution de vitesse.

De plus, les contributions des fluctuations transversales et verticales, respectivement  $\delta_v$  et  $\delta_w$ , sont exactement les mêmes que pour un anémomètre à coupoles (Kristensen, 1994, 1998).

Également, on remarque deux biais supplémentaires propres à l'anémomètre à hélice (Kristensen, 1994, 1998, 2005). Le biais d'orientation,  $\delta_{\text{ori}}$ , s'explique physiquement par le perpétuel retard de l'instrument face aux fluctuations dans la direction de l'écoulement. L'axe de



rotation de l'hélice n'étant jamais parfaitement aligné avec le vecteur instantané de vitesse de vent horizontal, un biais négatif sera nécessairement introduit. Le second biais,  $\delta_{mvt}$ , est causé par le mouvement du rotor dans l'espace. N'étant pas positionné sur l'axe de rotation de la girouette, la position du centre de l'hélice changera avec les variations de l'orientation du vent, ce déplacement engendrera alors un biais positif sur la réponse de l'appareil (Kristensen, 2005).

Pour terminer, il est à noter que, contrairement au biais de l'anémomètre à coupoles, aucune information n'a été trouvée quant à l'importance des différentes contributions les unes par rapport aux autres. Ce manquement peut être attribuable au fait que, comme signalé par Kristensen (2005), le biais de ce type d'instrument est plus difficilement estimable que pour son équivalent fonctionnant à coupoles, peu d'études sont donc disponibles sur le sujet.

### 1.3 Historique

Le but de l'historique ci-dessous n'est que de présenter les grandes lignes de la recherche effectuée sur les anémomètres à rotor au fil des années. Il est également à noter que cet historique ne porte presque qu'exclusivement sur l'anémomètre à coupoles car très peu de travaux ont été trouvés sur l'évolution des anémomètres à hélice, dans un contexte éolien.

L'utilisation du vent par l'homme remonte jusqu'au début de son histoire. Mais, afin d'en faire une utilisation plus éclairée, il est important d'en connaître diverses caractéristiques. Le célèbre inventeur Leonardo Da Vinci se pencha sur cette problématique vers la fin du XVe siècle dans le but d'améliorer la sécurité et l'efficacité de ses machines volantes. Il proposa, comme l'illustre la figure 6, un concept composé d'une girouette donnant la direction du vent ainsi que d'une plaque suspendue s'inclinant sous la force du vent afin d'en connaître la vitesse.



**Figure 1.3** *Anémomètre-girouette de Léonardo Da Vinci*

Source : Cette figure est tirée du site internet du « Museo Nazionale della Scienza e della Tecnologia Leonardo da Vinci ». (<http://www.museoscienza.org/>)

### 1.3.1 Anémomètres à coupoles

Le type d'anémomètre le plus couramment utilisé de nos jours est l'anémomètre à coupoles, il fut inventé en 1846 par l'astronome Irlandais John Thomas Romney Robinson (1792-1882). Celui-ci était composé d'un rotor à quatre coupoles, il est illustré à la figure 7. À cette époque, son inventeur croyait que, négligeant les forces de friction, une loi de la nature imposait que le centre des coupoles se déplaçait exactement au tiers de la vitesse du vent. Ce *facteur*, quoique réaliste, n'est aucunement une constante, mais il illustre bien l'excellente linéarité de l'étalonnage de cet instrument, malgré le fait qu'il en soit à ses premiers balbutiements.

L'utilisation de l'anémomètre à coupoles se répandant, il devenait de plus en plus important de bien en comprendre le fonctionnement. Brazier (1914) démontra par ses travaux que la linéarité de la calibration est améliorée par l'augmentation du diamètre du rotor.



**Figure 1.4 Anémomètre de Robinson**

Source : Cette figure est tirée de la librairie d'images du site internet du « National Oceanic and Atmospheric Administration ». (<http://www.photolib.noaa.gov/bigs/wea00934.jpg>)

Suite à cette étude, Patterson (1926) observa que la taille des coupoles influence également la linéarité du comportement de l'anémomètre. Ses travaux démontrèrent que la linéarité s'améliore si le rapport entre le rayon des coupoles et le rayon du rotor augmente. De plus, il démontra que le *facteur* présenté par Robinson n'était pas constant, il varie, généralement entre 2 et 3, d'un modèle d'anémomètre à l'autre et en fonction de la vitesse. Pour terminer, il affirma qu'un rotor à trois coupoles s'avère préférable à un rotor en comportant deux ou quatre, ceci s'explique par le fait que cette configuration engendre un couple plus uniforme et le rapport entre la masse du rotor et le couple fourni est plus élevé.

En ce qui concerne la forme des coupoles, celles ayant une forme conique sont préférables à celles de forme hémisphérique car elles tournent plus lentement (Marvin, 1934). Il est aussi à noter que, dans ce cas, la relation entre la vitesse des coupoles et celle du vent est plus linéaire (Sheppard, 1940).

Si l'on porte notre attention aux anémomètres à coupoles modernes, on remarque que, de façon générale, ils reflètent bien ces caractéristiques. Les observations précédentes portent surtout sur la linéarité de la calibration de l'anémomètre, ce fut la principale préoccupation des recherches effectuées jusqu'à la fin des années 20. Par la suite, la linéarité de l'instrument étant reconnue, les efforts de recherche se sont en grande partie tournés vers la dynamique de l'instrument, plus particulièrement le phénomène de surévaluation de la vitesse (Kristensen, 1994, 1999).

Selon Kaganov et Yaglom (1976), Sabinin (1923) fut le premier à tenter de quantifier le phénomène de surévaluation de la vitesse. Il calcula la réponse d'un anémomètre à coupoles face à de la turbulence simulée par un écoulement dont la vitesse variait de façon périodique. Il fallut par contre attendre quelques années de plus pour que se réalisent des travaux plus poussés sur le sujet. Selon Wyngaard (1981), la première tentative de modélisation du comportement dynamique du rotor vit le jour avec les recherches effectuées par Schrenk (1929). Il n'y eut pas d'avancées notables sur le sujet jusqu'au milieu des années 70. Des recherches similaires, se basant sur le modèle de Schrenk, furent exécutées par Busch et Kristensen (1976) et par Kaganov et Yaglom (1976). Les travaux de ces derniers restèrent relativement inconnus en occident de par la fermeture de l'U.R.S.S face à l'occident à l'époque, ce qui explique le fait que ces deux groupes aient effectué les mêmes travaux en parallèle. Il est à noter que les modèles résultant de ces travaux en sont venus à des conclusions similaires concernant la quantification de la réponse asymétrique du rotor en condition turbulente.

Suite à ces travaux, il y eut une certaine stagnation au sujet de la recherche sur la surévaluation de vitesse faite par l'anémomètre à coupoles. Il fallut attendre la fin des années 80 et la hausse des exigences de l'industrie éolienne concernant la caractérisation des ressources éoliennes pour qu'un nouvel élan relance les efforts de recherche. Les derniers avancements notables provinrent en grande partie des travaux de Kristensen et ses collaborateurs. Ces recherches ont permis de comprendre les différentes contributions à la survitesse. Le phénomène ayant ainsi été scindé, il fut donc plus aisé de travailler à sa quantification précise ou à sa réduction. De nombreux efforts furent mis à l'amélioration du design de l'anémomètre afin de réduire l'impact de cette problématique.

Il est finalement bon de noter que, certaines éoliennes étant implantées en milieux nordiques, il devint nécessaire de développer des instruments de mesure adaptés à ce type de conditions. Divers fabricants se sont donc mis depuis quelques années à proposer des anémomètres chauffants. De nombreuses améliorations sont par contre nécessaires afin d'égaliser la qualité et la précision de mesure des instruments traditionnels. Un projet de recherche est présentement en cours à l'Université Laval à ce sujet.



### 1.3.2 Anémomètres à hélice

L'anémomètre à hélice, inventé en 1842 par Benjamin Biram, fut breveté en 1845 par John Davis (voir figure 8), de la compagnie Derby, en Angleterre. Cet appareil fit son apparition dans les mines de charbon de l'époque afin de mesurer le flux d'air dans les puits de ventilation. Malgré le fait que ce ne soit pas un instrument dont l'invention est récente, très peu d'études sont disponibles sur son fonctionnement, en comparaison au modèle à coupoles.



**Figure 1.5** *Prototype d'anémomètre à hélice de John Davis*

Source : Cette figure est tirée du site internet « Mining Artifacts and History ». (<http://www.miningartifacts.org/>)

On l'utilisa pendant longtemps sans dispositif d'orientation, trois anémomètres étaient fixés orthogonalement afin de mesurer les trois composantes cartésiennes de vitesses. Encore aujourd'hui, on observe régulièrement des anémomètres à hélice fixés de manière à mesurer la vitesse verticale du vent. Les méthodes de lecture de la vitesse horizontale ont par contre été revues, il n'est maintenant plus recommandé d'utiliser deux anémomètres à hélice à angle droit (Hicks, 1972).

Il est reporté dans Hunter *et al.* (1999) qu'une refonte de cet instrument fit son apparition, dans les années 1940, sous le nom de "Aerovane". Un peu plus tard, dans les années 1960, on vit l'apparition d'anémomètres à hélice couplés à une girouette pour utilisation dans la mesure

de turbulence. Le modèle plus commun, permettant de mesurer la vitesse de vent horizontale (voir section 1.1.2), comporte une girouette de queue permettant d'orienter l'hélice face au vent. Afin de mesurer la vitesse de vent totale (voir section 1.1.2) sans utiliser le traditionnel agencement orthogonal, le concept de double girouette fit son entrée. Un degré de mouvement supplémentaire étant ajouté permettant le tangage de l'instrument.

Les quelques études trouvées portent majoritairement sur le comportement d'anémomètres à hélice, sans dispositif d'orientation, face à un écoulement turbulent (Bowen et Teunissen, 1986; Fichtl et Kumar, 1974; Hicks, 1972; Horst, 1973). Celles-ci ont pour objectif de caractériser la réponse angulaire et dynamique de l'hélice. À ces études, s'ajoutent les travaux de Desjardins *et al.* (1986), portant sur la conception et la caractérisation de la réponse d'un anémomètre à double hélices couplées à une girouette, et Verkaik (1998, 2006), portant sur l'utilisation de ce type d'appareil pour la mesure de turbulence. La figure 9 illustre ce type d'instrument.



**Figure 1.6** Anémomètre K-Gill de R.M. Young (Verkaik, 2006)

Source : Cette figure est tirée de Verkaik, 2006 « On Wind and Roughness over Land » et correspond à la « Figure 2.1 : Picture of the K-Gill Propeller Vane. » présentée en page 6 dans le document original.

Pour l'instant, ce type d'anémomètre n'est que très rarement utilisé dans le milieu de l'énergie éolienne. On le retrouve plus couramment pour la mesure météorologique de routine, sur les bateaux et le bord des routes par exemple. Son utilisation pour la quantification de ressource éolienne est très peu étendue. Les exigences et les recommandations à ce sujet sont donc majoritairement axées sur les anémomètres à coupoles.

## 1.4 Exigences en lien avec la procédure de calibration

Le contenu de cette section reflète les exigences quant à la procédure de calibration d'anémomètre à coupoles. La référence principale à ce sujet est le document sur les procédures de calibration du MEASNET (1997). Cet organisme consiste en un réseau d'instituts de mesure européens ayant pour but d'uniformiser les procédures de mesure reliées à l'énergie éolienne. Des procédures similaires à celles présentées dans ce document sont également proposées dans d'autres documents. Notamment, la norme 61400-12-1 de la IEC (2005) et le onzième volume d'une étude d'experts commandée par l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA) portant sur les pratiques reliées au test et à l'évaluation d'éoliennes (Hunter *et al.*, 1999).

### 1.4.1 Exigences générales

Une campagne d'étalonnage, pour être certifiée conforme, doit répondre à certaines exigences générales :

- Tous les capteurs et les appareils servant à la mesure doivent disposer de certifications attestant de leur calibration ainsi que de toute documentation les caractérisant ;
- Les tubes de pitot utilisés doivent répondre à la norme ISO 3966, portant sur la mesure de débit de fluides dans les conduites fermées à l'aide de ce type d'appareil ;<sup>3</sup>
- Une calibration à l'aide d'un anémomètre-référence doit être effectuée avant toute calibration ;
- La qualité de l'écoulement de l'installation servant à l'étalonnage doit être vérifiée ;
- La répétabilité de la calibration doit être vérifiée ;
- Une quantification de l'incertitude de l'étalonnage doit être faite (consulter la section 2.4 pour plus de détails à ce sujet).

### 1.4.2 Exigences liées à la soufflerie

En plus des exigences générales présentées ci-dessus, quelques-unes s'ajoutent afin d'assurer certains standards de la soufflerie.

<sup>3</sup>Selon le site de l'organisation internationale de normalisation, cette norme est suspendue depuis 2003 pour fin de révision. Compte tenu des coûts reliés à l'obtention de ce document et de l'impact plutôt indirect de son contenu sur l'analyse et la cueillette de données de vent, je n'ai pas jugé essentiel d'en faire l'acquisition. Le lecteur intéressé est par contre invité à la consulter pour obtenir de plus amples informations sur le sujet.



Premièrement, un ratio de blocage maximum est imposé afin de s'assurer que la présence de l'anémomètre n'affecte pas, de façon substantielle, l'écoulement dans la soufflerie. Cette valeur, représentant le rapport entre l'aire projetée de l'anémomètre et l'aire de la section d'essai de la soufflerie, ne doit pas dépasser 0.1, pour une section fermée, et 0.05, pour une section ouverte.

Deuxièmement, l'uniformité de l'écoulement dans la zone couverte par l'anémomètre doit être vérifiée dans les directions longitudinale, verticale et transversale. La non-uniformité doit être inférieure ou égale à 0.2% et doit être vérifiée une seule fois et suite à toute modification de la soufflerie.

Troisièmement, il est nécessaire de vérifier le gradient horizontal de vitesse, les anémomètres à coupoles y étant très sensibles. Pour ce faire, il est recommandé d'utiliser deux tubes de pitot identiques. La différence entre la mesure des deux instruments doit être inférieure à 0.2% et cette opération doit être répétée à chaque campagne de calibration.

Quatrièmement, un niveau maximal d'intensité de turbulence est également exigé. Celle-ci doit présenter, à la position de l'anémomètre, une valeur inférieure à 2%.

Cinquièmement, la mesure de référence de vitesse n'étant pas prise au même endroit que celle de l'anémomètre à calibrer, la correspondance entre les deux positions doit être faite. À l'aide de deux tubes de pitot, on détermine ce que l'on appelle le facteur de calibration, donnant la vitesse réelle à la position de l'anémomètre en fonction de la vitesse lue au pitot.

Sixièmement, la répétabilité des étalonnages doit être confirmée par au moins cinq étalonnages de l'anémomètre de référence, sous différentes conditions atmosphériques. L'objectif est d'obtenir une différence entre les calibrations d'au maximum 0.5% à 10m/s. De plus, l'étalonnage moyen résultant ne doit pas dévier de plus de 1% de l'étalonnage d'un même anémomètre dans une autre installation. Cette vérification doit être faite à nouveau à chaque modification de la soufflerie.

Pour terminer, si plusieurs opérateurs procèdent à la calibration d'instruments, on doit s'assurer que leurs qualifications sont similaires afin d'éviter d'introduire un biais significatif.

### 1.4.3 Exigences liées à l'instrumentation et au montage

Les procédures de calibration exigent également que l'instrumentation utilisée ainsi que le montage d'étalonnage remplissent certains critères :

- Tout système externe de prétraitement des signaux doit être calibré indépendamment de l'anémomètre ;
- La résolution du système d'acquisition de données doit être d'au minimum 0.02m/s ;
- Dans la soufflerie, l'anémomètre doit être monté sur un tube de même dimension que celui qui sera utilisé lorsqu'il sera en service ;
- Les instruments installés dans la soufflerie ne doivent pas affecter l'écoulement au niveau de l'anémomètre ;
- Le défaut de parallélisme entre le tube de pitot de référence et l'écoulement doit être inférieur à 1° ;
- Le défaut de parallélisme entre le rotor de l'anémomètre et l'écoulement doit être inférieur à 1° ;
- Lors de la procédure de calibration, le signal généré par l'anémomètre doit être vérifié afin de s'assurer qu'il n'est sujet à aucune interférence.

### 1.5 Exigences en lien avec les anémomètres

Cette section présente un condensé des recommandations et exigences en lien avec l'utilisation d'anémomètres à coupoles dans le domaine éolien.

Les caractéristiques présentées à cette section sont des recommandations qui proviennent d'un document présenté à l'Agence Danoise de l'Énergie par Bjerregaard et Pedersen (2002) et du onzième volume de "Recommended practices for wind turbine testing and evaluation" (Hunter *et al.*, 1999). Celles-ci portent, en grande partie, sur l'utilisation d'anémomètres à coupoles pour la mesure de courbes de puissance d'éoliennes. Toutefois, la transposition de ces exigences à un appareil utilisé dans la caractérisation de ressource éolienne n'est probablement pas problématique, la rigueur et la précision exigées dans ces types de campagne de mesure étant de niveaux similaires. La liste ci-dessous présente ces recommandations :

1. Les anémomètres utilisés doivent être conçus pour répondre à la vitesse de vent horizontale. Ceci implique que la réponse de l'instrument face à l'inclinaison de l'écoulement sera de forme cosinusoidale.

2. Pour un angle d'inclinaison variant de  $-10^\circ$  à  $10^\circ$  et une vitesse de vent entre 5 m/s et 14 m/s, la différence entre la réponse de l'appareil et la réponse de type cosinus doit se situer entre -3% et 2%, comme l'illustre la figure 10.
3. La constante de distance ( $l_0$ ) de l'appareil doit être inférieure à 3m.
4. Le niveau maximal de survitesse doit se situer entre -0.5% et 3%, pour une intensité de turbulence de 15% présentant une variation de vitesse longitudinale de forme sinusoïdale et une fréquence maximale de 2Hz.
5. Le couple de friction ( $M_{friction}$ ) du rotor, pour une plage de température variant de  $-5^\circ\text{C}$  à  $40^\circ\text{C}$  et une vitesse se situant entre 4m/s et 16m/s, doit répondre à la relation suivante :

$$M_{friction} \leq K_f R A (K_a \omega)^{2/3} \quad (1.21)$$

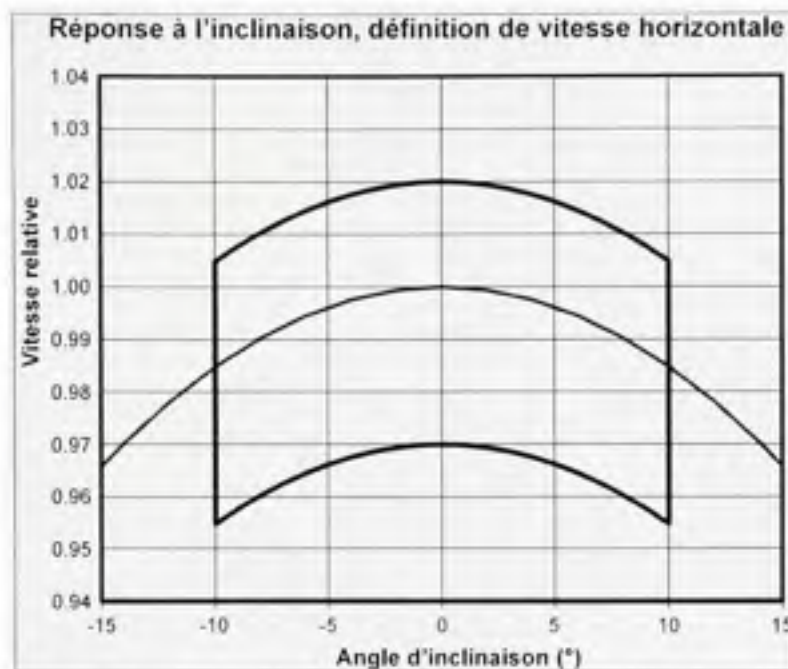
où R représente le rayon du rotor [m], A est l'aire projetée d'une coupole [ $\text{m}^2$ ],  $\omega$  est la vitesse de rotation [rad/s],  $K_a$  est une constante égale à 1 s/rad et  $K_f$  est un facteur de proportionnalité égal à  $0.03\text{N/m}^2$ .

6. Le couple du rotor doit être positif et stable pour toute direction de vent.
7. La calibration de l'appareil doit être indépendante de la direction du vent.
8. Le coefficient de corrélation linéaire doit être supérieur ou égal à 0.99995 (section 2.3).
9. L'anémomètre doit porter le sceau CE, assurant un gage de qualité répondant aux normes du marché européen.
10. La comparaison sur le terrain avec un second anémomètre répondant aux recommandations 1-9 ne doit pas différer de plus de 1%.

Les caractéristiques dynamiques présentées dans les recommandations ci-dessus doivent être déterminées expérimentalement pour chaque modèle d'anémomètre. Il est donc important de dresser des lignes de conduite afin de caractériser le comportement dynamique et de s'assurer de la validité de la mesure d'un anémomètre à coupoles donné.

### 1.5.1 Procédures de tests de caractérisation d'anémomètres

Les informations qui suivent portent sur les exigences concernant les tests de caractérisation de la dynamique d'un anémomètre à coupoles. Elles proviennent de la norme IEC 61400-12-1 (IEC, 2005) et des recommandations de Hunter *et al.* (1999).



**Figure 1.7** *Recommandation concernant la réponse angulaire (adaptation de Bjerregaard et Pedersen, 2002)*

Source : Cette figure est adaptée de Bjerregaard et Pedersen, 2002 « Requirements to Cup Anemometers Applied for Power Curve Measurements Under the Danish Approval Scheme for Wind Turbines » et correspond à la « Fig. 1 Requirement bands for wind inclination characteristics » présentée en page 3 dans le document original.

### Mesure de la réponse angulaire

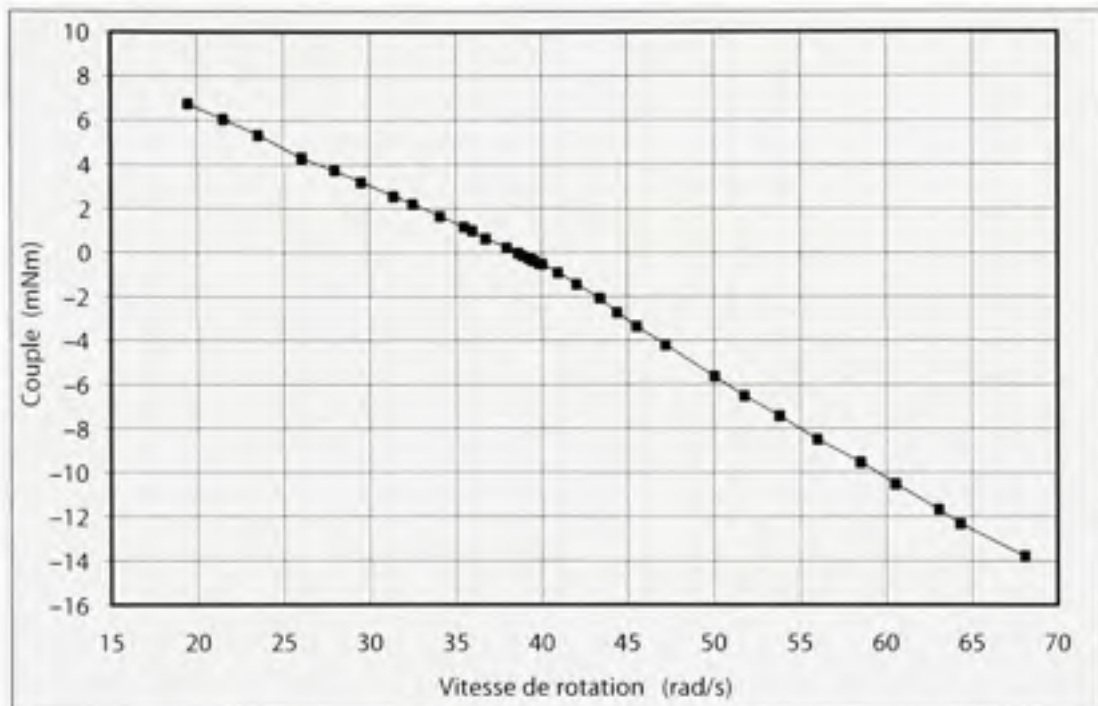
La caractérisation de la réponse angulaire d'un anémomètre à coupoles doit se faire, en soufflerie, pour trois vitesses différentes. Il est recommandé d'utiliser des vitesses de 5, 8 et 12m/s afin de bien représenter la plage d'étalonnage variant de 4m/s à 16m/s. La plage d'inclinaison doit couvrir, avec une résolution de 2°, un angle variant de -30° à 30°. Cette procédure est généralement réalisée par le montage de l'instrument sur un mât inclinable.

### Mesure du couple dynamique

Cette procédure permet de caractériser l'accélération et la décélération du rotor.

Pour ce faire, l'instrument doit être monté en soufflerie avec un mince arbre fixé sur le dessus du rotor. L'utilité de cet arbre est d'augmenter ou freiner la vitesse de rotation de l'anémomètre, par rapport à la vitesse normalement présente à une certaine vitesse d'écoulement.

Le couple sur l'arbre est mesuré pour différentes vitesses de rotation et à différentes vitesses d'écoulement afin d'obtenir des courbes similaires à celle présentée à la figure 11. Il est recommandé d'effectuer des mesures à plus haute résolution et de meilleure précision au voisinage de la vitesse d'équilibre.



**Figure 1.8** *Mesure en soufflerie du couple dynamique à 8 m/s (adaptation de la norme IEC 61400-12-1, 2005)*

Source : Cette figure est adaptée de la norme IEC 61400-12-1, 2005 « Wind Turbines - Part 12-1 : Power Performance Measurements of Electricity Producing Wind Turbines » et correspond à la « Figure J.2 – Wind tunnel torque measurements on a cup anemometer at 8 m/s » présentée en page 81 dans le document original.

### Mesure du couple de friction des roulements

La mesure du couple induit par la friction dans les roulements doit se faire en remplaçant le rotor par une roue d'inertie de masse et d'inertie similaire. Le disque doit être porté à une vitesse de rotation correspondant à une lecture d'environ 20m/s et relâché. La décélération obtenue permettra de connaître le couple de friction en utilisant l'équation suivante :

$$\tau_{\text{mech}}(\omega) = I \alpha + f_{\text{aero}} \omega^{3/2} \quad (1.22)$$



Dans cette équation,  $I$  représente l'inertie du disque,  $\omega$  représente la vitesse angulaire du disque et  $\alpha$  représente la décélération observée. La force aérodynamique  $f_{aero}$  peut-être approximée par l'équation suivante :

$$f_{aero} = -0.616 \pi \rho r^4 \nu^{1/2} \quad (1.23)$$

Dans cette équation,  $r$  représente le rayon du disque,  $\nu$  représente la viscosité cinématique de l'air et  $\rho$  sa densité.

Cette opération est généralement répétée à différentes températures afin de quantifier son effet sur la friction dans les roulements.

### Mesure de la constante de distance

La constante de distance de l'instrument permet de quantifier la rapidité de réponse de l'instrument face au changement de vitesse de vent.

La procédure à utiliser consiste à maintenir le rotor à l'arrêt dans une soufflerie dont la vitesse d'écoulement, stabilisée, est d'environ 8m/s. Il est ensuite relâché et l'évolution de sa vitesse de rotation est mesurée. Il est recommandé d'échantillonner le signal à un taux d'au moins 30Hz et de répéter l'opération un minimum de 5 fois.

Le signal recueilli,  $U_{mes}(t)$ , doit ensuite être mis en correspondance avec l'équation 1.24 afin de déterminer la valeur du paramètre  $\tau$  fournissant la meilleure représentation du signal mesuré.

$$\ln \left( 1 - \frac{U_{mes}(t) - U_0}{\Delta U} \right) = -\frac{1}{\tau} + \frac{t_0}{\tau} \quad (1.24)$$

Dans cette équation,  $U_0$  représente la vitesse initiale du rotor (elle est généralement nulle, mais un décalage peut être présent dans le signal),  $\Delta U$  représente l'échelon de vitesse et  $t_0$  représente le temps auquel le rotor a été relâché. Le paramètre  $\tau$ , duquel on dérive la constante de distance, représente la constante de temps de l'anémomètre, elle est reliée à  $l_0$  par l'équation suivante :

$$l_0 = \tau U \quad (1.25)$$

La vitesse  $U$  est la vitesse cible ( $U_0 + \Delta U$ ), généralement la vitesse de la soufflerie lors du test. La procédure de traitement doit être effectuée pour chaque essai, la constante de distance correspondant à la moyenne des résultats de chacun.

## 1.6 Exigences concernant la mesure extérieure

Cette section présente les exigences rattachées à la mesure de vent en conditions atmosphériques réelles. Les caractéristiques liées au terrain, au mât de mesure et au traitement des données sont exposées.

### 1.6.1 Exigences en lien avec le choix du terrain

Les exigences présentées ci-dessous, tirées de la norme IEC 61400-12-1 (2005), ont été énoncées pour une prise de données dans le cadre d'un calcul de courbe de puissance d'éolienne. Elles peuvent toutefois être généralisées à la quantification de ressource éolienne. La problématique est divisée en trois thèmes : la topographie du terrain environnant, la présence d'obstacles et la présence d'éoliennes à proximité du mât.

#### Topographie du terrain

Excluant les obstacles, la topographie même du terrain peut devenir une influence considérable sur la mesure de vent. La mesure précise de vent en terrain complexe peut rapidement devenir irréalisable. Des exigences sont donc énoncées concernant la pente et la variation d'élévation dans la zone entourant le mât de mesure.

Dans le cadre d'un calcul de courbe de puissance, la norme IEC 61400-12-1 (2005) prescrit les exigences suivantes au sujet de la zone entourant le mât et l'éolienne. Pour qu'une calibration de site ne soit pas nécessaire, la zone environnante doit répondre aux conditions du tableau 1.1.

Il est également possible, si la pente maximale ne dépasse pas de plus de 50% les valeurs indiquées au tableau 1.1, d'éviter d'effectuer une calibration de site. Pour ce faire, un modèle informatique, adapté à la topographie considérée, est utilisé afin de représenter l'écoulement sur le site à l'étude. Le processus de calibration de site peut être négligé si la différence de vitesse entre la position de l'anémomètre et celle de la nacelle est inférieure à 1%, à 10 m/s, et ce, pour tous les secteurs de mesure.



Si toutefois la calibration de site s'avère nécessaire, il faut installer une seconde tour de mesure à la position de l'éolienne. Cette opération doit donc préférablement se faire avant l'érection de l'éolienne. Le résultat de cette étude permettra de déterminer les facteurs de correction de vent pour toutes les directions. Ceux-ci permettront de relier la vitesse lue au mât de mesure à la vitesse réelle à la position de l'éolienne. Les détails de cette procédure sont présentés à l'annexe C de la norme IEC 61400-12-1 (2005)

Dans ce tableau,  $L_n$  représente la distance entre le mât et l'éolienne,  $D_n$  représente le diamètre du rotor de l'éolienne et  $H$  représente la hauteur du moyeu du rotor.

Tableau 1.1  
Exigences topographiques d'un site de mesure de courbe  
de puissance d'une éolienne

Distance	Secteur	Pente maximale (%)	Changement maximal d'élévation
$< 2L_n$	360°	$< 3\%$	$< 0.04(H + D_n)$
$\geq 2L_n$ et $< 4L_n$	Secteur de mesure	$< 5\%$	$< 0.08(H + D_n)$
	Hors du secteur de mesure	$< 10\%$	N/A
$\geq 4L_n$ et $< 8L_n$	Secteur de mesure	$< 10\%$	$< 0.13(H + D_n)$

### Présence d'obstacles

La présence d'obstacles de taille significative à proximité de la tour de mesure doit être évitée. Un modèle permettant de quantifier l'influence de l'obstacle sur la mesure est présenté ci-dessous.

$$\frac{\Delta U_z}{U_h} = -9.75 (1 - P_0) \frac{h}{x} \eta \exp(-0.67 \eta^{1.5}) \quad (1.26)$$

$$\eta = \frac{z}{h} \left( K \frac{x}{h} \right)^{-\frac{1}{\alpha+2}} \quad (1.27)$$

$$K = \frac{2 \kappa^2}{\ln(h/z_0)} \quad (1.28)$$

Dans ces équations,

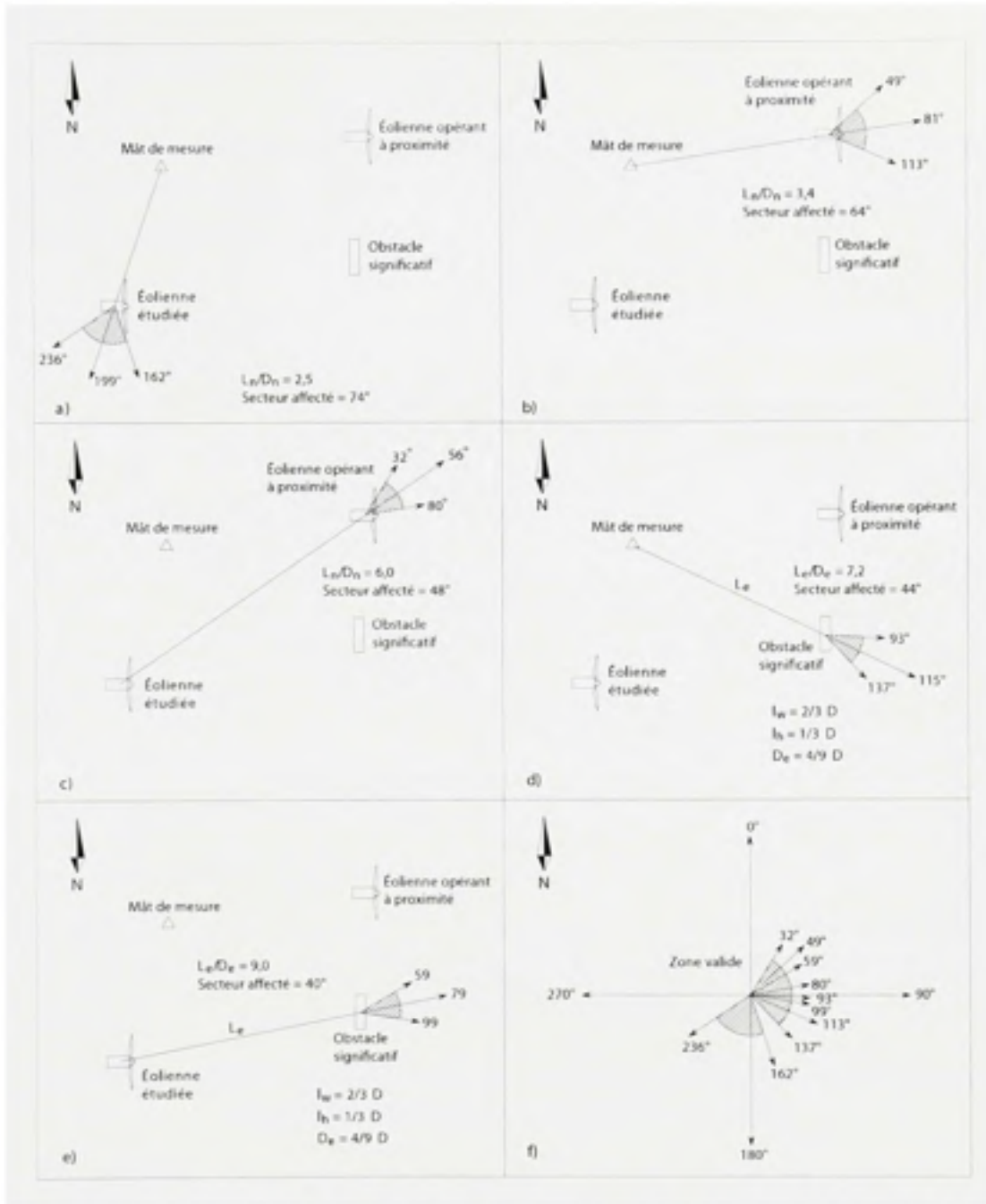
- $x$  est la distance entre le mât et l'obstacle [m];
- $h$  est la hauteur de l'obstacle [m];
- $U_h$  est la vitesse de vent à la hauteur  $h$  [m/s];
- $n$  est l'exposant du profil de vitesse (0.14);
- $P_0$  est la porosité de l'obstacle (0 : solide, 1 : pas d'obstacle);
- $z$  est la hauteur de mesure [m];
- $z_0$  est la longueur de rugosité du sol [m];
- $\kappa$  est la constante de von Karman (0.41).

L'obstacle considéré pose une influence insignifiante si celle-ci est inférieure à 1 %. Si une influence plus grande est calculée, un secteur doit être éliminé en fonction de la distance de l'obstacle ( $L_e$ ). Ce secteur est déterminé selon une méthode similaire à celle pour la présence d'une éolienne. On débute par calculer un diamètre de rotor équivalent  $D_e$ , en fonction de la hauteur ( $h$ ) et de la largeur ( $l_w$ ) de l'obstacle.

$$D_e = \frac{2hl_w}{h+l_w} \quad (1.29)$$

La taille du secteur est déterminée, comme pour l'influence d'une éolienne, à l'aide de la courbe de la figure 13.

Un exemple illustrant la détermination de secteurs à exclure en fonction des obstacles présents est présenté à la figure 12. Il s'agit d'un exemple pour un cas de mesure de courbe de puissance d'une éolienne tiré de la norme IEC 61400-12-1 (2005).

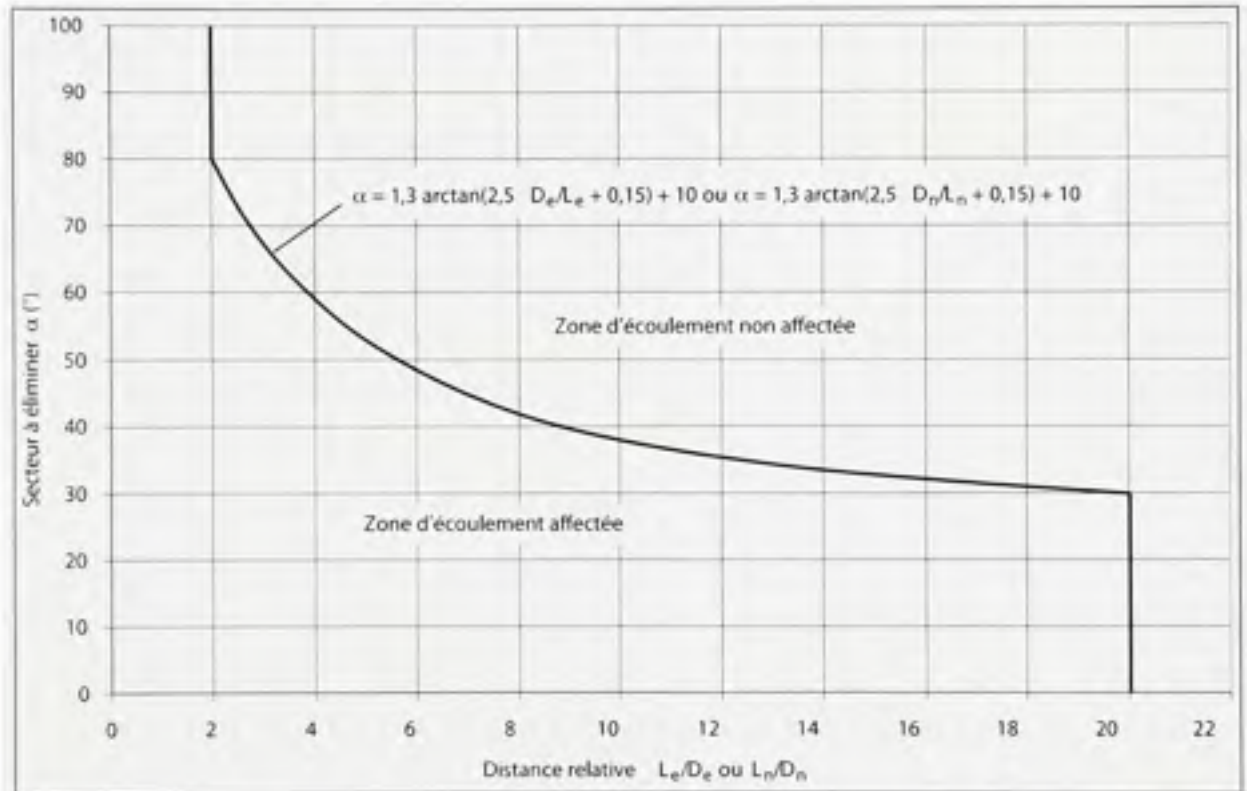


**Figure 1.9 Exemple de calcul de secteur de mesure pour un calcul de courbe de puissance (adaptation de la norme IEC 61400-12-1, 2005)**

Source : Cette figure est adaptée de la norme IEC 61400-12-1, 2005 « Wind Turbines - Part 12-1 : Power Performance Measurements of Electricity Producing Wind Turbines » et correspond à la « Figure A.2 – An example of sectors to exclude due to wakes of the wind turbine under test, a neighbouring and operating wind turbine and a significant obstacle » présentée en page 35 dans le document original.

## Présence d'éoliennes

Le mât de mesure doit être situé à une distance  $L_n$  minimale de deux diamètres de rotor  $D_n$  d'une éolienne. La taille du secteur de vent à éliminer due à la présence d'une éolienne est donnée par la courbe présentée à la figure 13.



**Figure 1.10** Taille de secteur de mesure à éliminer pour la présence d'éolienne (adaptation de la norme IEC 61400-12-1, 2005)

Source : Cette figure est adaptée de la norme IEC 61400-12-1, 2005 « Wind Turbines - Part 12-1 : Power Performance Measurements of Electricity Producing Wind Turbines » et correspond à la « Figure A.1 – Sectors to exclude due to wakes of neighbouring and operating wind turbines and significant obstacles » présentée en page 34 dans le document original.

### 1.6.2 Exigences en lien avec le mât de mesure

La mesure de vent pouvant être grandement affectée par la proximité d'autres instruments ou de la tour, il est important de s'assurer d'un montage adéquat, minimisant l'erreur induite. Selon le document de Hunter *et al.* (1999), une influence induite par le montage de l'instrument

inférieure à 0.5 % est un objectif acceptable. L'influence induite par le mât devrait, quant à elle, être inférieure à 1 % (norme IEC, 2005).

Le montage idéal étant d'installer l'anémomètre sur une tige au dessus de la tour, il n'est toutefois pas toujours possible d'adopter cette configuration. Dans ce cas, le montage peut être réalisé par l'installation d'instruments, à différents niveaux, sur des perches horizontales fixées à la tour. Ce faisant, il faut également considérer le type de tour utilisé car elles ont différentes influences sur la mesure.

### **Exigences de montage des instruments**

Le montage de l'anémomètre principal au sommet de la tour est la méthode à privilégier, l'influence de l'installation étant minimisée. Les exigences d'un tel type d'installation sont listées ci-dessous :

1. L'instrument doit être monté sur un tube vertical de même diamètre que celui utilisé pour la calibration ;
2. Le tube de montage doit être d'une longueur minimale de 0.75m ;
3. La déviation du tube de montage par rapport à la verticale doit être inférieure à 2° ;
4. La distance verticale entre l'anémomètre et l'instrument le plus proche doit être supérieure à 1.5m ;
5. Aucune partie du mât de mesure, excluant les autres instruments, ne doit se prolonger à l'extérieur d'un cône de rapport 1 : 5, partant du rotor de l'anémomètre.

Lorsqu'il s'avère impossible d'effectuer un tel type de montage, diverses configurations de mât se présentent.

Dans le cas où il est nécessaire d'obtenir des données d'un second anémomètre, la solution idéale est d'installer une perche horizontale, de longueur variant entre 1.5m et 2.5m, centrée au sommet de la tour. Les deux anémomètres seront montés, aux extrémités de celle-ci, sur des tubes verticaux de longueur variant entre 15 et 25 fois le diamètre de la perche. Les exigences 1 à 4, présentées pour le montage d'un anémomètre unique, s'appliquent également à ce type d'installation. Il faut également, afin d'éviter l'influence du sillage d'un anémomètre sur la mesure du second, s'assurer de rejeter les mesures d'un secteur de vent correspondant à un écoulement parallèle à la perche horizontale.

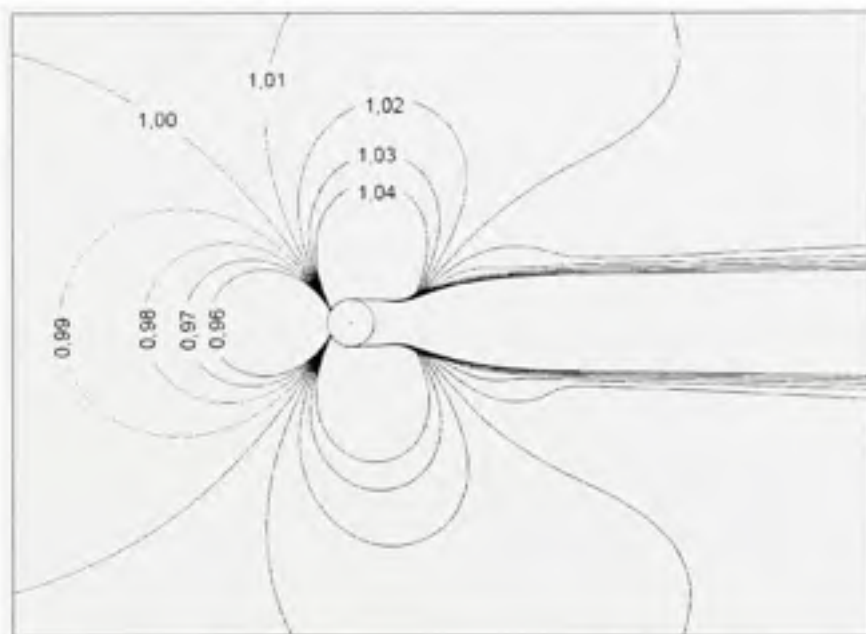


## Types de tour

Deux types de tour sont généralement observés dans les campagnes de mesure de vent. Les tours de type tubulaire et celles de type treillis.

Les tours de type tubulaire sont généralement constituées d'un assemblage de tubes, emboîtés les uns dans les autres, maintenus par des haubans. Une attention doit d'ailleurs être portée à ces câbles afin de minimiser l'influence qu'ils peuvent avoir sur la mesure.

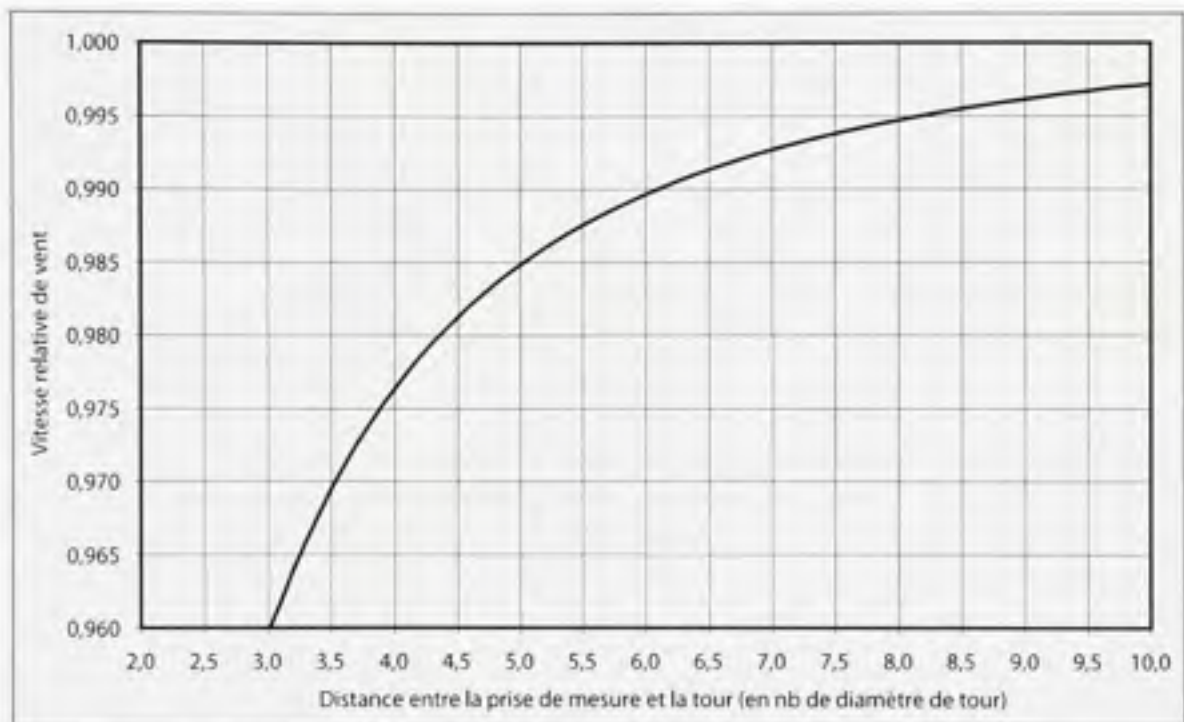
La figure 14 représente les iso-lignes de vitesse relative à proximité de la tour. De façon générale, on observe un déficit de vitesse en amont de la tour et une accélération de l'écoulement sur les côtés. On y remarque que, pour une influence minimale du mât, l'anémomètre devrait être monté à un angle d'environ  $45^\circ$  par rapport à l'orientation dominante du vent.



**Figure 1.11** *Vitesse relative à proximité d'une tour tubulaire (adaptation de la norme IEC 61400-12-1, 2005)*

Source : Cette figure est adaptée de la norme IEC 61400-12-1, 2005 « Wind Turbines - Part 12-1 : Power Performance Measurements of Electricity Producing Wind Turbines » et correspond à la « Figure G.5 – Iso-speed plot of local flow speed around a cylindrical mast, normalised by free-field wind speed (from the left); analysis by 2 dimensional Navier-Stokes computations » présentée en page 71 dans le document original.

La figure 15 présente la vitesse relative en fonction de la distance entre la prise de lecture et le mât. Il est à noter que la variation peut être supérieure si le vent souffle à un angle de plus de  $45^\circ$  par rapport à la perche horizontale.



**Figure 1.12** *Vitesse relative en fonction de la distance par rapport à la tour tubulaire (adaptation de la norme IEC 61400-12-1, 2005)*

Source : Cette figure est adaptée de la norme IEC 61400-12-1, 2005 « Wind Turbines - Part 12-1 : Power Performance Measurements of Electricity Producing Wind Turbines » et correspond à la « Figure G.6 – Centre-line relative wind speed as a function of distance R from the centre of a tubular mast and mast diameter d » présentée en page 71 dans le document original.

Pour ce qui est de la détermination de l'écoulement autour d'une tour en treillis, la tâche s'avère un peu plus laborieuse, l'écoulement étant affecté par la solidité de la structure. La modélisation de l'écoulement aux abords de la tour se base sur un coefficient de poussée ( $C_T$ ). On le détermine à l'aide des informations présentées au tableau 1.2, ces renseignements sont tirés de la norme IEC (2005).

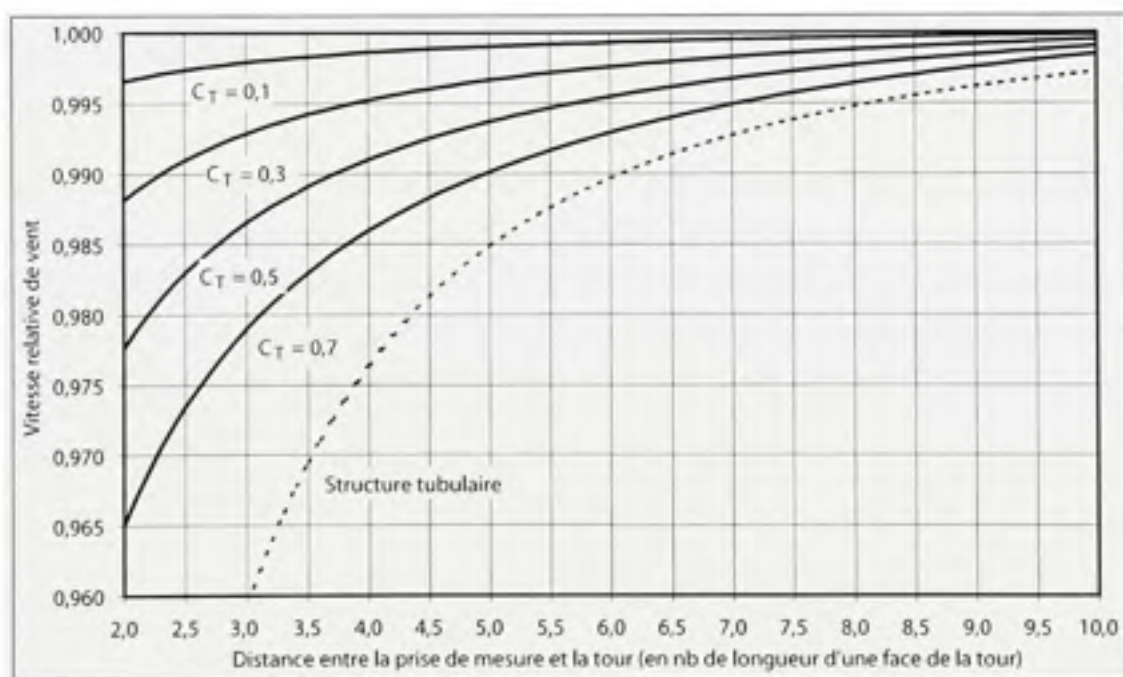
La figure 16 présente des informations similaires à la figure 15 mais pour une structure de treillis présentant différents coefficients de poussée.



Tableau 1.2

Méthodes d'estimation du coefficient  $C_T$ 

Type de tour	Estimation de $C_T$	Plage de solidité valide
Section carrée, treillis avec arrêtes vives	$4.4(1-s)s$	$0.1 < s < 0.5$
Section carrée, treillis tubulaires	$2.6(1-s)s$	$0.1 < s < 0.3$
Section triangulaire, treillis tubulaires	$2.1(1-s)s$	$0.1 < s < 0.3$



**Figure 1.13** Vitesse relative en fonction de la distance par rapport à la tour de treillis (adaptation de la norme IEC 61400-12-1, 2005)

Source : Cette figure est adaptée de la norme IEC 61400-12-1, 2005 « Wind Turbines - Part 12-1 : Power Performance Measurements of Electricity Producing Wind Turbines » et correspond à la « Figure G.9 – Centre-line relative wind speed as a function of distance R from the centre of a triangular lattice mast of face width L for various  $C_T$  values » présentée en page 74 dans le document original.

### 1.6.3 Exigences liées à la base de données recueillie

Les renseignements présentés ici ne concernent que la mesure de vent, vitesse et orientation. Pour des informations sur la mesure d'autres paramètres, dans un contexte relié à l'énergie éolienne, il est possible de consulter le "Wind Resource Assessment Handbook" (AWS Scientific Inc., 1997).

Tout d'abord, la mesure doit être effectuée à un taux minimum de 1Hz et enregistrée sous forme de données continues ou par des données statistiques sur des périodes de 10 minutes. Dans le second cas, les renseignements sauvegardés devront inclure la valeur moyenne, l'écart-type et les valeurs maximale et minimale observées durant la période.

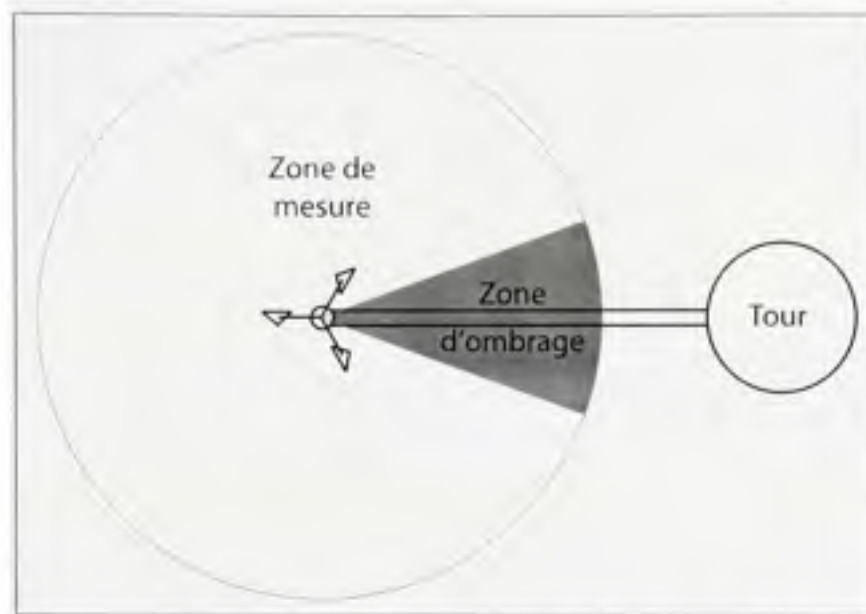
Ensuite, un contrôle de qualité devra être effectué afin de rejeter toutes valeurs erronées ou recueillies lors d'un fonctionnement anormal de l'instrument (bris, présence de glace, etc.). Le document de AWS Scientific Inc. (1997) propose les critères de rejet présentés à la table 1.3.

En plus de ces critères de rejet, l'influence de la tour de mesure doit également être prise en considération. Les données temporelles pour lesquelles l'orientation du vent positionne l'anémomètre dans l'ombre de la tour doivent être éliminées des calculs. La taille du secteur de vent à éliminer n'est pas une valeur fixe, elle dépend du type de tour et de la distance entre l'anémomètre et celle-ci. De façon générale, un secteur couvrant  $12^\circ$  de part et d'autre de l'instrument est suffisant.

Tableau 1.3

Critères de rejet de données de vent

<b>Vitesse de vent (<math>U_{horizontal}</math>)</b>	
Moyenne ( $\bar{U}$ )	décalage $< \bar{U} < 25 \text{ m/s}$
Écart-type ( $\sigma_U$ )	$0 < \sigma_U < 3 \text{ m/s}$
Rafale maximale	décalage $< U_{max} < 30 \text{ m/s}$
<b>Orientation de vent (<math>\theta</math>)</b>	
Moyenne ( $\bar{\theta}$ )	$0^\circ < \bar{\theta} \leq 360^\circ$
Écart-type ( $\sigma_\theta$ )	$3^\circ < \sigma_\theta < 75^\circ$
Rafale maximale	$0^\circ < \hat{\theta} \leq 360^\circ$



**Figure 1.14** *Zone d'ombrage créée par la tour de mesure*

Si une plage plus adaptée au cas présent est nécessaire, les données doivent être représentées sous la forme d'un graphique circulaire dans lequel la différence de mesure entre deux anémomètres, similaire et positionnés de part et d'autre de la tour, est représentée en fonction de l'orientation du vent. Les sections où la différence de lecture entre les deux instruments est non nulle, de façon notable, sont celles devant être éliminées.

Après le contrôle des données, celles-ci doivent être représentées sous forme d'histogramme. Chaque classe doit couvrir une plage de 0.5m/s et être centrée sur un multiple de 0.5m/s. Chacun de ceux-ci doit contenir un minimum de 30 minutes de données et la base de données entière doit couvrir une période minimale de 180 heures.

### **1.7 Classification des anémomètres**

La classification des anémomètres à coupoles est une activité permettant de comparer les performances d'un instrument par rapport à un autre, selon des conditions d'opération déterminées, en ayant pour objectif de choisir celui convenant le mieux à nos besoins.

La norme IEC 61400-12-1 (IEC, 2005) présente un barème de classification qui a été utilisé pour la classification d'un choix d'instrument par les projets CLASSCUP (Pedersen, 2003) et ACCUWIND (Dahlberg *et al.*, 2006; Eecen *et al.*, 2006; Pedersen *et al.*, 2006).

La classification suggérée procède en trois temps. Il faut tout d'abord modéliser le comportement de l'anémomètre considéré. Ensuite, on détermine la classe correspondant aux conditions d'opération observées sur le site convoité. Pour terminer, un numéro de classe est attribué à l'anémomètre, en fonction de son niveau d'erreur de mesure.

### **1.7.1 Modélisation de l'anémomètre**

Les procédures de caractérisation dynamique de l'anémomètre, présentées à la section 1.5.1, ayant permis de déterminer les paramètres fondamentaux de l'anémomètre, il est maintenant possible de modéliser le comportement de l'instrument.

Lorsque le modèle de l'instrument est complété et validé, il suffit de le soumettre à un écoulement 3D généré par ordinateur. Les paramètres servant à générer l'écoulement sont choisis afin de représenter certains types de site. Des classes ont donc été déterminées afin de représenter les caractéristiques à utiliser selon le site présent.

### **1.7.2 Classes de sites de mesure**

Deux classes principales sont utilisées pour classer les anémomètres à coupoles, les classes A et B. Une classe spéciale S est également introduite afin de considérer des conditions d'opérations particulières choisies. Cette classe ne reflétant pas des conditions spécifiques, elle n'est pas traitée par les projets de classification considérés.

Le tableau 1.4 résume les plages d'opérations propres aux classes A et B pour les différents paramètres caractérisant un site de mesure.

#### **Vitesses de vent**

La plage de vitesse de vent est basée sur des vitesses moyennées sur 10 minutes. Pour l'application considérée ici, la production d'énergie éolienne, les vitesses inférieures à 4 m/s fournissent une puissance insignifiante. En ce qui concerne les vitesses supérieures à 16 m/s, la plupart des éoliennes modernes ayant une puissance régulée, l'énergie produite devient généralement indépendante de la vitesse du vent au dessus de cette limite.

Tableau 1.4  
Conditions d'opération des classes A et B

Paramètres	Classe A		Classe B	
	Min	Max	Min	Max
Vitesse de vent [m/s]	4	16	4	16
Intensité de turbulence	0.03	$0.12+(0.48/U)$	0.03	$0.12+(0.96/U)$
Structure de turbulence $\sigma_u/\sigma_v/\sigma_w$	1/0.8/0.5 (non-isotropique) $L_t = 350 \text{ m}$		1/1/1 (isotropique) $L_t = 170 \text{ m}$	
Température atm. [°C]	0	40	-10	40
Densité de l'air [kg/m <sup>3</sup> ]	0.9	1.35	0.9	1.35
Inclinaison de l'écoulement [°]	-3	3	-15	15

### Intensité de turbulence

Les plages de variation de l'intensité de turbulence pour les classes A et B ne sont pas constantes, elles sont fonction de la vitesse moyenne  $U$ . La figure 18 montre l'évolution de la plage d'intensité pour les deux classes.

### Structure de turbulence

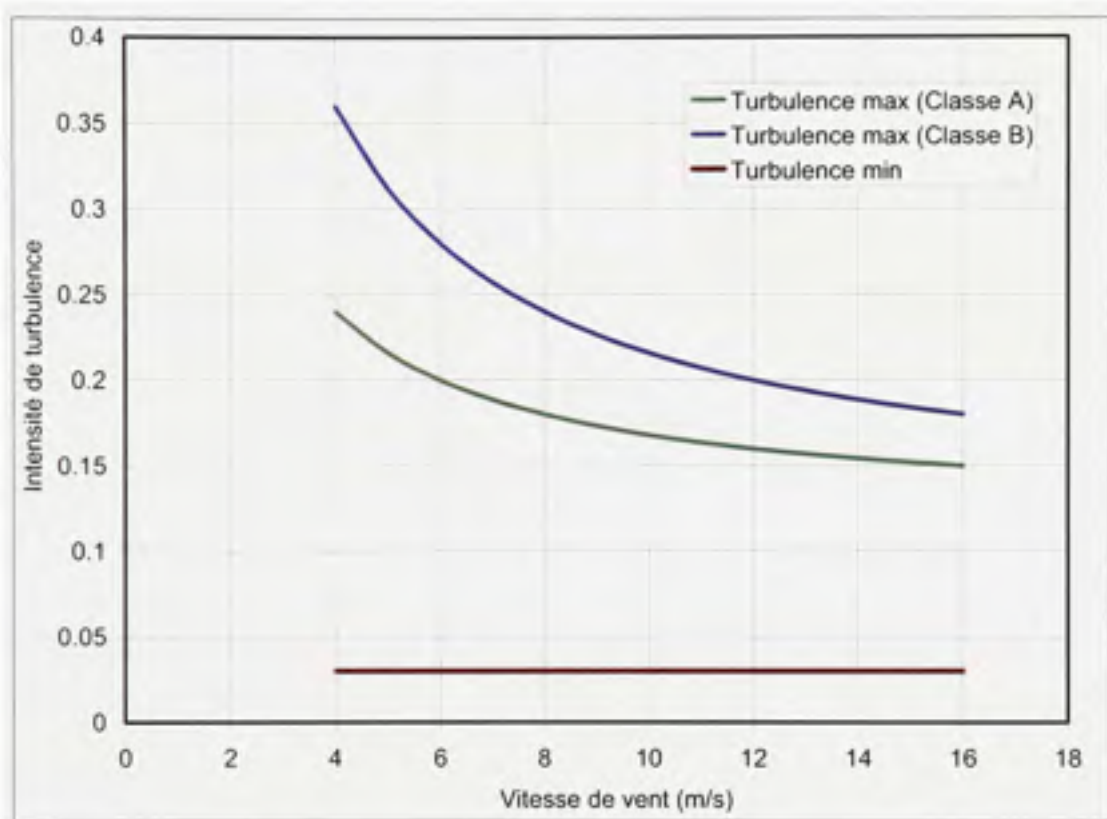
La structure de turbulence, aussi appelée spectre de turbulence, est spécifique à un site donné. Afin de représenter ce spectre, on utilise un modèle adapté à la classe considérée.

Pour la classe A, ayant une structure de turbulence non-isotropique, on utilise le modèle spectral de Kaimal. L'indice  $i$  réfère aux trois composantes de vitesses, longitudinale (u), transversale (v) et verticale (w).

$$\frac{f S_k(f)}{\sigma_i^2} = \frac{4 f L_t / U}{(1 + 6 f L_t / U)^{5/3}} \quad (1.30)$$



Dans cette équation,  $f$  représente la fréquence et  $S_k(f)$  représente le spectre de puissance de la composante de vitesse considérée. Le tableau 1.5 présente les valeurs de  $\sigma_i$  et  $L_i$ , pour chaque composante de vitesse, en fonction de l'écart-type du vent ( $\sigma_i$ ) et l'échelle de longueur longitudinale ( $L_i$ ).



**Figure 1.15** *Limites d'intensité de turbulence en fonction de la vitesse (adaptation de Dahlberg et al., 2006)*

Source : Cette figure est adaptée de Dahlberg *et al.*, 2006 « ACCUWIND - Methods for Classification of Cup Anemometers » et correspond à la « Figure 5-1 Turbulence intensity ranges as function of wind speed for class A and class B requirements » présentée en page 48 dans le document original.

En ce qui concerne la classe B, possédant un spectre de turbulence isotropique, le modèle de spectre de von Karman est utilisé. Il est défini selon les mêmes conventions que pour le modèle précédent.

$$\frac{f S_k(f)}{\sigma_i^2} = \frac{4 f L_i/U}{(1 + 71(f L_i/U)^2)^{5/6}} \quad (1.31)$$



Tableau 1.5

$\sigma_i$  et  $L_i$  pour les trois composantes du spectre de Kaimal

	u	v	w
Écart-type $\sigma_i$	$\sigma_i$	$0.8 \sigma_i$	$0.5 \sigma_i$
Échelle de longueur intégrale $L_i$	$L_i$	$0.33 L_i$	$0.08 L_i$

Du fait que ce modèle soit utilisé pour un spectre isotropique, les trois composantes sont similaires, on utilise directement les valeurs de  $\sigma_i$  et  $L_i$ .

### Température de l'air

La température de l'air indique la température à laquelle l'anémomètre est exposé, qui n'est pas nécessairement celle des roulements. La gamme de température retenue à la classe B,  $-10^\circ\text{C}$  à  $40^\circ\text{C}$ , représente les recommandations du code de sécurité de l'IEC pour l'opération d'éoliennes en conditions normales. Pour la classe A, la zone en dessous de  $0^\circ\text{C}$  a été retranchée afin d'éliminer la possibilité de phénomènes de givre. La IEC prescrit également une plage pour les conditions extrêmes, de  $-20^\circ\text{C}$  à  $50^\circ\text{C}$ , mais celle-ci n'est pas considérée dans la procédure de classification.

### Densité de l'air

La densité de l'air affectant le rapport des forces de friction par rapport aux forces aérodynamiques, elle s'avère un paramètre important à considérer. Selon les valeurs de l'atmosphère standard ISO, la densité de l'air varie de  $1.225$  à  $1.006\text{kg/m}^3$ , pour une altitude passant de  $0$  à  $2000\text{m}$ . Considérant une variation de  $\pm 10\%$  pour une altitude fixe, la gamme proposée s'avère raisonnable.

### Inclinaison de l'écoulement

La gamme d'inclinaison considérée pour la classe A correspond à un terrain que l'on peut considérer plat. Il est à noter que le projet ACCUWIND (Dahlberg *et al.*, 2006; Eecen *et al.*, 2006; Pedersen *et al.*, 2006) est en accord avec la norme IEC 61400-12-1 (IEC, 2005) concernant la plage à utiliser. Par contre, le rapport du projet CLASSCUP présente une gamme

étendue à  $\pm 5^\circ$ , trouvant les normes de la IEC trop restrictives. La plage permise pour la classe B, correspond, quant à elle, à un terrain complexe.

Maintenant que les caractéristiques du site sont connues, les modèles servant à générer les données de vent artificielles peuvent fonctionner. Le couplage entre ces données et le modèle de l'anémomètre permettent donc de déterminer sa réponse et, par le fait même, son erreur théorique de mesure. De cette erreur, découle le calcul de l'index de classification.

### 1.7.3 Index de classification

L'index de classification adopté par la norme IEC 61400-12-1 et par les deux projets de classification considérés se base sur l'erreur maximale de mesure de l'instrument par rapport à la mesure vraie. L'équation 1.32 permet de déterminer la classe de l'anémomètre.

$$k_{\text{index}} = 100 \max \left| \frac{\varepsilon_i}{0.5 U_i + 5} \right| \quad (1.32)$$

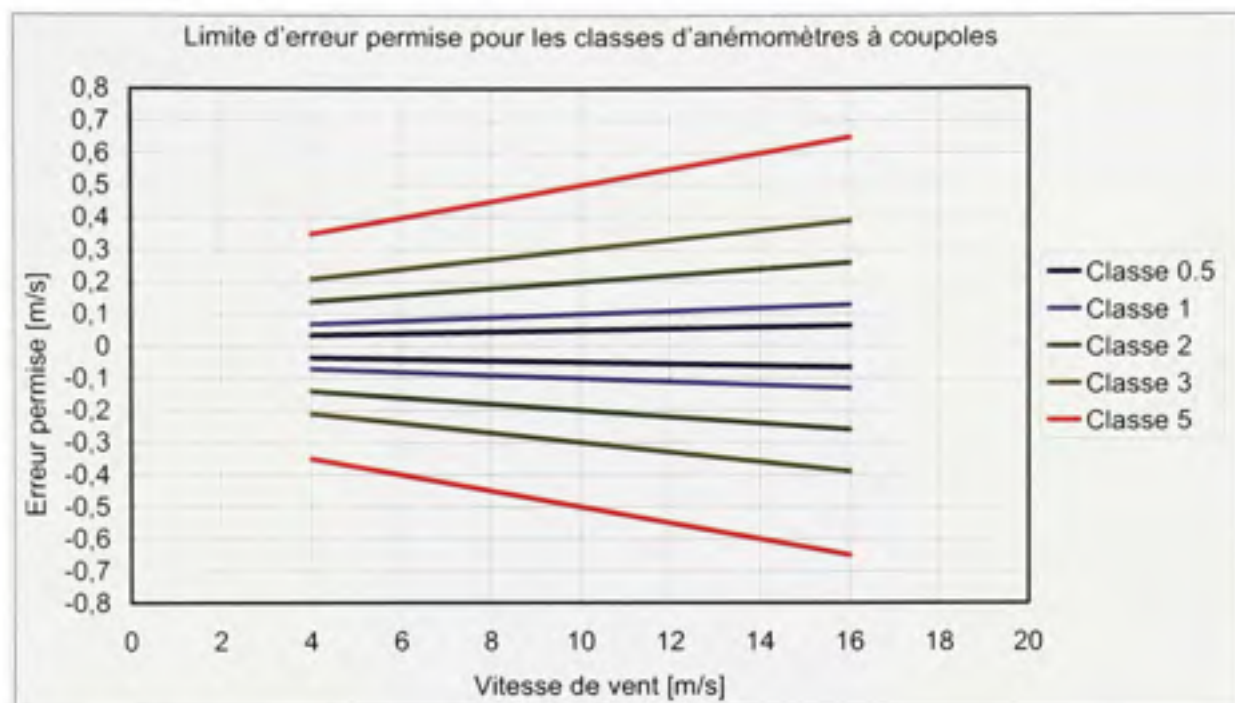
Dans cette équation,  $U_i$  représente la vitesse moyenne de la classe  $i$  (en référence à la représentation sous forme d'histogramme) et  $\varepsilon_i$  représente l'erreur maximale de mesure pour cette classe.

Cette façon de déterminer la classification d'un anémomètre permet, connaissant la classe de l'instrument utilisé, de calculer l'erreur de mesure théorique à différentes vitesses. La figure 19 illustre les marges d'erreur permises pour certaines classes.

Pour un instrument donné, la classification sera donc déterminée par le numéro de classe,  $k_{\text{index}}$ , et le type de classe, A, B ou S, la classe S nécessitant des précisions sur les conditions de fonctionnement considérées. À titre d'exemple, selon la classification du projet ACCUWIND (Pedersen *et al.*, 2006), la classification de l'anémomètre Risø P2546a, pour une définition de vitesse de vent horizontale, est 1.3-1.9, pour la classe A, et 5.0-8.0, pour la classe B. Pour une même classe, la plage de variation de la valeur de  $k_{\text{index}}$  représente les résultats obtenus par les différents modèles utilisés pour représenter le comportement de l'anémomètre.

En terminant, la norme IEC précise qu'il est possible, considérant une distribution d'incertitude rectangulaire, d'estimer l'incertitude due aux caractéristiques opérationnelles de l'instrument,  $u_{V2,i}$ , par l'équation suivante :

$$u_{V^2,i} = (0.05 + 0.005U_i)(k_{\text{index}}/\sqrt{3}) \quad (1.33)$$



**Figure 1.16** *Index de classification basée sur l'erreur de mesure (adaptation de Dahlberg et al., 2006)*

Source : Cette figure est adaptée de Dahlberg *et al.*, 2006 « ACCUWIND - Methods for Classification of Cup Anemometers » et correspond à la « Figure 2-2, IEC61400-12-1 classification class index examples » présentée en page 9 dans le document original.

## 1.8 Caractéristiques opérationnelles de divers anémomètres

Cette section présente quelques caractéristiques de fonctionnement observées, dans le cadre de diverses études, sur une sélection d'anémomètres disponibles sur le marché. Les instruments choisis sont ceux sur lesquels porte le présent projet de recherche. Il ne s'agit ici que de présenter le comportement général de ces instruments en lien avec la théorie présentée au chapitre 2.

### 1.8.1 Anémomètres à coupoles

#### Risø P2546a

Cet anémomètre, conçu par le laboratoire Risø, au Danemark, est essentiellement composé d'un rotor de plastique à trois coupoles et d'un corps en aluminium. Le signal fourni par l'instrument est généré par un contact en ampoule ("reed switch") combiné à deux aimants, générant ainsi deux pulsations par rotation.



**Figure 1.17** *Anémomètre Risø P2546*

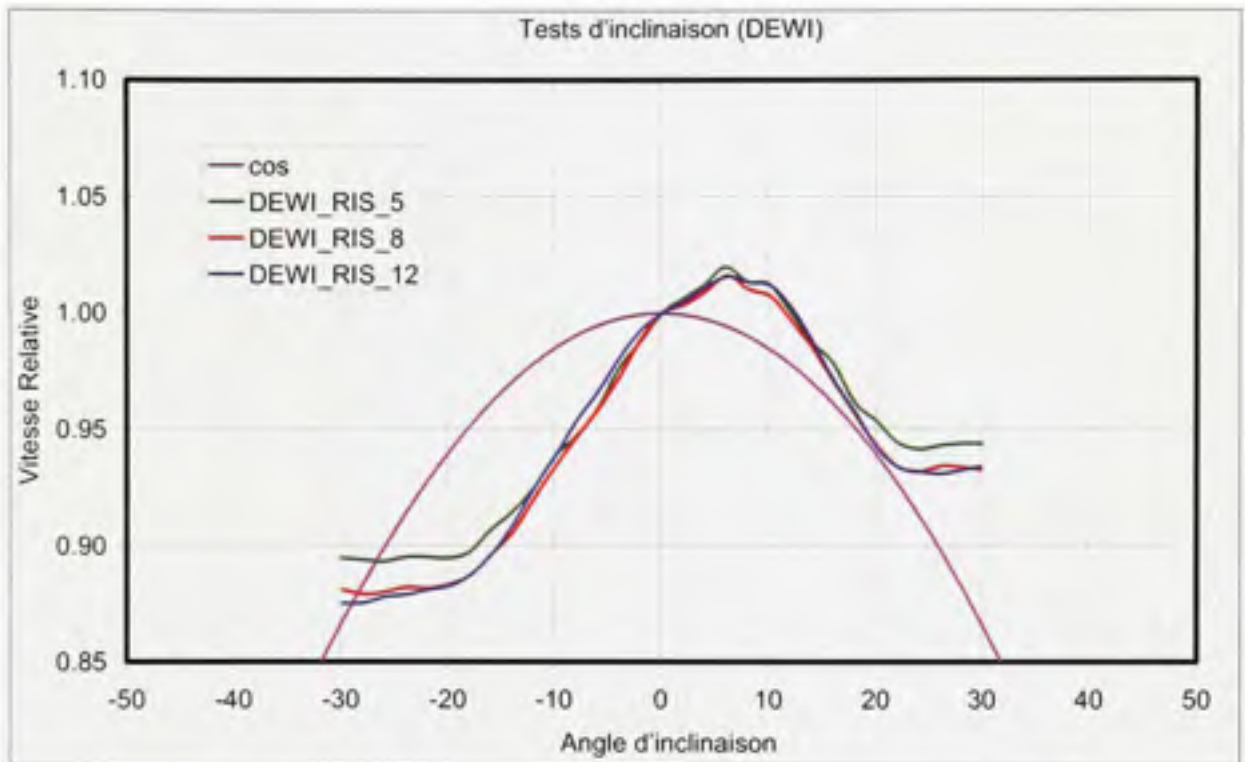
Source : Cette figure origine de photos personnelles prises de l'anémomètre.

Selon le manufacturier, l'équation standard de calibration de l'instrument se présente comme suit :

$$U \text{ [m/s]} = 0.6201 f \text{ [Hz]} + 0.27 \quad (1.34)$$

Il est reconnu dans la littérature que cet anémomètre constitue un excellent instrument pour la mesure de vitesse horizontale (2D). La réponse angulaire qu'il présente est donc de forme

cosinusoidale. De plus, en observant la figure 21, on remarque que, pour une plage d'inclinaison allant d'environ  $-15^{\circ}$  à  $20^{\circ}$ , la vitesse influe très peu sur le comportement de l'instrument face à l'inclinaison.



**Figure 1.18 Réponse angulaire de l'anémomètre Risø P2546a**  
(Adaptation de Pedersen et al., 2006)

Source : Cette figure est tirée de Pedersen *et al.*, 2006 « ACCUWIND - Classification of Five Cup Anemometers According to IEC61400-12-1 » et correspond à la « Figure 3-17 DEWI tilt test measurements with the RISO anemometer. » présentée en page 13 dans le document original.

Les différentes constantes caractérisant le comportement dynamique de l'instrument ont été déterminées expérimentalement par diverses études. Le tableau 1.6 résume l'essentiel de ces résultats.

Suite à l'observation des différentes valeurs proposées on remarque un certain consensus parmi les diverses études. Les différences entre les valeurs d'un même paramètre sont attribuables à la méthode expérimentale utilisée et à la minutie apportée à sa mesure, les besoins de précision des différentes études n'étant pas les mêmes.



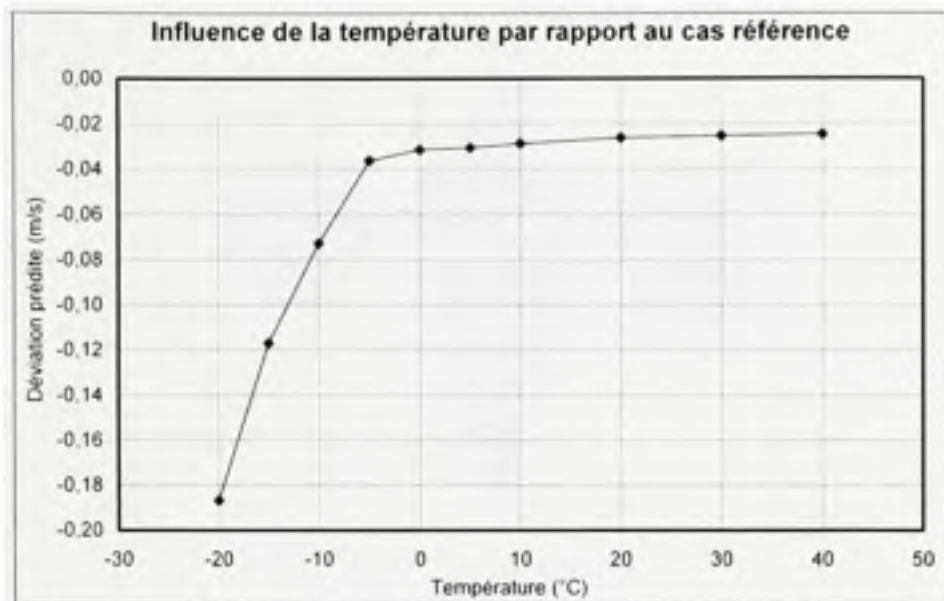
Tableau 1.6  
Constantes de l'anémomètre Risø P2546a

Paramètre	Valeur(s) Proposée(s)	
$l$	$0.2 \pm 0.01$ m	Kristensen <i>et al.</i> (2003)
	0.2 m	Kristensen et Hansen (2002)
	$0.2$ m $\pm 1\%$	Kristensen (2002)
$l_0$	$1.81 \pm 0.04$ m	Spécification du manufacturier (2005)
	2.2 m	Pedersen (2004a)
	$1.81 \pm 0.04$ m	Kristensen et Hansen (2002)
	2 m	Kristensen (2002)
	1.7 m	Papadopoulos <i>et al.</i> (2001)
$\mu_1$	0.05	Spécification du manufacturier (2005)
	0.12	Papadopoulos <i>et al.</i> (2001)
$\mu_2$	-0.9	Spécification du manufacturier (2005)
	-1.2	Papadopoulos <i>et al.</i> (2001)

De plus, une note est à apporter au paramètre  $\mu_2$ . Il est habituellement convenu que ce paramètre est de valeur positive, le contraire impliquant une certaine prédisposition à la "sous-vitesse" (de l'anglais "underspeed"). Des travaux ont été faits dans le but de déterminer la possibilité qu'un tel comportement puisse être observé en conditions normales, il a été convenu que ce serait très peu probable, à moins que la réponse angulaire de l'appareil soit bien en dessous de la réponse idéale cosinusoidale (Kristensen, 2002). Le fait que cet anémomètre présente une valeur négative pour ce paramètre a longtemps été sujet à questionnement, mais il semble, après plusieurs expériences sur le sujet, que ce soit un fait bien réel.

Les travaux de Pedersen (2004a) ont mené à une caractérisation très poussée de cet appareil. Le modèle résultant de ces travaux a permis de simuler le comportement de l'anémomètre face à divers changements dans l'écoulement atmosphérique. Par exemple, la figure 22 présente le comportement, prédit par le modèle, face au changement de la température. Pour un portrait plus détaillé, le lecteur est invité à consulter le rapport du projet.





**Figure 1.19** *Modélisation de la dépendance face à la température du Risø P2546a (Adaptation de Pedersen, 2004a)*

Source : Cette figure est tirée de Pedersen, 2004a « Characterisation and Classification of RISØ P2546 Cup Anemometer » et correspond à la « Figure 5-1 Response of RISØ P2546 cup anemometer to temperature variations » présentée en page 26 dans le document original.

## NRG #40

L'anémomètre NRG#40 est un instrument très répandu dans le domaine de l'éolien. Ce fait est attribuable, entre autre, à son faible coût et à sa durabilité. Il est essentiellement composé d'un corps en plastique ABS et d'un rotor en polycarbonate. Les coupoles sont montées sur un arbre tournant dans un bobinage. Deux aimants sont montés sur le rotor et génèrent une tension sinusoïdale, à deux cycles par rotation, dont la fréquence varie avec la vitesse de rotation des coupoles.

Selon la documentation fournie par le fabricant, l'équation standard de calibration de l'instrument est la suivante :

$$U \text{ [m/s]} = 0.765 f \text{ [Hz]} + 0.35 \quad (1.35)$$



**Figure 1.20** *Anémomètre NRG#40*

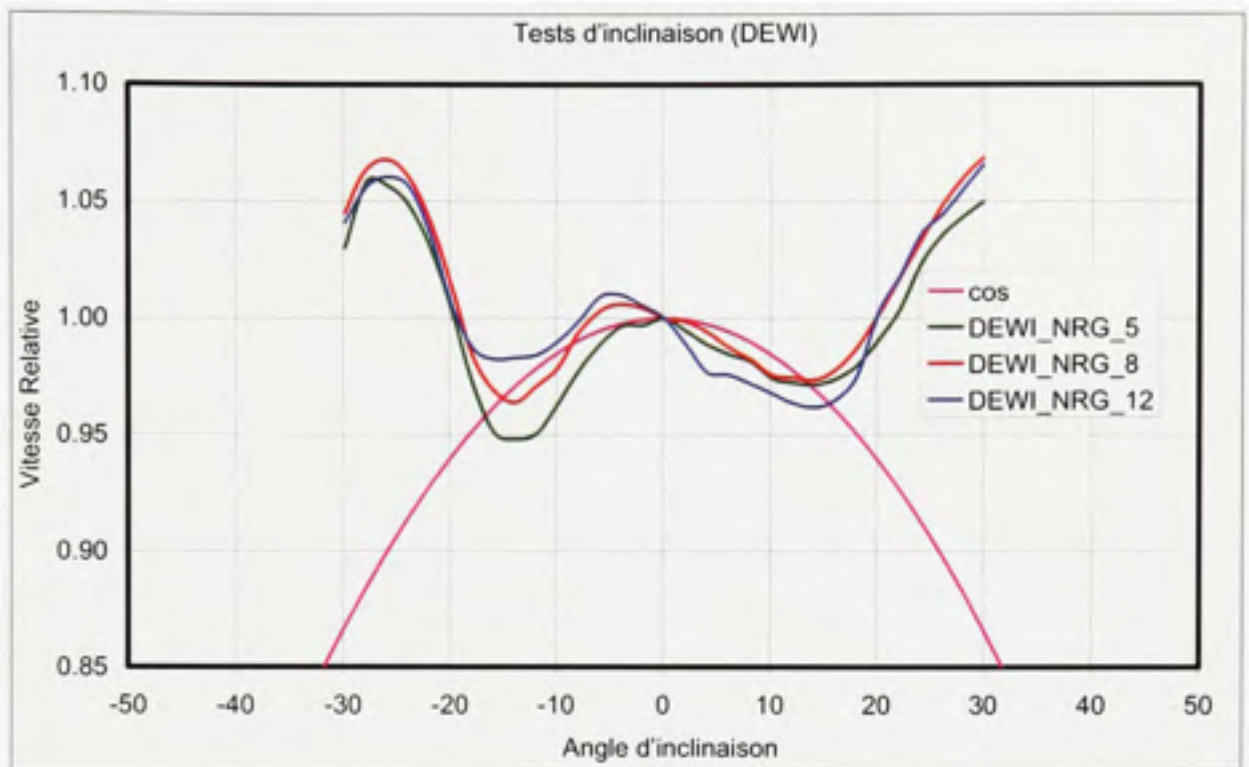
Source : Cette figure est tirée de la fiche de l'anémomètre NRG#40, sur le site internet de la compagnie. (<http://www.nrgsystems.com>)

Les résultats du projet ACCUWIND (Pedersen *et al.*, 2006), ont démontré que cet anémomètre constituait un bon instrument pour la mesure de la vitesse scalaire vectorielle (3D). Il présente par contre une réponse angulaire assez particulière (voir figure 24). De plus, on observe une forte dépendance de celle-ci face à la vitesse.

Les études portant sur cet anémomètre ne sont pas aussi nombreuses que pour le Risø P2546a, mais il est quand même possible de trouver quelques informations rattachées à la caractérisation de l'instrument. Le tableau 1.7 présente un résumé des valeurs proposées pour les différents paramètres caractérisant cet instrument.

Aucune valeur pour les paramètres  $l$  et  $\Lambda$  n'ont pu être trouvée dans les études consultées et le manufacturier ne fournit aucune information à ce titre dans la documentation de l'instrument.

Pour terminer, les travaux de Pedersen et Schmidt Paulsen (1999) ont démontré que la friction présentée par cet anémomètre est très peu dépendante de la température, contrairement aux autres instruments testés. La figure 25 présente le couple de friction de l'appareil en fonction de la température, on y retrouve également des observations faites sur l'anémomètre Risø P2546a.



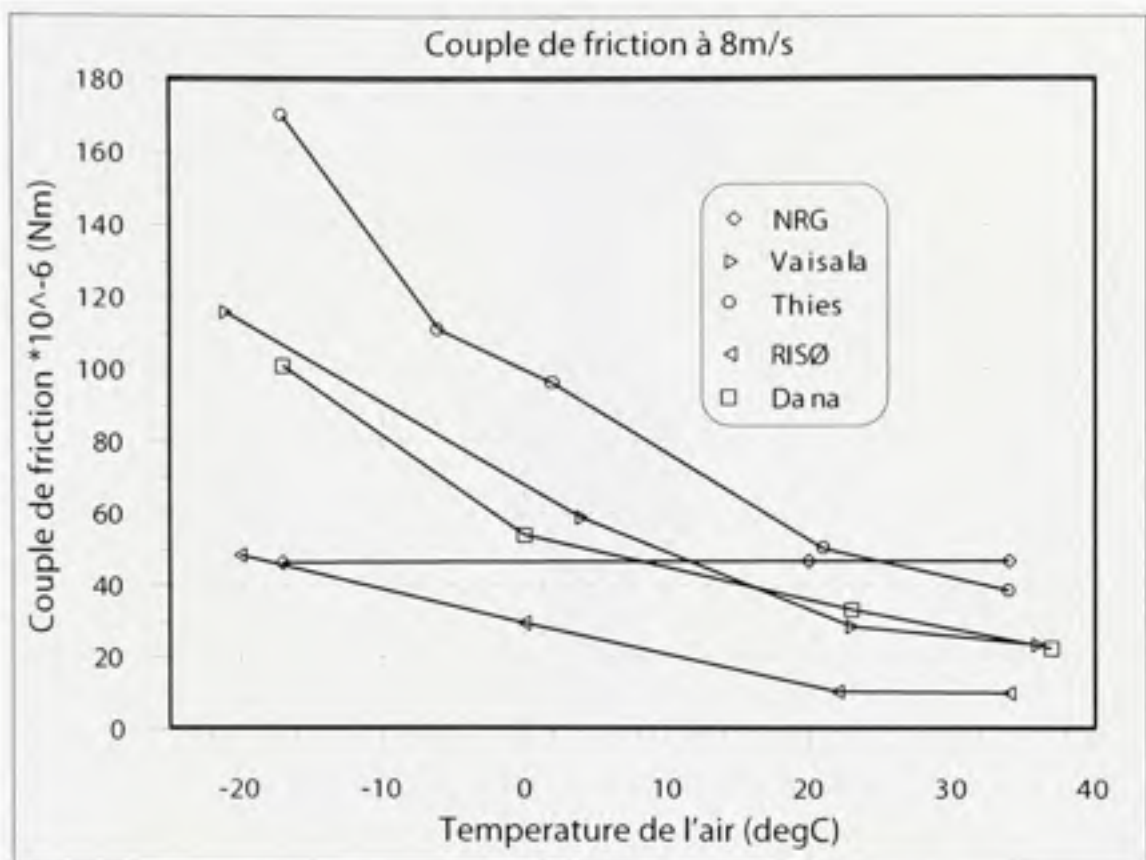
**Figure 1.21 Réponse angulaire de l'anémomètre NRG#40**  
(Adaptation de Pedersen et al., 2006)

Source : Cette figure est tirée de Pedersen *et al.*, 2006 « ACCUWIND - Classification of Five Cup Anemometers According to IEC61400-12-1 » et correspond à la « Figure 3-16 DEWI tilt test measurements with the NRG anemometer. » présentée en page 13 dans le document original.

Tableau 1.7

Constantes de l'anémomètre NRG#40

Paramètre	Valeur(s) Proposée(s)	
$l_0$	3.0 m	Spécification du manufacturier (2004)
	2.1 m	Hunter <i>et al.</i> (2001)
$\mu_1$	-0.05	Papadopoulos <i>et al.</i> (2001)
$\mu_2$	5.4	Papadopoulos <i>et al.</i> (2001)



**Figure 1.22** *Couple de friction en fonction de la température*  
(Adaptation de Pedersen et Schmidt Paulsen, 1999)

Source : Cette figure est tirée de Pedersen et Schmidt Paulsen, 1999 « Classification of Operational Characteristics of Commercial Cup-Anemometers » et correspond à la « Fig. 4 Rotor friction found by flywheel tests » présentée en page 3 dans le document original.

### NRG IcefreeIII

L'anémomètre NRG Icefree III est un anémomètre à coupoles chauffant, il est utilisé pour la mesure de vent dans les endroits propices au givre. Le système de chauffage de l'appareil est auto régulé, il s'adapte aux conditions atmosphériques, afin d'éviter la surchauffe de l'instrument et réduire sa consommation en électricité. Le rotor et le corps de l'instrument sont faits d'aluminium afin d'assurer une bonne conduction de la chaleur. La génération du signal s'effectue selon le même principe que l'anémomètre NRG#40 (voir section 1.8.1), le signal généré présente également deux cycles par rotation.





**Figure 1.23** *Anémomètre NRG IcefreeIII*

Source : Cette figure est tirée de la fiche de l'anémomètre NRG IcefreeIII, sur le site internet de la compagnie. (<http://www.nrgsystems.com>)

La documentation fournie par le fabricant propose l'équation de calibration standard ci-dessous :

$$U \text{ [m/s]} = 0.572f \text{ [Hz]} + 1 \quad (1.36)$$

La recherche d'étude portant sur cet appareil s'est avérée infructueuse. Quelques rapports utilisant cette famille d'instrument ont été retracés, mais il s'agissait d'appareils de la première et la deuxième génération. De plus, ces études étaient axées sur la caractérisation d'un site particulier plutôt que sur l'étude de l'anémomètre. Le seul commentaire trouvé rapporte que cet instrument ne convient pas à la mesure en condition turbulente (Fortin *et al.*, 2005, 2006). Cette lacune s'explique par l'inertie élevée du rotor.

Les valeurs des paramètres de caractérisation dynamique de l'instrument sont donc presque toutes inconnues. Le seul qu'il a été possible de trouver, la constante de distance, est présentée



dans les spécifications du manufacturier. Celui-ci propose une valeur de 7.6 m, cette valeur élevée est prévisible compte tenu des lacunes de l'instrument face aux conditions turbulentes.

### 1.8.2 Anémomètres à hélice

Les anémomètres à hélice qu'il a été choisi de traiter ici sont des instruments de la compagnie R. M. Young, les modèles RMY-5103 et RMY-5305. Ce type d'appareil n'étant pas régulièrement utilisé dans le domaine de l'énergie éolienne, aucun rapport de recherche détaillé n'a pu être trouvé en lien avec les préoccupations propres au domaine. Excluant les spécifications du manufacturier, les documents trouvés, Huysing (1993) et Schaffner (2002), ne renseignent pas énormément sur le comportement dynamique des instruments. Le premier document, Huysing (1993), présente une étude du RMY-5103 mais pour une application météorologique de routine, sans considérer la grande précision nécessaire à la quantification de ressource éolienne. On y retrouve par contre quelques renseignements au sujet de l'incertitude de mesure et la réponse angulaire. Le second document, Schaffner (2002), présente le modèle RMY-5305 dans une étude portant sur le choix du type d'instrument à utiliser en présence de site propice au givre. L'étude ne s'intéresse qu'à la performance des instruments dans ces conditions, aucun détail n'est donné sur la dynamique même de l'instrument.

#### RMY-5103

L'anémomètre RMY-5103 est un anémomètre à hélice combiné à une girouette. Le corps et l'hélice de cet instrument sont entièrement composés de plastique. Cette dernière est composée de quatre pales hélicoïdales. Le système est monté sur un pivot vertical afin de permettre son orientation dans le vent. Un potentiomètre est monté sur cet axe dans le but de connaître l'orientation en tout temps. Le principe de mesure de la vitesse du vent est similaire aux deux modèles NRG, un rotor tournant dans un bobinage. Par contre, pour cet instrument, trois aimants sont montés sur le rotor. Un signal à trois cycles par révolution, dont la fréquence variera en fonction de la vitesse de rotation, sera donc obtenu.

La documentation fournie par le manufacturier propose l'équation de calibration standard suivante :

$$U \text{ [m/s]} = 0.098f \text{ [Hz]} \quad (1.37)$$



**Figure 1.24** Anémomètre RMY-5103

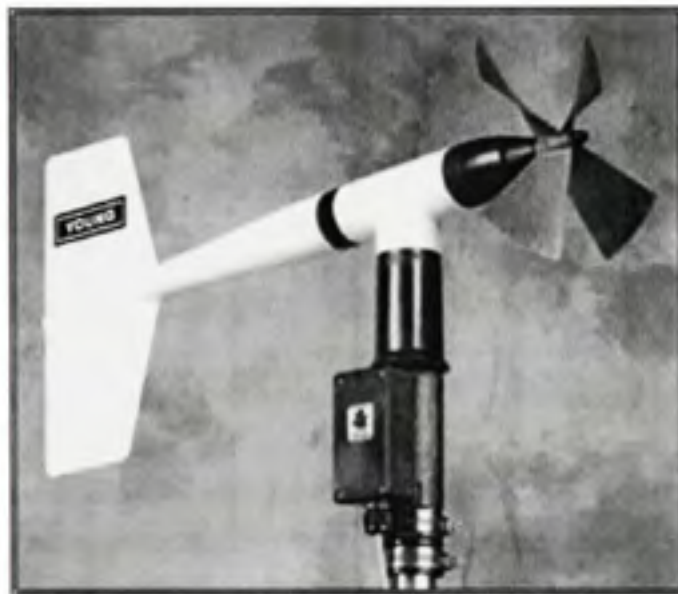
Source : Cette figure est tirée du manuel de l'anémomètre RMY-5103.

Les travaux de Huysing (1993) ont par contre démontrés une pente de plutôt  $0.1025 m$ . De plus, l'incertitude de mesure présentée par le manufacturier,  $\pm 0.3 m/s$ , ne correspond pas aux résultats obtenus par ces travaux. Avec la calibration suggérée, une incertitude près de trois fois cette valeur est observée et, avec celle proposée ci-dessus, les tests ont démontrés une incertitude d'environ  $\pm 0.5 m/s$ .

Des tests en soufflerie ont également été réalisés afin de quantifier l'influence du désalignement de l'instrument par rapport à la direction du vent. L'anémomètre fut placé à un angle de  $11.5^\circ$  par rapport à l'écoulement dans le but de mesurer la différence de mesure par rapport à la référence. Une baisse de vitesse de 16% fut observée, seulement 2% pouvant être attribués à la réponse angulaire cosinusoidale. Le comportement de cet appareil en condition turbulente peut donc s'avérer problématique.

## RMY-5305

La construction de cet anémomètre est similaire à celle du RMY-5103, à l'exception du fait que le corps de l'instrument est plus long d'environ 3 pouces. Aussi, l'hélice, légèrement plus grande, est faite d'un matériau différent, du thermoplastique additionné de fibres de carbone. Le principe de fonctionnement de la girouette et de l'anémomètre est semblable à celui du RMY-5103.



**Figure 1.25** *Anémomètre RMY-5305*

Source : Cette figure est tirée du manuel de l'anémomètre RMY-5305.

La documentation fournie par le manufacturier propose l'équation de calibration standard suivante :

$$U \text{ [m/s]} = 0.102f \text{ [Hz]} \quad (1.38)$$

Hormis le fait que cet appareil semble être moins affecté que les anémomètres à coupoles pour la mesure en conditions givrantes, conséquemment à sa vitesse de rotation élevée (Schaffner, 2002), aucune information, quant à son comportement en condition atmosphérique standard, n'a pu être trouvée.

## CHAPITRE 2

### THÉORIE

Ce chapitre constitue un condensé de la théorie nécessaire à la compréhension du contenu de ce mémoire. On y retrouve, premièrement, les bases théoriques définissant l'équation de calibration d'un anémomètre à rotor ainsi que la procédure expérimentale suggérée. Ensuite, les lignes de conduite permettant de déterminer l'incertitude de l'étalonnage d'un anémomètre sont présentées. Pour terminer, la procédure de calcul des paramètres de distribution de vent découlant d'une campagne de mesure est exposée.

#### 2.1 Forme générale de l'équation de calibration

Cette section traite de la forme que prend l'équation de calibration des anémomètres à coupes et à hélice, ainsi que certaines particularités propres à ces instruments.

##### 2.1.1 Anémomètres à coupes

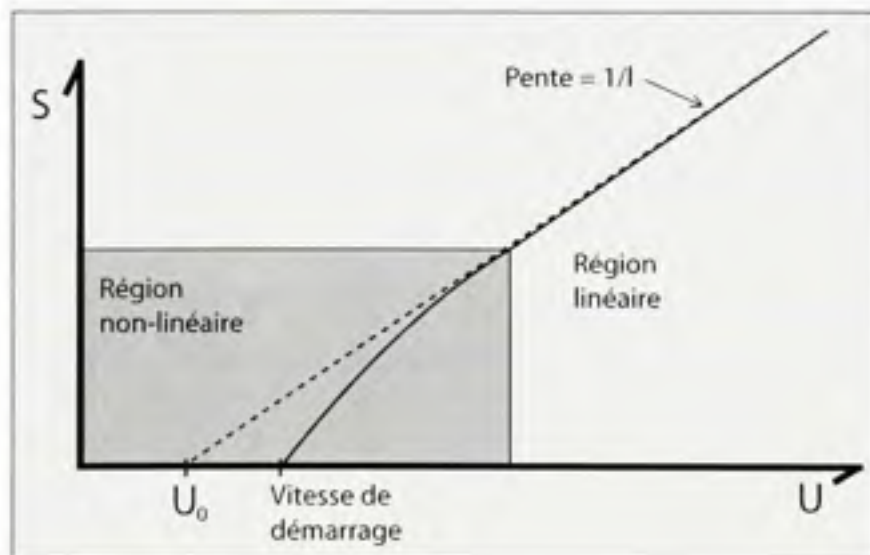
L'anémomètre à coupes étant l'instrument de mesure de vent le plus répandu pour les campagnes de mesure éolienne, son comportement ainsi que les différents facteurs pouvant affecter son fonctionnement sont très bien documentés. La grande popularité de cet instrument s'explique par trois principales qualités (Kristensen, 1993, 1994, 1999). Premièrement, il s'agit d'un instrument de mesure omnidirectionnel. Il n'est nécessaire que de s'assurer que l'axe du rotor soit à la verticale, l'orientation n'a aucune importance. Deuxièmement, c'est un instrument robuste et facile d'utilisation. Troisièmement, c'est un instrument pouvant être aisément calibré et avec un très haut degré de précision.

Les équations qui suivent présentent deux formes de l'équation de calibration d'un anémomètre à coupes. L'équation 2.1 illustre la forme de base alors que l'équation 2.2 présente une formulation alternative permettant de quantifier la linéarité de l'instrument (Kristensen, 2002), par l'ajout du paramètre  $A$ . Dans le cadre de ce projet, l'équation de base (2.1) sera celle utilisée.

$$S = \frac{U - U_0}{l} \quad (2.1)$$

$$S = \frac{U}{l} - \frac{A}{U} \quad (2.2)$$

La variable  $S$  étant la fréquence de rotation du rotor et  $U$  étant la vitesse de l'écoulement. Le paramètre  $U_0$  est un décalage de vitesse, souvent appelé vitesse de démarrage. Cette dernière dénomination est par contre fautive car la vitesse de démarrage est généralement plus élevée du fait qu'il n'est pas approprié d'utiliser l'instrument par très faible vent. Ceci vient du fait que, à très basse vitesse, l'effet de la friction sur le couple au rotor devient non négligeable et la calibration n'est plus linéaire. La variable restante,  $l$ , est appelée distance d'étalonnage ("calibration distance"). Lorsque la vitesse de l'écoulement est beaucoup plus grande que  $U_0$ , cette distance peut être interprétée physiquement comme étant la longueur de la colonne d'air ayant soufflée dans le rotor pour le faire tourner d'un radian.



**Figure 2.1** Illustration de la non-linéarité à basse vitesse

Il est à noter que les anémomètres modernes, considérant un minimum de qualité, sont généralement conçus pour répondre de façon linéaire à des vitesses de vents dépassant quelques mètres par seconde. L'industrie éolienne étant intéressée à des vitesses supérieures à 4m/s, il n'y a donc pas de problème majeur de ce côté.



### 2.1.2 Anémomètres à hélice

La présente section ne porte que sur les observations au sujet d'anémomètres à hélice couplés à une girouette. Les variantes présentées précédemment (section 1.3.2) ne sont pas présentées plus en détail car leur étude n'est pas pertinente au travail présentement en cours.

Malgré sa faible pénétration dans le domaine de l'énergie éolienne, l'anémomètre à hélice possède des avantages notables sur l'anémomètre à coupoles. Premièrement, par le fait qu'il combine en un seul instrument la mesure de vitesse et de direction du vent. Ensuite, il présente une vitesse de démarrage très faible. Les travaux de Desjardins *et al.* (1986) ont mené à la conception d'un instrument répondant, de façon linéaire, à une vitesse de vent aussi faible que  $0.08 \text{ m/s}$ . Il est également rapporté que le phénomène de survitesse serait de moindre importance que pour un rotor à coupoles (Hunter *et al.*, 1999).

Par contre, des désavantages de poids, particulièrement à basse vitesse, viennent entacher ces caractéristiques. Le principal problème vient de l'inaptitude de ces appareils à suivre les variations dans l'orientation de l'écoulement. Ceci a comme répercussion que la vitesse mesurée sera généralement inférieure à la vitesse réelle. De plus, en conditions de turbulence élevée, un décrochage de l'écoulement de la surface des pales a été observé. Il est précisé par Hunter *et al.* (1999) que, pour des mesures de performance d'un parc éolien, l'erreur de mesure de vitesse horizontale de vent peut excéder 25% sous certaines conditions atmosphériques. Il est donc fortement recommandé de ne pas utiliser ce type d'instrument dans ce contexte.

L'équation permettant d'obtenir la vitesse de vent en fonction de la fréquence du signal généré par l'anémomètre à hélice est de forme semblable à celle utilisée pour l'anémomètre à coupoles. Consulter l'équation 2.1 à la section 2.1.1 pour plus de détails.

## 2.2 Procédure de calibration

Dans le but d'assurer l'uniformité des calibrations, une procédure a été clairement définie. Il faut tout d'abord, avant de débiter la prise de données, faire fonctionner l'anémomètre pour au moins 5 minutes afin de permettre aux roulements de l'instrument de s'adapter à la température présente dans la soufflerie.

La mesure de vitesse doit se faire sur une plage variant de 4 à 16 m/s, avec un intervalle de mesure d'au plus 1 m/s. L'acquisition doit se faire en vitesse ascendante et descendante. Il est à noter que l'intervalle de 1 m/s peut être obtenu par saut de 2 m/s (4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 15, 13, 11, 9, 7, 5 m/s).

L'échantillonnage des données doit être fait à un taux minimum de 1 Hz et sur une durée minimale de 30 secondes, le temps de mesure devrait être augmenté en cas de calibration d'instruments ayant une faible résolution.

Avant chaque prise de mesure, il est primordial de s'assurer de la stabilité de l'écoulement. Pour ce faire, on recommande d'attendre au moins 1 minute après le changement de vitesse. La stabilité peut être vérifiée par deux mesures de vitesse moyenne consécutives, la variation entre celles-ci doit être inférieure à 0.05 m/s.

La vitesse de référence se basant sur la densité de l'air, une attention particulière doit être apportée à sa mesure. Elle doit être calculée en fonction de la température moyenne présente dans la soufflerie, l'humidité relative et la pression barométrique. L'équation 2.3 permet de calculer la densité avec une incertitude inférieure à  $10^{-3}$  kg/m<sup>3</sup>.

$$\rho = \frac{1}{T} \left( \frac{B}{R_0} - \phi P_w \left( \frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_w} \right) \right) \quad (2.3)$$

Dans cette équation,

- $B$  est la pression barométrique [Pa];
- $T$  est la température absolue [K];
- $\phi$  est l'humidité relative;
- $R_0$  est la constante des gaz de l'air sec [287.05 J/kgK];
- $R_w$  est la constante des gaz de la vapeur d'eau [461.5 J/kgK];
- $P_w$  est la pression de vapeur [Pa].

$$P_w = 0.000205 \exp(0.0631846 T) \quad (2.4)$$

La vitesse de référence à la position de l'anémomètre est définie à l'aide de la pression différentielle moyenne mesurée au pitot.

$$\bar{v} = k_b \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{2k_c}{C_h} \frac{\Delta p_{\text{ref}, i}}{\rho}} \quad (2.5)$$

Dans cette équation,

- $C_h$  est le coefficient de tête du tube de pitot ;
- $k_c$  est le facteur de calibration de la soufflerie ;
- $k_b$  est le facteur de correction due au ratio de blocage ;
- $n$  est le nombre d'échantillons dans l'intervalle de mesure.

Par souci de simplification, il est possible de poser une valeur fixe pour le facteur de correction du blocage. Pour une soufflerie avec zone d'essai fermée, il est recommandé d'utiliser une valeur de 1/4, alors que, pour une section ouverte on recommande une valeur de 1/16. Il est également possible de déterminer une valeur plus adaptée à la situation présente par calcul à l'aide du théorème de Maskell.<sup>1</sup>

### 2.3 Détermination de l'équation de calibration

Afin d'obtenir l'équation de calibration, on procède à une régression linéaire passant par les points de mesure obtenus en soufflerie, elle se présente sous la forme familière suivante :

$$y = mx + b \quad (2.6)$$

En général, on exprime la vitesse de référence en fonction de la fréquence du signal généré par l'anémomètre. Pour une régression valable, le coefficient de régression doit être supérieur ou égal à 0.99995. Si ce critère n'est pas rempli, l'étalonnage doit être répété. En cas de persistance, et si la qualité des installations est confirmée, on doit conclure que l'instrument est excessivement non linéaire et il ne doit donc pas être utilisé pour l'évaluation du potentiel éolien.

<sup>1</sup>On fait référence à ce théorème dans plusieurs publications mais je n'ai pu obtenir de documentation le présentant en détail. L'article présentant ce théorème est le suivant :

Maskell, E.C., "A theory of blockage effect on bluff-bodies and stalled wings in a closed wind tunnel", RAE Report AERO 2685, November 1963

L'étalonnage de l'anémomètre, pour être complet, doit présenter les paramètres suivants :

- L'ordonnée à l'origine  $b$  ;
- La pente de la droite  $m$  ;
- Le coefficient de régression  $r$  ;
- La variance de la pente ( $\sigma_m^2$ ) et de l'ordonnée ( $\sigma_b^2$ ) ;
- La covariance de la pente et l'ordonnée  $COV(m, b)$ .

Le calcul de ceux-ci est présenté un peu plus loin, à la section 2.4.1.

## 2.4 Calcul de l'incertitude d'étalonnage

Les paramètres de l'équation de calibration ne pouvant être considérés exacts, l'incertitude rattachée à ces valeurs doit être quantifiée. Dans ce calcul, les influences suivantes doivent être considérées :

- L'incertitude liée à la mesure de la vitesse de référence (tube de pitot, capteurs, évaluation de la densité de l'air, etc.) ;
- La mesure de la fréquence du signal ;
- La calibration de la soufflerie et l'effet de blocage ;
- Les fluctuations dans l'écoulement aux environs de l'anémomètre ;
- L'incertitude liée à l'utilisation d'une régression linéaire pour expliquer le fonctionnement de l'appareil.

Les calculs doivent se faire selon les directives du guide ISO pour l'expression de l'incertitude dans la mesure (International Organization for Standardization, 1993) et présenter les incertitudes de types A et B. À ce sujet, le document rédigé par Eecen et de Noord (2005), s'avère une excellente référence, il présente un exemple détaillé de ce type de calcul. Il est à noter que, selon les recommandations du MEASNET, le total des incertitudes ne devrait pas dépasser 0.1m/s, à une vitesse de 10m/s. Les détails concernant les diverses contributions au biais d'étalonnage sont présentés dans les pages qui suivent.

### 2.4.1 Incertitude de type A

L'incertitude de type A est déterminée statistiquement à partir des données recueillies, elle consiste en l'erreur rattachée à l'utilisation de la régression linéaire présentée à la section 2.3. La méthode retenue pour le calcul de cette incertitude est tirée de Bendat et Piersol (2000).

Considérant une campagne de calibration dans laquelle un échantillon de  $N$  points  $(x_i, y_i)$  a été recueilli. On note la variable  $x$  indépendante (i.e. la fréquence du signal de l'anémomètre) et la variable  $y$  dépendante (i.e. la vitesse de l'écoulement). De plus, on prend en considération que la valeur de la variable  $y$  peut être connue avec un très haut degré de précision.

Comme nous ne disposons que d'un échantillon de mesure, les valeurs vraies de la moyenne des variables  $x$  et  $y$ ,  $\bar{X}$  et  $\bar{Y}$ , nous sont inconnues. Il est toutefois possible de calculer une estimation de ces valeurs à l'aide des équations 2.7 et 2.8.

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (2.7)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (2.8)$$

Ensuite, on calcule l'écart-type, sur l'échantillon, des valeurs observées  $y_i$  par rapport aux prédictions  $\hat{y}_i$ , obtenues à l'aide de la régression linéaire. L'équation 2.9 présente ce calcul.

$$s_{x|y} = \left[ \frac{1}{N-2} \left( \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 - \frac{[\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \hat{y}_i)]^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \right) \right]^{1/2} \quad (2.9)$$

L'incertitude de type A peut maintenant être déterminée, pour chaque point  $(x_o, y_o)$  de la droite de régression. Pour ce faire, on utilise la loi de Student avec un nombre de degré de liberté  $N - 2$  et un niveau d'incertitude  $\alpha$ . L'équation 2.10 illustre le calcul de l'incertitude de la valeur estimée de la variable dépendante  $\hat{y}$  découlant d'une observation de la variable indépendante  $x_o$ .

$$\hat{y} \pm s_{x|y} t_{N-2, \alpha/2} \left[ \frac{1}{N} + \frac{(x_o - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \right] \quad (2.10)$$



La valeur du quantile  $t_{N-2, \alpha/2}$  est disponible dans des tables statistiques, connaissant les valeurs de  $N$  et  $\alpha$ . Dans le cas présent, le calcul d'incertitude est appliqué à des étalonnages de 14 points de mesure et un degré de confiance de 95% est retenu.

## 2.4.2 Incertitude de type B

Le calcul des différentes contributions à l'incertitude de type B est présenté en détail ci-dessous. Il s'agit de procédures générales, les calculs peuvent différer en fonction des renseignements disponibles. Certaines contributions peuvent également être éliminées selon la configuration de l'installation.

### Incertitude due à la soufflerie

Cette erreur est fonction de la qualité de l'installation, elle est quantifiée par un facteur de correction  $k_f$ . Selon la procédure de calibration proposée (MEASNET, 1997), une soufflerie de bonne qualité présentera un facteur de correction de 0.5 % ( $k_f = 1.005$ )

Il est proposé de considérer une approximation de l'écart-type ( $u_f$ ) égale à la moitié de l'erreur entre la valeur corrigée et non corrigée ( $(k_f - 1)/2$ ). La contribution d'incertitude due à la soufflerie, fonction de la vitesse  $U$ , sera donc calculée comme ceci :

$$u_{\text{soufflerie}}(U) = u_f \frac{U}{k_f} \quad (2.11)$$

### Incertitude due à la calibration de la soufflerie

Cette erreur origine de la calibration entre la position de mesure de référence et la position de l'anémomètre à mesurer. Elle peut être éliminée si la calibration est effectuée une seconde fois, en inversant la position des deux tubes de pitot. Le cas échéant, la fonction de calibration de la soufflerie sera utilisée avec une incertitude nulle.

S'il est décidé de ne pas effectuer d'inversion des tubes, on doit calculer l'incertitude reliée à cette procédure. Prenons exemple d'une correction de 2 % entre les deux positions. Le facteur de calibration  $k_t$  résultant sera de 1.02. Encore ici, il est proposé de considérer une approximation de l'écart-type ( $u_t$ ) égale à la moitié de l'erreur entre la valeur corrigée et non corrigée ( $(k_t - 1)/2$ ). La contribution d'incertitude due à la calibration de la soufflerie, fonction de la vitesse  $U$ , sera donc calculée comme ceci :

$$u_{\text{calib souf}}(U) = u_t \frac{U}{2k_t} \quad (2.12)$$

### Incertitude due à la sensibilité du capteur de pression

Cette erreur origine de la sensibilité du capteur de pression utilisé pour la mesure de la vitesse référence. Afin de simplifier la compréhension, cette incertitude sera abordée par un exemple.

Considérant un capteur ayant une capacité de mesure jusqu'à 500 kPa ( $p_r$ ) et un signal de sortie maximal de 0.1 V ( $V_r$ ), le gain  $K_{p,t}$  de l'instrument sera de 5000 kPa/V. Considérant également une erreur ( $u_{\text{gamme}}$ ), donnée par le manufacturier, de 0.2 % de la gamme de mesure et une distribution triangulaire, l'approximation de l'écart-type du capteur ( $u_p$ ) est donnée par :

$$u_p = \frac{p_r u_{\text{gamme}}}{\sqrt{6}} \quad (2.13)$$

Connaissant la pression à la vitesse considérée ( $p_U$ ), on en déduit la tension résultante du signal  $V_U$  :

$$V_U = \frac{p_U V_r}{p_r} \quad (2.14)$$

L'approximation de l'écart-type du capteur à la pression correspondante  $u_{p,t}$  est donc :

$$u_{p,t}(U) = \frac{p_r^2 u_{\text{gamme}}}{p_U V_r \sqrt{6}} \quad (2.15)$$

La contribution d'incertitude due à la sensibilité du capteur de pression, fonction de la vitesse  $U$ , sera donc calculée comme ceci :

$$u_{\text{sensib pr}}(U) = u_{p,t}(U) \frac{U}{2K_{p,t}} \quad (2.16)$$

### **Incertitude due à l'amplification du signal du capteur de pression**

Cette erreur provient de l'amplification du signal dans le but de couvrir la plage de mesure du système d'enregistrement.

Considérant un capteur ayant une tension maximale de sortie  $V_{t,max}$  et une erreur de mesure  $u_t$  ainsi qu'un système de traitement de données fonctionnant sur une plage maximale de tension  $V_{d,max}$ . On détermine un gain d'amplification  $K_{p,s}$  :

$$K_{p,s} = \frac{V_{t,max}}{V_{d,max}} \quad (2.17)$$

Ce gain permet de déterminer l'incertitude reliée à l'amplification du signal :

$$u_{p,s} = \frac{K_{p,s}}{u_t} \quad (2.18)$$

La contribution d'incertitude due à l'amplification du signal du capteur de pression, fonction de la vitesse  $U$ , sera donc calculée comme ceci :

$$u_{amplif\ pt}(U) = u_{p,s} \frac{U}{2K_{p,s}} \quad (2.19)$$

### **Incertitude due à l'échantillonnage du signal du capteur de pression**

Cette erreur origine de la résolution du système d'acquisition de données utilisé pour la mesure de la vitesse de référence. Afin de simplifier la compréhension, cette incertitude sera abordée par un exemple.

Considérant un système d'acquisition de données fonctionnant sur une plage  $V_{max}$  de 10 V avec une résolution de 12 bits ( $bit_{max} = 2^{12} = 4096$  valeurs possibles). Pour ce système, on définit un facteur  $K_{p,d}$  :

$$K_{p,d} = \frac{V_{max}}{bit_{max}} \quad (2.20)$$

La limite de quantification  $l_q$  du système est égale à la moitié du facteur  $K_{p,d}$ . Assumant une distribution d'erreur rectangulaire, l'incertitude maximale est donnée par :

$$u_{max} = \frac{l_q}{\sqrt{3}} \quad (2.21)$$

Connaissant la tension du signal  $V_U$  entrant dans le système à la vitesse considérée  $U$ , on détermine le nombre de bits utilisés :

$$bit_U = bit_{max} \frac{V_U}{V_{max}} \quad (2.22)$$

L'approximation de l'écart-type de l'échantillonnage à la vitesse considérée  $u_{p,d}$  est donc :

$$u_{p,d}(U) = \frac{u_{max}}{bit_U} \quad (2.23)$$

La contribution d'incertitude due à l'échantillonnage du signal du capteur de pression, fonction de la vitesse  $U$ , sera donc calculée comme ceci :

$$u_{\text{échant pr}}(U) = u_{p,d} \frac{U}{2K_{p,d}} \quad (2.24)$$

### **Incertainde due au capteur de température**

Considérant une précision de  $\Delta T$  pour le capteur de température et une distribution d'incertitude triangulaire, on obtient une approximation de l'écart-type  $u_{T,t}$  :

$$u_{T,t} = \frac{\Delta T}{\sqrt{6}} \quad (2.25)$$

La contribution de la mesure de température à l'incertitude totale est calculée en déterminant la différence de vitesse moyenne entre une température  $T_1$  et une température  $T_2 = T_1 + u_{T,t}$ , la vitesse  $\bar{U}$  étant calculé avec l'équation ci-dessous :

$$\bar{U} = k_f \sqrt{\frac{2k_c p R T}{C_h B k_\rho}} \quad (2.26)$$

Considérant toutes les variables constantes, sauf la température, et en effectuant quelques manipulations algébriques de base, on obtient :

$$u_{\text{temp}}(U) = U \left( \frac{\sqrt{T_1 + u_{T,t}}}{\sqrt{T_1}} - 1 \right) \quad (2.27)$$

### **Incertitude due au traitement du signal du capteur de température**

Cette erreur origine du traitement du signal généré par le capteur de température. On considère ici une sonde de type thermistor.

Considérant que le courant sortant de la sonde de température est envoyé à une résistance  $R$ , de précision  $\Delta R$ . Afin d'obtenir une tension de sortie variant de  $V_{min}$  à  $V_{max}$ , l'intensité du courant doit varier de  $I_{min}$  à  $I_{max}$ . L'intensité étant donnée par :

$$I = \frac{V}{R} \quad (2.28)$$

Le gain de la sonde de température  $K_{T,s}$  sera donc donné par :

$$K_{T,s} = \frac{I_{max} - I_{min}}{V_{max} - V_{min}} \quad (2.29)$$

L'incertitude standard de la sonde de température est donc de :

$$u_{T,s} = K_{T,s} \frac{\Delta R}{R} \quad (2.30)$$

Ce qui résulte en une contribution à l'incertitude de :

$$u_{\text{signal temp}}(U) = u_{T,s} \frac{0.5U}{K_{T,s}} \quad (2.31)$$



### **Incertitude due à l'échantillonnage du signal du capteur de température**

La procédure pour cette contribution est la même que pour le calcul de l'incertitude due à l'échantillonnage du signal du capteur de pression. Le lecteur est donc invité à se reporter à ce paragraphe pour plus de détails.

### **Incertitude due au coefficient de tête du tube de pitot**

Cette contribution provient du changement de la valeur du coefficient de tête du tube de pitot. Ces variations peuvent provenir soit du désalignement du tube ou de la turbulence dans l'écoulement.

Considérant un tube de pitot ayant un coefficient de tête  $C_h$  et un écart-type de  $2^\circ$  pour l'angle d'attaque. On ajoute que, selon la norme ISO 3966, on considère une incertitude de 0.1 % sur le changement du coefficient de tête causé par l'angle d'attaque.

L'incertitude du  $C_h$  du pitot ( $u_h$ ) étant de 0.001 fois sa valeur, on calcule la contribution à l'incertitude de la façon suivante :

$$u_{\text{pitot}}(U) = -u_h \frac{U}{2C_h} \quad (2.32)$$

### **Incertitude due à la sensibilité du baromètre et à l'amplification et l'échantillonnage de son signal**

La procédure de calcul pour déterminer ces contributions est la même que celle utilisée pour le capteur de température et de pression. Le lecteur est donc invité à se reporter aux paragraphes concernés pour plus de détails.

### **Incertitude statistique due au calcul de vitesse moyenne**

Cette incertitude provient du calcul de la vitesse moyenne des séries temporelles de données recueillies.

Considérant une intensité de turbulence  $T_I$ , une fréquence d'échantillonnage  $f_s$ , un temps d'échantillonnage  $t_s$  et une taille d'échantillon  $n_s = f_s t_s$ , on obtient la contribution suivante à l'incertitude :

$$u_{\text{echantillon}}(U) = \frac{1}{\sqrt{n_s}} T_f U \quad (2.33)$$

### Incertitude due à la correction en humidité de la densité

Cette incertitude provient du calcul de correction de la densité permettant de prendre en considération l'humidité de l'air.

Le calcul débute par la détermination du facteur de correction  $k_\rho$  suivant :

$$k_\rho \approx 1 - 0.378 \frac{\varphi_k P_w}{B_k} \quad (2.34)$$

Dans cette équation, on retrouve l'humidité relative  $\varphi_k$ , entachée d'une précision de mesure  $d_{\varphi_k}$ , la pression atmosphérique  $B_k$  et la pression de vapeur, donnée par l'équation suivante :

$$P_w = 0.0000205 \exp(0.0631846 T) \quad (2.35)$$

Considérant une température  $T$ , il est possible de calculer la pression de vapeur  $P_w$  et, par la suite, le facteur de correction  $k_\rho$ . L'incertitude de la mesure d'humidité  $u_\varphi$  étant donnée par :

$$u_\varphi = d_{\varphi_k} \varphi_k \quad (2.36)$$

On obtient finalement l'équation suivante permettant de calculer la contribution de la correction en humidité de la densité :

$$u_{\text{humidite}}(U) = u_\varphi \frac{U}{2 k_\rho} 0.378 \frac{P_w}{B_k} \quad (2.37)$$

L'erreur de type B totale est la somme de toutes les contributions présentées à cette section.

On obtient finalement l'incertitude totale de la calibration en effectuant la somme des erreurs de type A (section 2.4.1) et de type B (section 2.4.2). Cette sommation permet de déterminer, pour une vitesse d'écoulement  $U$  donnée, l'incertitude rattachée à la mesure de vent.

## 2.5 Analyse de données temporelles de vent

Suite à la détermination de l'équation d'étalonnage et de son incertitude, l'anémomètre est prêt à être utilisé pour la mesure extérieure de vent. La théorie qui suit présente les démarches permettant d'extraire diverses informations pertinentes des données recueillies lors d'une campagne de mesure, elles proviennent majoritairement des livres de Manwell *et al.* (2002) et de Burton *et al.* (2001).

### 2.5.1 Classification des données

Les données ayant passées le contrôle de qualité (voir section 1.6.3) sont généralement manipulées afin d'obtenir une représentation sous forme de distribution de vitesse. Cette forme de représentation tire son utilité du fait qu'elle permet d'obtenir facilement une estimation de l'énergie pouvant être extraite du site observé, en fonction de la courbe de puissance du modèle d'éolienne envisagé.

#### Classification en fonction de l'orientation de vent

Différentes approches peuvent être utilisées pour traiter les données. Il peut être souhaitable de traiter celles-ci en fonction de leur orientation plutôt que de considérer la totalité de la base de données. Ce faisant, il est possible d'obtenir une évaluation de l'incidence dominante de vent ainsi qu'une distribution de vitesse propre à chaque orientation de vent.

Pour ce faire, on divise la plage d'orientation en un certain nombre de secteurs ( $N_S$ ), chacun de ces secteurs couvre un angle  $\theta$ .

$$\theta = \frac{360^\circ}{N_S} \quad (2.38)$$

Les points de données recueillis sont ensuite placés dans le secteur correspondant à l'orientation de vent observée à cette période. En dénombrant le nombre de points dans chaque

secteur on détermine leur occurrence relative. Les résultats sont, par la suite, illustrés dans un histogramme circulaire appelé rose des vents.

### Classification en fonction de la vitesse de vent

La classification des données de vent en fonction de la vitesse moyenne observée aux différents points de mesure,  $u_i$ , débute par le sectionnement de la plage de vitesse observée en  $N_C$  classes de taille  $w_j$  centrées sur une valeur  $m_j$ . Les points de données sont placés dans la classe reflétant la vitesse observée à cette période, la variable  $f_j$  représente le nombre de points dans chaque classe. La variable  $N$  représente le nombre total de points de mesure. Les valeurs de la moyenne de chaque classe et de la moyenne et l'écart-type sur la totalité de la base de données peuvent être déterminées, respectivement, par les équations 2.39, 2.40 et 2.41.

$$\bar{U}_j = \frac{1}{f_j} \sum_{i=1}^{f_j} u_i \quad (2.39)$$

$$\bar{U} = \frac{1}{N_C} \sum_{j=1}^{N_C} \bar{U}_j \quad (2.40)$$

$$\sigma_U = \sqrt{\frac{1}{N-1} \left[ \sum_{j=1}^{N_C} m_j^2 f_j - N(\bar{U})^2 \right]} \quad (2.41)$$

Les résultats d'occurrences de vitesses de vent sont généralement illustrés par un histogramme à bande. L'étape suivante consiste habituellement à superposer à cette distribution de vitesse une distribution statistique continue.

### 2.5.2 Analyse statistique des données temporelles

De façon générale, la distribution de probabilité adoptée pour représenter une distribution de vent est la distribution de Weibull. L'équation 2.42 représente la fonction de densité de probabilité de cette distribution.

$$p(U) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} \exp \left[ - \left(\frac{U}{c}\right)^k \right] \quad (2.42)$$

Afin de pouvoir utiliser cette équation, il est nécessaire de connaître les deux paramètres la caractérisant : le facteur de forme,  $k$ , et le facteur d'échelle,  $c$ . Les valeurs de ceux-ci peuvent être déterminées par calcul à l'aide des équations 2.43, 2.44 et 2.45.

$$\bar{U} = c \Gamma(1 + 1/k) \quad (2.43)$$

$$\bar{U}^3 = c^3 \Gamma(1 + 3/k) \quad (2.44)$$

$$\sigma_U^2 = \bar{U}^2 \left[ \frac{\Gamma(1 + 2/k)}{\Gamma^2(1 + 1/k)} - 1 \right] \quad (2.45)$$

Considérant deux inconnues à déterminer, deux équations sont nécessaires. Le choix des équations à utiliser dépend des informations disponibles. La fonction gamma, utilisée dans ces équations, est définie à l'équation 2.46

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{x-1} dt \quad (2.46)$$

Il est également possible de déterminer les paramètres  $k$  et  $c$  directement à l'aide des mesures de vitesse des données temporelles. La méthode utilise la technique de calcul du maximum de vraisemblance. L'équation 2.47 permet de déterminer la valeur de  $k$ , celle-ci est ensuite insérée dans l'équation 2.48 afin d'obtenir la valeur de  $c$ .

$$k = \left( \frac{\sum_{i=1}^N U_i^k \ln(U_i)}{\sum_{i=1}^N U_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^N \ln(U_i)}{N} \right)^{-1} \quad (2.47)$$

$$c = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i^k \right)^{1/k} \quad (2.48)$$



## CHAPITRE 3

### PROCÉDURES D'EXPÉRIMENTATION ET D'ANALYSE

Ce chapitre définit les procédures d'expérimentation et d'analyse utilisées au cours du projet. Afin de bien représenter le cheminement adopté, le chapitre est divisé en deux sections principales. La première partie traite du traitement des données recueillies par la tour de mesure installée par GPCo et, la seconde, aborde la période de tests en soufflerie effectués dans les installations du département de génie mécanique de l'Université Laval.

#### 3.1 Traitement des données temporelles

Cet aspect du projet porte sur des données temporelles recueillies par une tour de mesure météorologique érigée sur le terrain des bureaux de GPCo. Les critères de contrôle de qualité présentés au tableau 1.3 de la section 1.6.3 ont été utilisés pour éliminer les données indésirables. Pour ce qui est du contrôle de l'ombrage de la tour, considérant la taille de la base de données disponibles, il a été décidé de réduire la zone d'ombrage à 10° de part et d'autre de la direction de l'instrument. De plus, considérant qu'il soit très improbable que le vent ne souffle pas du tout sur une période de 10 minutes, les points de mesure affichant une vitesse moyenne de 0m/s ont été éliminés.

##### 3.1.1 Présentation de l'installation

La tour utilisée est d'une hauteur de 20m, elle est équipée de quatre anémomètres à coupes, deux à hélice et un vertical, trois systèmes d'acquisition de données, une girouette et un capteur de température. La configuration des branchements sur les différents systèmes d'acquisition de données se présente comme suit :

- **Système d'acquisition de données NRG Symphonie**
  - Anémomètre à coupes NRG#40C (20m)
  - Anémomètre à coupes NRG#40C (18m)
  - Anémomètre à coupes Risø P2546a (20m)
  - Anémomètre à hélice/girouette RMY-5103 (18m)
  - Anémomètre à hélice/girouette RMY-5305 (16m)

- Anémomètre vertical RMY27106 (16m)
- Girouette NRG200P (16m)
- Sonde de température NRG110S (5m)
- **Système d'acquisition de données Ohmega Go-logger**
  - Anémomètre à coupoles NRG#40C (20m)
  - Anémomètre coupoles NRG#40C (18m)
- **Système d'acquisition de données Second Wind Nomad 2**
  - Anémomètre à coupoles NRG#40C (20m)
  - Anémomètre à coupoles NRG#40C (18m)
  - Girouette NRG200P (16m)

### 3.1.2 Comparaisons effectuées

L'objectif de cette partie du projet est de quantifier les variations de lectures entre les différents systèmes d'acquisition de données et les différents anémomètres installés sur la tour. Les comparaisons peuvent être effectuées soit entre deux anémomètres placés au même niveau soit sur un même anémomètre branché sur les trois systèmes d'acquisition de données. Les comparaisons à l'étude sont les suivantes :

1. Comparaisons entre les anémomètres (branchements sur le système d'acquisition de données NRG Symphonie)
  - NRG#40C à 20m vs Risø P2546a à 20m
  - NRG#40C à 18m vs RMY-5103 à 18m
2. Comparaisons entre les systèmes d'acquisition de données
  - NRG Symphonie vs Ohmega Gologger vs Nomad 2 pour NRG#40C à 20m
  - NRG Symphonie vs Ohmega Gologger vs Nomad 2 pour NRG#40C à 18m

Les comparaisons effectuées portent, premièrement, sur les distributions de vitesse de vent obtenues. Par la suite, une analyse permet d'étudier la réponse des différents anémomètres en fonction de la vitesse verticale de l'écoulement. De plus, l'effet de la variation de température sur la lecture des anémomètres est étudiée afin de quantifier leur sensibilité à ce paramètre.

Considérant le fait que les appareils doivent être comparés avec des mesures effectuées sur une même période de temps, la taille de la base de données utilisée pour les différentes comparaisons varie en fonction des plages de temps disponibles.

### 3.1.3 Détermination de la distribution de vent

Les distributions de vent observées par les divers instruments sont déterminées à l'aide de la théorie présentée à la section 2.5.

Les classes utilisées pour la construction de l'histogramme ont une taille de 0.5 m/s et la première est centrée à 0.25 m/s. Après avoir classé ainsi les données, la probabilité de rencontrer chaque classe est déterminée en fonction du nombre d'éléments qu'elle contient ( $f_j$ ) par rapport au nombre total de données valides ( $N$ ). La distribution de probabilité obtenue est ensuite superposée à la distribution idéale attendue, donnée par une distribution de Weibull.

Les sections qui suivent présentent les quatre méthodes utilisées pour déterminer les paramètres  $k$  et  $c$  de l'équation 2.42. L'utilisation de multiples méthodes de calcul a pour but de vérifier l'impact de celles-ci sur les paramètres obtenus.

Les trois premières méthodes présentées utilisent différentes combinaisons des équations 2.43 à 2.45 et la quatrième méthode utilise le principe statistique du maximum de vraisemblance (de l'anglais "maximum likelihood method"). Cette dernière se base sur les informations contenues dans un article de Seguro et Lambert (2000).

#### Méthode 1

Cette méthode de calcul permet d'obtenir une distribution de Weibull pour laquelle la vitesse moyenne ( $\bar{U}$ ) et l'écart type ( $\sigma_U$ ) sont semblables à ceux des données recueillies. Cette démarche utilise tout d'abord une estimation initiale du paramètre  $k$ . Cette valeur de départ est déterminée par l'équation 3.1.

$$k = \left( \frac{\sigma_U}{\bar{U}} \right)^{-1.086} \quad (3.1)$$

Cette valeur est par la suite insérée dans l'équation 3.2, qui est en fait l'équation 2.45 remaniée, et réajustée jusqu'à ce que les deux côtés de l'égalité répondent à un critère d'erreur donné. Pour le cas présent, une valeur de  $1 \times 10^{-14}$  a été utilisée.

$$\left(\frac{\sigma_U}{\bar{U}}\right)^2 = \frac{\Gamma(1 + 2/k)}{\Gamma^2(1 + 1/k)} - 1 \quad (3.2)$$

Lorsque  $k$  est connu avec la précision voulue, le calcul de  $c$  s'effectue avec l'équation 2.43, pour laquelle le facteur d'échelle a été isolé.

## Méthode 2

Cette méthode de calcul permet d'obtenir une distribution de Weibull pour laquelle la moyenne du cube de la vitesse ( $\bar{U}^3$ ), qui est directement proportionnelle à l'énergie présente dans le vent, et l'écart type ( $\sigma_U$ ) sont semblables aux paramètres correspondants de la base de données recueillies. Elle combine les équations 2.43 et 2.45 afin d'obtenir le résultat suivant :

$$\sigma_U^2 = c^2 \Gamma^2(1 + 1/k) \left[ \frac{\Gamma(1 + 2/k)}{\Gamma^2(1 + 1/k)} - 1 \right] \quad (3.3a)$$

$$= c^2 [\Gamma(1 + 2/k) - \Gamma^2(1 + 1/k)] \quad (3.3b)$$

L'équation 3.3b est ensuite manipulée et introduite dans l'équation 2.44

$$\bar{U}^3 = c^3 \Gamma(1 + 3/k) \quad (3.4a)$$

$$= \left[ \frac{\sigma_U^2}{\Gamma(1 + 2/k) - \Gamma^2(1 + 1/k)} \right]^{3/2} \Gamma(1 + 3/k) \quad (3.4b)$$

L'équation 3.4b est par la suite développée afin d'obtenir la forme suivante :

$$\frac{\bar{U}^3}{\sigma_U^3} = \frac{\Gamma(1 + 3/k)}{[\Gamma(1 + 2/k) - \Gamma^2(1 + 1/k)]^{3/2}} \quad (3.5)$$

Pour déterminer l'estimation initiale de  $k$ , l'équation 3.1 est encore ici utilisée. Comme pour la méthode 1, on boucle l'équation précédente jusqu'à ce que les deux côtés de l'égalité répondent au critère d'erreur préalablement déterminé. La valeur de  $k$  résultante est ensuite utilisée pour déterminer le paramètre  $c$  à l'aide de l'équation suivante :

$$c = \left[ \frac{\overline{U^3}}{\Gamma(1 + 3/k)} \right]^{1/3} \quad (3.6)$$

### Méthode 3

Cette méthode de calcul génère une distribution de Weibull dont la vitesse moyenne ( $\overline{U}$ ) et la moyenne du cube de la vitesse ( $\overline{U^3}$ ) sont similaire aux paramètres correspondants de la plage de données analysée. Afin de déterminer la valeur de  $k$  on remplace l'équation 2.43 au cube dans l'équation 2.44 de la manière suivante :

$$\left. \begin{aligned} c &= \frac{\overline{U}}{\Gamma(1+1/k)} \\ \overline{U^3} &= c^3 \Gamma(1 + 3/k) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \overline{U^3} = \overline{U}^3 \left( \frac{\Gamma(1 + 3/k)}{\Gamma^3(1 + 1/k)} \right) \quad (3.7)$$

L'équation 3.7 est ensuite réarrangée de la façon suivante :

$$\frac{\overline{U^3}}{\overline{U}^3} = \frac{\Gamma(1 + 3/k)}{\Gamma^3(1 + 1/k)} \quad (3.8)$$

L'équation précédente est ensuite bouclée avec, encore ici, une valeur initiale de  $k$  déterminée en utilisant l'équation 3.1. Lorsqu'une valeur de  $k$  avec la précision voulue est trouvée, le paramètre  $c$  est fixé à l'aide de l'équation 2.43.

### Méthode 4

Cette dernière technique de calcul utilise la méthode du maximum de vraisemblance afin de déterminer les paramètres de la distribution de Weibull. Les paramètres  $k$  et  $c$  sont calculés, en utilisant directement les données temporelles, à l'aide des équations 3.9 et 3.10.



$$k = \left( \frac{\sum_{i=1}^N U_i^k \ln(U_i)}{\sum_{i=1}^N U_i^k} - \frac{\sum_{i=1}^N \ln(U_i)}{N} \right)^{-1} \quad (3.9)$$

$$c = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i^k \right)^{1/k} \quad (3.10)$$

Connaissant maintenant les facteurs de forme et d'échelle, peu importe la méthode utilisée, il est possible de connaître, à l'aide de l'équation 2.42 la probabilité d'occurrence de toutes vitesses de vent située dans la plage de mesure recueillie.

### 3.1.4 Analyse de l'influence de la température

Les données recueillies par les anémomètres installés sur la tour sont également manipulées afin de déterminer l'éventuelle influence que pourrait avoir la température ambiante sur leur fonctionnement. Pour ce faire, les données ayant passées les tests de contrôle de qualité sont classées en fonction de la température observée lors de l'enregistrement de chaque point.

Compte tenu de la taille de la base de données disponible, les points ont dû être classés en plages de 15°C, la première partant de 0°C.

Suite à ce tri, les mesures redondantes, c'est-à-dire les mesures effectuées par deux anémomètres à la même altitude ou par le même anémomètre branché sur de multiples enregistreurs de données, sont comparées entre elles sur les différentes plages températures.

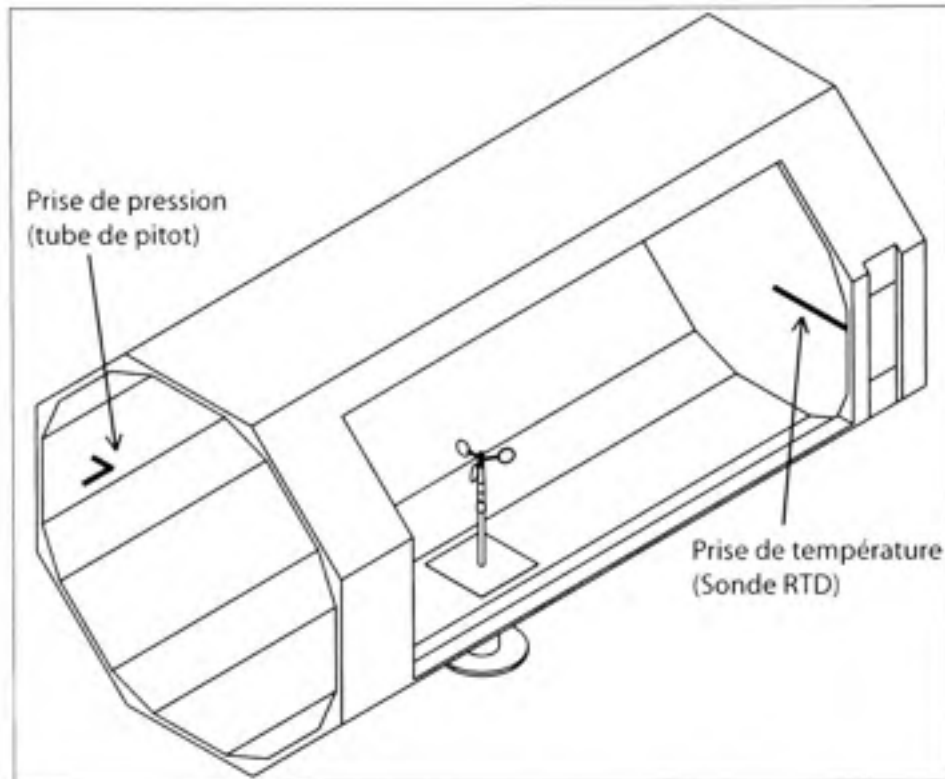
### 3.1.5 Analyse de l'influence de la vitesse verticale

Pour ce qui est de l'influence possible de la vitesse verticale de l'écoulement, la procédure est similaire à l'analyse en fonction de la température. Les points de mesure sont classés en fonction de la direction verticale de l'écoulement, soit, lorsque la vitesse est ascendante, descente ou nulle.

Comme précédemment, les mesures redondantes sont comparées entre elles afin de vérifier l'influence de la direction de la vitesse verticale sur les divers appareils.

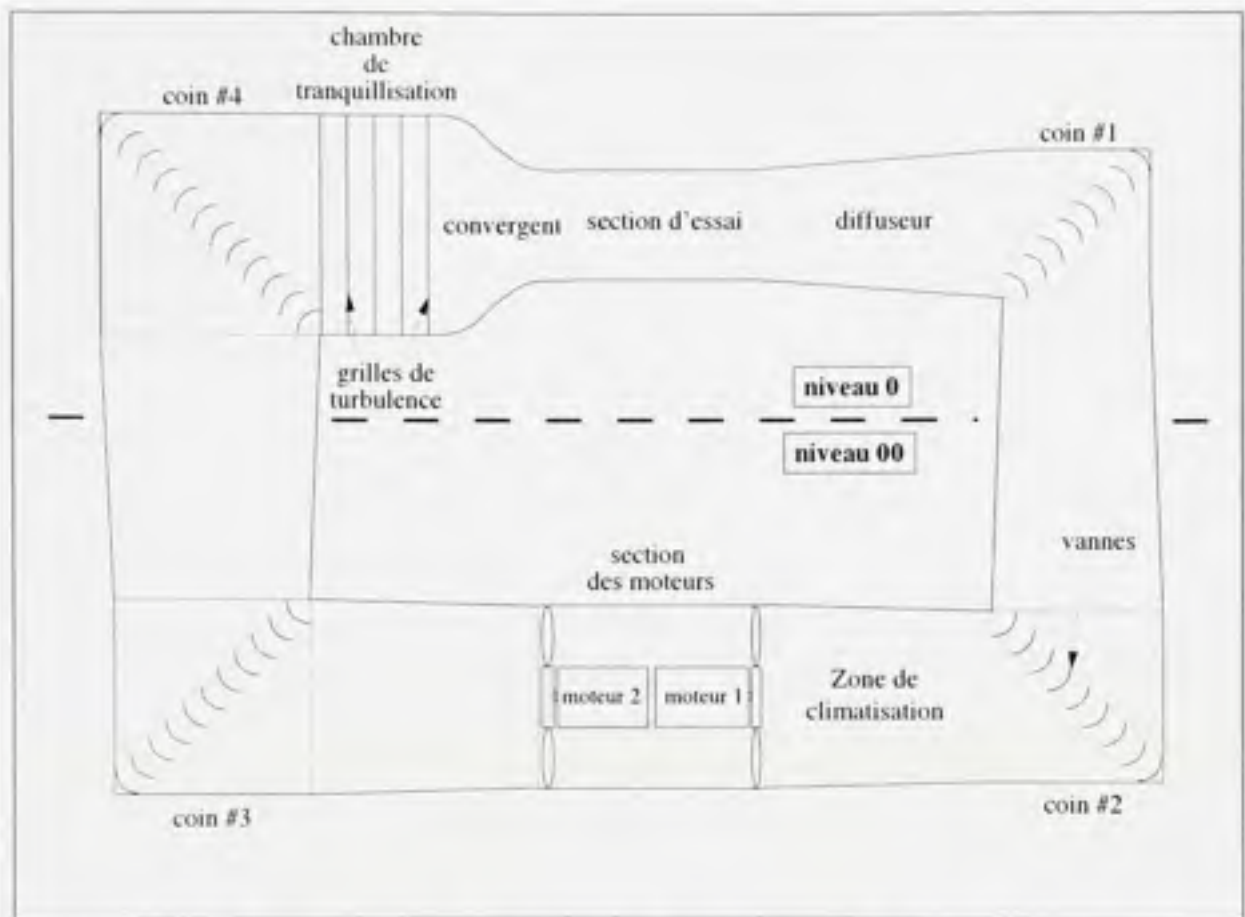
### 3.2 Tests et étalonnages en soufflerie

Cette seconde partie du projet regroupe toute la méthodologie portant sur la portion expérimentale du projet effectuée en soufflerie. La configuration utilisée pour les tests est présentée à la figure 30.



**Figure 3.1** *Esquisse de la section d'essai de la soufflerie*

La soufflerie (figure 31), située dans les locaux de l'Université Laval, fonctionne en circuit fermé et s'étend sur deux étages. La partie située au sous-sol abrite la motorisation et le système de climatisation. La portion située dans le laboratoire contient les filtres servant à redresser et nettoyer l'écoulement ainsi que la zone d'essai. Les sections métalliques de la soufflerie ainsi que les sections où la paroi est mince sont recouvertes d'isolant afin de réduire le transfert thermique avec l'air du laboratoire. La portion de soufflerie dans laquelle sont effectués les tests (figure 30) est d'un diamètre de 36 pouces et une longueur d'environ 72 pouces.



**Figure 3.2** *Vue d'ensemble de la soufflerie utilisée pour les tests. Représentation schématique, non à l'échelle. (Adaptation de Deslauriers, 1999)*

Source : Cette figure est tirée de Deslauriers, 1999 « Problématique reliée aux essais bidimensionnels de profils d'aile en soufflerie en présence de murs séparateurs » et correspond à la « Figure 2.1 : La soufflerie et ses principales composantes (note : représentation schématique pas à l'échelle » présentée en page 8 dans le document original.

Les installations utilisées ayant été modifiées, pour l'ajout du système de climatisation, peu de temps avant le début du projet, il s'avère nécessaire de vérifier la stabilité de l'écoulement, en vitesse et en température, avant d'effectuer toute prise de mesures à l'aide des anémomètres.

Les données de références utilisées sont recueillies à l'aide d'un ordinateur équipé d'une carte d'acquisition de données. Les tests en soufflerie s'étant échelonnés sur deux sessions, le matériel utilisé pour l'acquisition a changé entre les deux périodes de mesures. Les données des tests de stabilité des installations, effectués à la session d'automne 2006, ont été acquises à l'aide d'un ordinateur portable équipé d'une carte d'acquisition de données PCMCIA de série

E de National Instrument. Pour ce qui est des données obtenues à la session d'été 2007, elles ont été recueillies à l'aide d'un ordinateur de bureau équipé d'une carte d'acquisition National Instrument PCI-6251.

Pour la réception des signaux des instruments, une interface construite à l'aide du logiciel LabVIEW est utilisée pour chaque série de tests à effectuer.

### 3.2.1 Tests de stabilité

Afin de s'assurer de la qualité de l'écoulement dans la soufflerie, et donc la validité des mesures effectuées, il est essentiel de vérifier la stabilité de la vitesse et de la température dans la section d'essai.

Pour ce faire, la soufflerie et le contrôle de température sont mis en marche pour une période de plusieurs heures et les données de température et de vitesse sont recueillies en continu et enregistrées sous forme de moyennes par périodes de 5 secondes.

La figure 32 illustre l'interface graphique utilisée pour ces tests, le lecteur est invité à s'y référer pour le suivi de la procédure de test. Afin de s'assurer de la validité des analyses effectuées, les différentes séances de mesure sont toujours effectuées en utilisant la même méthodologie. Les étapes la composant sont dénombrées ci-dessous :

1. La pression atmosphérique est lue sur un baromètre au mercure de haute précision. La valeur est entrée dans le champ "Patm lue (mm Hg)";
2. La température ambiante est lue sur un thermomètre au mercure et entrée dans le champ "T (deg C)";
3. Le bouton "Patm lue" est enfoncé;
4. La soufflerie étant à l'arrêt, le bouton "Lancer la mesure des offsets" est enfoncé afin de mesurer le décalage dans le signal provenant du capteur de pression;
5. La soufflerie est mise en marche et la vitesse est réglée à l'aide de la mesure indiquée dans le champ "Vitesse initiale pitot (m/s)";
6. La prise de mesure est démarrée en appuyant sur le bouton "Vitesse OK". La vitesse et la température sont affichées à intervalles de 5 secondes dans les champs "Vitesse actuelle pitot (m/s)" et "Température actuelle 'C'";
7. La prise de mesures est arrêtée en enfonçant le bouton "Arrêt" et les données sont enregistrées dans un fichier en format texte;

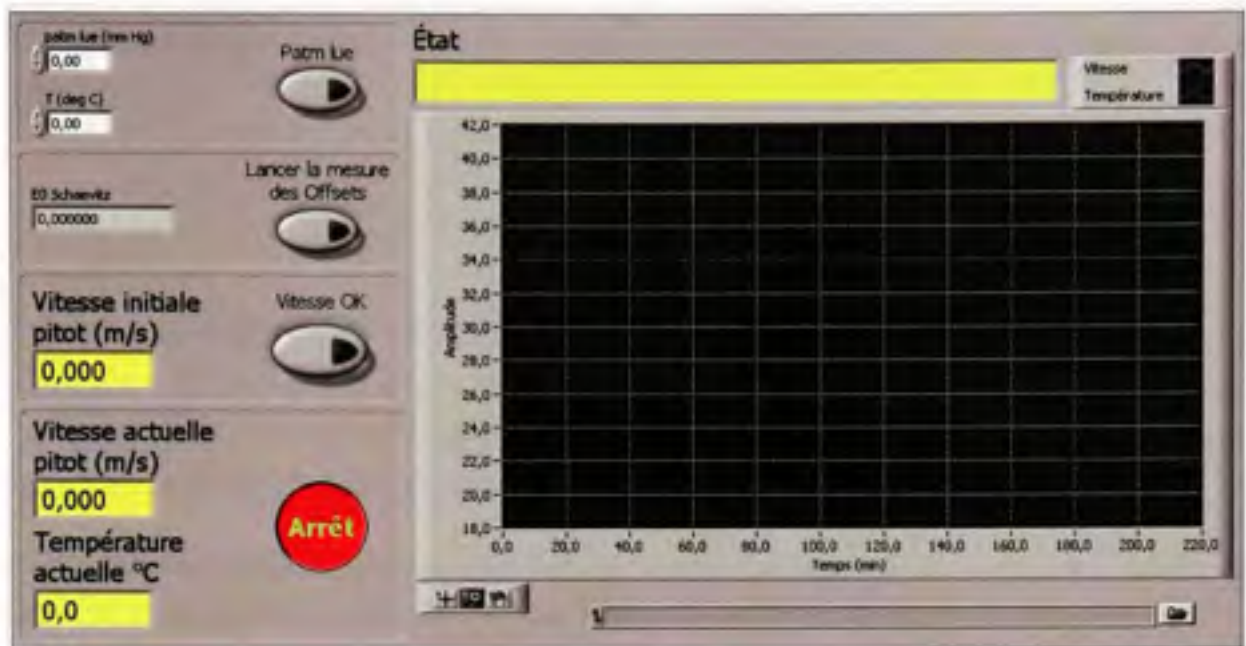


Figure 3.3 Interface Labview des tests de stabilité

Les trois premières étapes permettent d'effectuer la correction de la densité de l'air en fonction des conditions atmosphériques observées dans le laboratoire soit, la température,  $T_{luc}$ , et la pression,  $P_{luc}$ . L'équation 3.11 a été utilisée pour cet ajustement.

$$\rho = \frac{133.647}{286.9 (T_{luc} + 273.15)} \frac{1 + (1.84 \times 10^{-5} T_{luc})}{1 + (18.18 \times 10^{-5} T_{luc})} [1 + (11.56 \times 10^{-5} P_{luc})] \quad (3.11)$$

Les champs "Vitesse actuelle pitot (m/s)" et "Température actuelle (°C)" affichent, respectivement, la vitesse et la température présentes dans la soufflerie. Le signal de vitesse est dérivé de la mesure de la pression dynamique à l'aide d'un tube de pitot statique. Le capteur de pression utilisé, modèle P-3061 de marque Schaevitz, possède une capacité de mesure de 0-127 mm  $H_2O$  et présente une erreur statique combinée de moins de  $\pm 0.5\%$  de la pleine plage de sortie. La vitesse découlant du signal généré par les capteurs est obtenue à l'aide de l'équation 3.12.

$$U = \left[ 2 \frac{(-2.191(E - E_0)^2 + 242.779(E - E_0) + 2.8331)}{\rho} \right]^{1/2} \quad (3.12)$$



Le signal de température provient d'un thermistor dont la calibration est donnée par l'équation 3.13

$$T = -148.64105 \left[ \frac{E_{out}}{E_{in}} \right] + 96.50707 \quad (3.13)$$

Les tests de stabilité sont effectués sur une plage de mesure de 4 à 16 m/s, par saut de 4 m/s. Pour chaque période de test, la vitesse est réglée à une valeur donnée et la température, au départ à 20°C est réduite graduellement, par saut de 5°C, jusqu'à ce que la température prescrite ne puisse plus être atteinte.

Pour chaque période de mesure, un fichier en format texte est généré. La première section de ce fichier contient les renseignements suivants :

- Le décalage du capteur de pression ;
- La pression atmosphérique ;
- La température observée dans le laboratoire ;
- La densité corrigée ;
- La vitesse mesurée au début de la période de mesure.

En plus de ces informations, les données temporelles des paramètres qui suivent sont recueillies à toutes les 5 secondes :

- Le temps écoulé depuis le début de l'acquisition ;
- La tension du signal généré par le capteur de pression ;
- La tension d'entrée de la sonde de température ;
- La tension de sortie de la sonde de température ;
- La vitesse découlant de la mesure de pression ;
- La température présente dans la soufflerie.

### Stabilité de la température

Le critère de stabilité de température retenu consiste à déterminer, à partir du moment où la température semble atteindre un plateau, les différences entre la valeur moyenne de température observée sur ce plateau et le maximum et le minimum de température observée à partir de ce moment. Si une variation inférieure ou égale à 0.5°C est obtenue, au-dessus ou au-dessous de la température de stabilisation, cette température est considérée atteignable à cette vitesse.

### Stabilité de la vitesse

Le critère de stabilité utilisé pour la vitesse consiste à déterminer, pour chaque plateau de température, l'intensité de turbulence de l'écoulement observée à cette période (voir équation 1.7). Afin d'obtenir une mesure juste de vitesse, la valeur enregistrée est corrigée en fonction de la température dans la soufflerie,  $T_{sout}$ . L'équation 3.14 est utilisée pour effectuer cet ajustement, la température  $T_{lue}$  est la température entrée pour la correction de densité.

$$U_{corrigée} = U \sqrt{\frac{273.15 + T_{sout}}{273.15 + T_{lue}}} \quad (3.14)$$

Comme précisé à la section 1.4.2, le niveau d'intensité de turbulence acceptable pour effectuer des étalonnages est de moins de 2%. Cette valeur est donc le critère de stabilité retenu en ce qui concerne la vitesse d'écoulement.

La stabilité de l'écoulement de la soufflerie étant maintenant vérifiée, il convient de s'assurer de la similitude de vitesse à la position de la mesure de référence et à la position où l'anémomètre sera installé.

#### 3.2.2 Tests de calibration de la soufflerie

Afin de s'assurer de la correspondance entre la vitesse de référence et la vitesse lue par l'anémomètre, il est nécessaire d'effectuer une vérification entre les vitesses mesurées à ces deux positions.

Pour ce faire, un tube de pitot statique est installé à la position de l'anémomètre et des mesures sont effectuées afin d'effectuer une comparaison avec celles obtenues à la position référence. L'image 33 représente l'interface Labview utilisée pour la prise de données.



Figure 3.4 Interface Labview des tests de calibration de la soufflerie

La procédure de mesure adoptée pour ces tests est la suivante :

1. La pression atmosphérique est lue sur un baromètre au mercure de haute précision. La valeur est entrée dans le champ "Patm (mm Hg)".
2. La température ambiante est lue sur un thermomètre au mercure et entrée dans le champ "T (deg C)".
3. Le bouton "Conditions lues" est enfoncé. La densité corrigée est affichée dans le champ "Rho".
4. La soufflerie étant à l'arrêt, le bouton "Lancer la mesure des offsets" est enfoncé afin de mesurer le décalage dans le signal provenant du capteur de pression. Le signal du capteur est enregistré à une fréquence de 100Hz pendant une période de 10 secondes, la valeur moyenne obtenue est affichée dans le champ "E0 Baratron".
5. La soufflerie est mise en marche et la vitesse est réglé à l'aide de la mesure indiquée dans le champ "Vitesse pitot (m/s)".
6. Après une attente d'au moins une minute, le bouton "Vitesse OK" est enfoncé afin de démarrer l'acquisition du signal provenant du capteur de pression. Celui-ci est mesuré à un taux de 100Hz pendant 30 secondes. La moyenne est ensuite affichée dans le champ "Mesure au pitot de référence".
7. Les branchements du capteur de pression sont ensuite changés afin d'obtenir une lecture provenant du tube de Pitot temporaire. Une attente d'environ 30 secondes est respectée afin que le signal arrivant au capteur se stabilise.

8. Suite à cette attente, le bouton "Changement de pitot effectué" est enfoncé afin d'obtenir la lecture à la position du pitot temporaire. Les paramètres d'acquisition utilisés sont les mêmes qu'au point 4. La moyenne est ensuite affichée dans le champs "Mesure au pitot de temporaire".
9. La vitesse est ensuite réajustée et les étapes 6 à 8 sont répétées. Cette étape est répété jusqu'à ce que le bouton "Autre vitesse?" soit positionné à "Non". Dans ce cas, un fichier de sortie est généré après l'enregistrement.

Le fichier résultant contient, pour chaque réglage de vitesse, les tensions des signaux du capteur de pression résultant des deux tubes de pitot.

Il a été décidé de n'utiliser qu'un seul capteur de pression et d'en changer les connections dans le but d'éviter d'induire une variation de mesure causée par l'utilisation de deux capteurs différents. Le capteur de pression utilisé est un Baratron 120AD-00001RAU du fabricant MKS. La résolution minimale de cet appareil, en vitesse, considérant les caractéristiques de l'atmosphère standard au niveau de la mer, est de 0.0147m/s.

Les données obtenues sont représentées sous forme graphique, la vitesse à la position de référence étant donnée en fonction de celle à la position prévue pour l'anémomètre. Une équation est ensuite obtenue par régression linéaire des points de mesure, l'équation résultante permettra la correction des mesures effectuées lors des étalonnages et des tests de sensibilité des anémomètres.

### 3.2.3 Étalonnages des anémomètres

Les anémomètres utilisés pour les tests ont tous été fournis avec des équations de calibration mais, compte tenu de l'usure causée par leur utilisation dans la première partie du projet et l'incertitude quant à la précision des équations fournies, chacun d'entre eux devront être étalonnés à nouveau.

#### Aspects normatifs non respectés

La procédure d'étalonnage adoptée se base sur les exigences normatives présentées à la section 1.4. Toutefois, comme l'objectif premier du projet n'est pas d'obtenir une certification officielle de la soufflerie ou de l'étalonnage effectué, certains critères ont été négligés afin de permettre la complétion de l'expérimentation dans les temps disponibles.



Premièrement, le point précisant la nécessité d'effectuer la calibration d'un anémomètre référence avant de procéder à tout autre étalonnage a été omis car, l'installation utilisée n'étant pas dédiée à l'étalonnage d'anémomètres, aucun anémomètre référence n'était disponible.

Deuxièmement, l'uniformité de l'écoulement et le gradient horizontal de vitesse, dans la région couverte par le rotor des instruments, ne sont pas des éléments ayant été vérifiés. Les modifications apportées à la soufflerie ayant été effectuées dans la section inférieure, à l'opposé de la section d'essai, une influence sur l'écoulement dans la zone de mesure est peu probable. Si on se base sur les études effectuées précédemment dans ces installations, les dispositifs de redressement installés en amont de la position des anémomètres fonctionnent convenablement. La figure 34 illustre la variation de la pression dynamique dans le plan où l'anémomètre est situé. On remarque que, dans la zone centrale, où se situe le rotor de l'instrument, la variation de la pression est de l'ordre de 0% à  $\pm 0.4\%$ . Ces vérifications découlent de tests effectués dans le cadre du projet de maîtrise de M. Martin Deslauriers (1999), la section d'essai n'ayant pas été modifiée de façon notable depuis ce temps, ces informations s'avèrent toujours pertinentes.

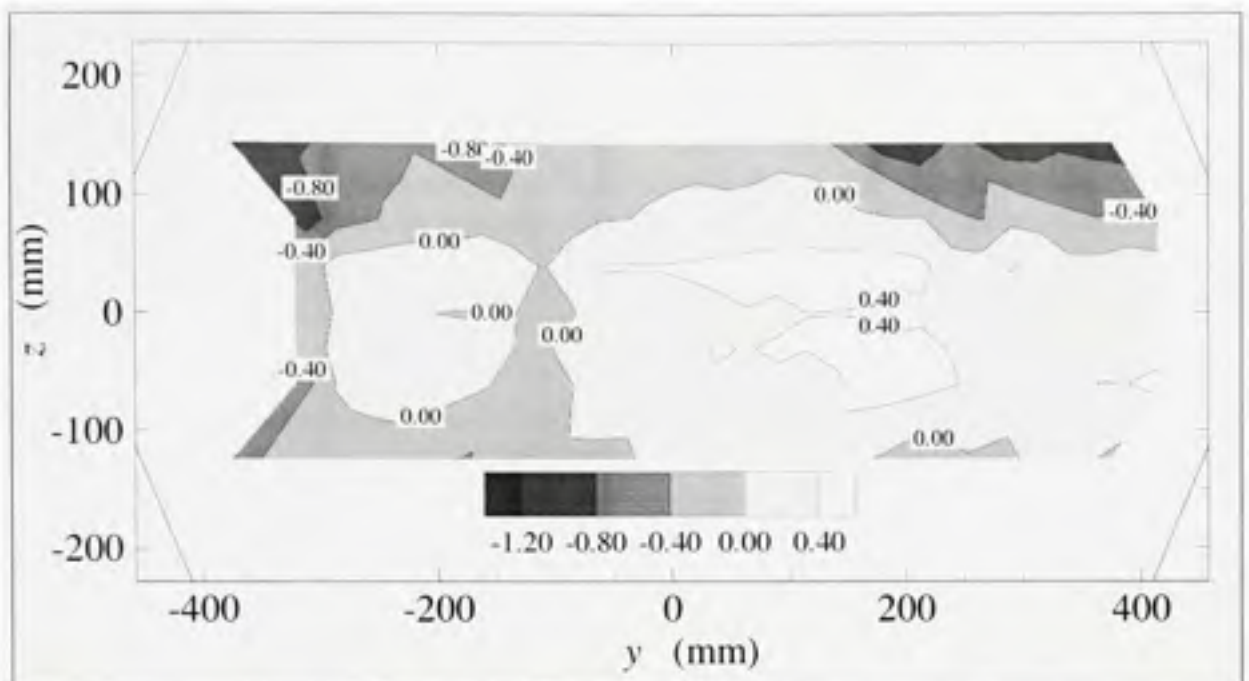
Pour terminer, les normes précisent que l'équation de calibration d'un anémomètre doit découler de cinq étalonnages. Considérant le nombre d'étalonnage à effectuer, les tests subséquents ainsi que la durée de disponibilité des installations, seulement quatre calibrations ont été effectuées.

### **Procédure adoptée**

L'anémomètre à calibrer est installé dans la section d'essai de façon à ce que le centre du rotor soit positionné au centre de la section de soufflerie. Pour ce faire, l'instrument est monté sur un tube vertical de diamètre similaire à celui utilisé en condition d'utilisation extérieure. L'aire frontale de l'ensemble est ensuite déterminée afin de s'assurer que le ratio de blocage soit dans les normes présentées à la section 1.4.2.

Avant le début de toute prise de données la soufflerie est amenée à une température stable de  $20 \pm 0.1^\circ\text{C}$ , température choisie pour les étalonnages de référence. Durant cette période, d'une durée d'au moins 30 minutes, l'anémomètre est en rotation afin de lui permettre de s'adapter à la température de l'écoulement. Lorsque la stabilité de la température est atteinte, la prise de données en vue de l'étalonnage peut commencer.





**Figure 3.5** *Stabilité de la pression dynamique dans le plan de mesure de l'anémomètre. (Adaptation de Deslauriers, 1999)*

Source : Cette figure est tirée de Deslauriers, 1999 « Problématique reliée aux essais bidimensionnels de profils d'aile en soufflerie en présence de murs séparateurs » et correspond à la « Figure 4.1 : Variations spatiales de la pression dynamique,  $\Delta q_{pl}$  (l'indice pl signifie plan) à travers la section d'essai (plan yz) » présentée en page 46 dans le document original.

Le capteur de pression utilisé étant limité à une pression dynamique de 1mmHg, correspondant, en conditions ambiantes standard, à une vitesse de 15m/s, la plage de vitesse recommandée par les normes ne peut être respectée. La plage de vitesse adoptée pour la détermination des étalonnages maîtres a donc été revue à la baisse, pour s'étendre de 3 à 15m/s.

Il est précisé, dans la littérature rattachée à la calibration d'anémomètres, que cette plage de mesure peut être parcourue par saut de 2m/s, en vitesse ascendante et descendante. La procédure retenue fait donc en sorte que la mesure s'effectue de 4 à 14m/s et de 15 à 3m/s, par bonds de 2m/s.

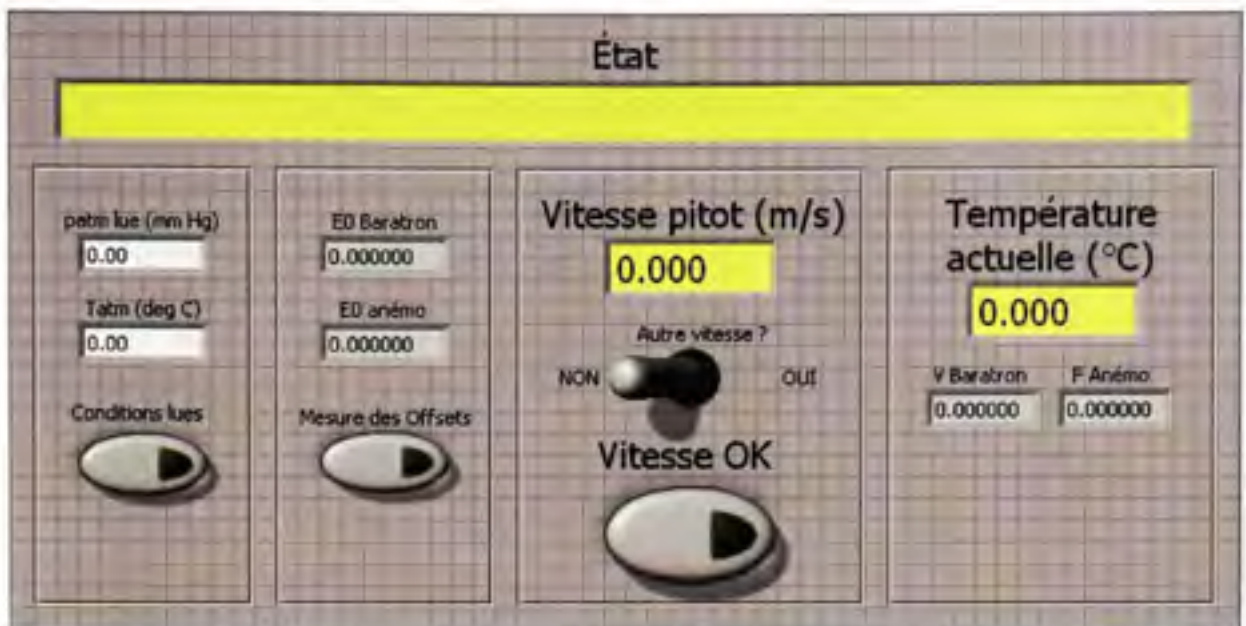
La figure 35 illustre l'interface utilisée pour les étalonnages et la procédure adoptée pour chaque point de mesure est présentée en détails ci-dessous :

1. La pression atmosphérique est lue sur le baromètre au mercure. La valeur est entrée dans le champ "Patm (mm Hg)".
2. La température ambiante est lue sur le thermomètre au mercure et entrée dans le champ "T (deg C)".
3. Le bouton "Conditions lues" est enfoncé.
4. La soufflerie étant à l'arrêt, le bouton "Lancer la mesure des offsets" est enfoncé afin de mesurer le décalage dans les signaux provenant du capteur de pression et de l'anémomètre. Ces signaux sont enregistrés à une fréquence de 100Hz pendant une période de 30 secondes, les valeurs moyennes obtenues sont affichées, respectivement, dans les champs "E0 Baratron" et "E0 anemo".
5. La soufflerie est mise en marche et la vitesse est réglée à l'aide de la mesure indiquée dans le champ "Vitesse pitot (m/s)".
6. Après une attente d'au moins une minute, le bouton "Vitesse OK" est enfoncé afin de démarrer l'acquisition des signaux provenant des différents instruments. Ceux-ci sont mesurés à un taux de 2000Hz pendant 30 secondes. Les moyennes sont ensuite affichées dans les champs "Température actuelle (°C)", "V Baratron" et "F Anémo".
7. La vitesse est ensuite réajustée et l'étape 6 est répétée. Cette opération est effectuée jusqu'à ce que le bouton "Autre vitesse ?" soit positionné à "Non". Dans ce cas, un fichier de sortie est généré après l'enregistrement.

Le fichier obtenu contient, pour chaque point de mesure, les informations suivantes :

- La tension du signal généré par le capteur de pression [V];
- La vitesse correspondant à la tension générée par le capteur de pression. Cette valeur est fonction du décalage du signal et de la densité corrigée [m/s];
- La fréquence du signal généré par l'anémomètre [Hz];
- La température observée dans la soufflerie [°C];
- La densité corrigée [Kg/m<sup>3</sup>].

Une analyse d'incertitude, comme présentée à la section 2.4 est effectuée sur l'étalonnage maître de chaque anémomètre.



**Figure 3.6** *Interface Labview des tests d'étalonnage des anémomètres*

Maintenant que l'on dispose, pour chaque instrument, d'un étalonnage à température fixe, il est possible de quantifier l'impact de la variation de température sur leur fonctionnement.

### 3.2.4 Tests de sensibilité aux variations de températures

Les tests de sensibilité aux variations de température ont pour but de repérer, parmi ceux testés, les instruments dont l'utilisation sur une grande plage de température pourrait induire des erreurs de mesure non négligeables. Pour ce faire, chaque instrument est soumis à différentes températures et vitesses de fonctionnement.

La plage de températures couverte dépend des conditions atmosphériques présente lors des tests, la capacité de réfrigération du système de contrôle de température y étant sensible. Dans les conditions présentes lors des tests, il a été possible d'effectuer les mesures sur une plage de températures variant de  $-5^{\circ}\text{C}$  à  $25^{\circ}\text{C}$ , par saut de  $5^{\circ}\text{C}$ .

Le but de ces tests n'étant pas de refaire des étalonnages complets, le nombre de vitesses auxquelles les mesures ont été effectuées a été réduit. L'objectif étant de parcourir grossièrement la plage recommandée pour les étalonnages, les vitesses de 3, 6, 9, 12 et 15 m/s ont été retenues.

L'interface Labview utilisée pour ces tests est la même que celle utilisée pour les étalonnages (voir figure 35). La prise de données s'effectue lorsque la température moyenne se situe dans un intervalle de  $\pm 0.25^{\circ}\text{C}$  de part et d'autre de la température cible. Pour chaque vitesse, un minimum de 10 points de mesure est recueilli.

La procédure adoptée pour obtenir ces données est détaillée ci-dessous :

1. La pression atmosphérique est lue sur le baromètre au mercure. La valeur est entrée dans le champ "Patm (mm Hg)".
2. La température ambiante est lue sur le thermomètre au mercure et entrée dans le champ "T (deg C)".
3. Le bouton "Conditions lues" est enfoncé.
4. La soufflerie étant à l'arrêt, le bouton "Lancer la mesure des offsets" est enfoncé afin de mesurer le décalage dans les signaux provenant du capteur de pression et de l'anémomètre. Ces signaux sont enregistrés à une fréquence de 100Hz pendant une période de 30 secondes, les valeurs moyennes obtenues sont affichées, respectivement, dans les champs "E0 Baratron" et "E0 anemo".
5. La soufflerie est mise en marche et la vitesse est réglé à l'aide de la mesure indiquée dans le champ "Vitesse pitot (m/s)".
6. Après une attente permettant la stabilisation de la température et de la vitesse, le bouton "Vitesse OK" est enfoncé afin de démarrer l'acquisition des signaux provenant des différents instruments. Ceux-ci sont mesurés à un taux de 2000Hz pendant 30 secondes. Les moyennes sont ensuite affichées dans les champs "Température actuelle (°C)", "V Baratron" et "F Anémo".
7. La vitesse est ensuite réajustée et l'étape 6 est répétée. Cette opération est effectuée jusqu'à ce que le bouton "Autre vitesse?" soit positionné à "Non". Dans ce cas, un fichier de sortie est généré après l'enregistrement.

Le fichier de sortie contient les mêmes informations que celui généré par la procédure d'étalonnage.

Les données recueillies sont ensuite comparées aux résultats attendus considérant les étalonnages obtenus précédemment. Il ne reste plus qu'à vérifier l'impact des branchements entre les anémomètres et les enregistreurs de données.



### 3.2.5 Tests d'impacts des connections avec les enregistreurs de données

Afin de vérifier une éventuelle influence des enregistreurs de données sur les mesures de vent recueillies, des données ont été recueillies en adoptant différentes configurations de branchement. Les configurations retenues sont présentées dans le tableau 3.1. On y remarque que l'anémomètre Risø P2546a n'a pu être utilisé en combinaison avec l'enregistreur de données Go-Logger. Ceci s'explique par le fait que l'enregistreur, dans la version testée, n'était pas compatible avec le signal généré par un anémomètre utilisant des contacts en ampoules.

Tableau 3.1

Configurations de branchement pour les tests d'influence des enregistreurs de données

Anémomètres	Enregistreurs de données			
	Symphonie	Nomad2	Go-Logger	Branchements multiples
Risø P2546a	oui	oui	non	Symphonie-Nomad2
NRG #40	oui	oui	oui	tous
NRG IcefreeIII	oui	oui	oui	tous
RMY-5103	oui	oui	oui	tous
RMY-5305	oui	oui	oui	tous

Pour chacune des configurations testées, le signal de l'anémomètre est acquisitionné en parallèle avec le(s) enregistreur(s) de données et la carte d'acquisition de l'ordinateur. Les procédures de mesure avec plusieurs enregistreurs en parallèle est possible car les impédances d'entrée des enregistreurs sont très élevées. Les mesures sont effectuées sur une période de 60 minutes à une température constante de 20°C et des vitesses stabilisées de 4 et 12m/s.

L'interface utilisée pour ces tests est, à une différence près, la même que pour les tests d'étalonnage (voir figure 35). Cette différence réside dans le fait que l'acquisition s'effectue en continu, les données sont toujours moyennées sur une période de 30 secondes, mais il n'est pas nécessaire d'appuyer sur "Vitesse OK" à chaque point. Pour mettre fin à l'acquisition et générer le fichier contenant les mesures, il suffit de positionner l'interrupteur "Autre vitesse ?" à "NON".



La procédure adoptée est aussi similaire à celle utilisée pour les étalonnages, il n'est cependant pas nécessaire de répéter l'étape d'ajustement de la vitesse. Le fichier généré contient également les mêmes informations.

Les mesures effectuées à l'aide de la carte d'acquisition de données sont ensuite rapportées sur des moyennes de 10 minutes, correspondant aux plages temporelles de mesure des enregistreurs de données. Les données obtenues sont ensuite comparées entre elles afin d'étudier les possibles variations de mesure.

## CHAPITRE 4

### RÉSULTATS ET OBSERVATIONS

Ce chapitre présente les résultats et les observations découlant des tests effectués selon les procédures présentées au chapitre 3. La première section présente les informations obtenues suite au traitement des données temporelles. Ensuite, viennent les résultats obtenus suite aux tests effectués sur la soufflerie. Par après, on retrouve les conclusions rattachées aux tests portant sur les différents anémomètres étudiés. Pour terminer, les observations concernant les tests d'impact des enregistreurs de données sont exposées.

#### 4.1 Résultats de l'analyse des données temporelles

Ces résultats découlent d'analyses effectuées sur les données temporelles recueillies, du 1<sup>er</sup> novembre 2005 au 31 août 2006, par la tour de mesure présentée à la section 3.1.1. Les comparaisons (voir section 3.1.2) devant s'effectuer sur des plages temporelles semblables, les périodes disponibles pour chacune de celles-ci sont restreintes aux mesures effectuées aux dates présentées au tableau 4.1.

Tableau 4.1

Plages temporelles utilisées pour les comparaisons

<b>Comparaisons sur l'enregistreur NRG Symphonie</b>	
NRG #40 (20m) vs Risø P2546a (20m)	01/11/05 13h10 ⇒ 25/11/05 13h50 01/02/06 00h00 ⇒ 06/02/06 08h50
NRG #40 (18m) vs RMY-5103 (18m)	03/03/06 00h00 ⇒ 12/07/06 08h50 01/08/06 00h00 ⇒ 31/08/06 23h50
<b>Comparaisons entre les trois enregistreurs</b>	
NRG #40 (20m)	17/05/06 09h20 ⇒ 02/06/06 15h10
NRG #40 (18m)	

Des problèmes dans le fonctionnement de certains enregistreurs de données ont fait en sorte que la période disponible pour les comparaisons des lectures entre ceux-ci est très limitée. Excluant les données rejetées par le contrôle de qualité, la banque de données disponible couvre une période de 366 heures, en période estivale.

Si l'on compare avec la plage disponible pour les comparaisons des instruments branchés sur l'enregistreur NRG Symphonie, couvrant une période d'environ 4600 heures de données, s'échelonnant de novembre à août, on constate une plus grande diversité climatique dans les informations recueillies.

Les implications de cette grande différence, en terme de quantité de données disponible, devront donc être prises en considération lorsque des parallèles entre ces deux groupes de comparaisons devront être faits.

De plus, après analyse des traces temporelles des vitesses de vent obtenues sur les trois enregistreurs, il a été constaté qu'un décalage était présent. Suite à cette constatation, les données ont été synchronisées afin de pouvoir effectuer des comparaisons sur les mêmes périodes temporelles. Les mesures recueillies par l'enregistreur Ohmega présentaient un retard de 1 point de mesure (10 minutes) en comparaison avec celles de l'enregistreur NRG. Si l'on compare avec la même référence, on observe, pour l'enregistreur SecondWind, un retard de 7 points de mesure (70 minutes).

Toutefois, même après ce réajustement, il est possible que les signaux ne soient pas parfaitement synchronisés. Les données étant disponibles sous forme de moyennes sur 10 minutes, il est possible qu'une désynchronisation de l'ordre de quelques minutes subsiste. Cette hypothèse devra donc être considérée lors de l'interprétation des résultats.

Pour terminer, un bémol est à apporter aux résultats découlant de l'enregistreur de données Ohmega. Des réserves ont été soulevées par le manufacturier quant aux résultats obtenus à l'aide de leur enregistreur. L'appareil a subi quelques mises à jour depuis sa mise en service et la version utilisée ne comporte pas ces modifications. Celles-ci sont de deux types, dans un premier temps, le filtre bas voltage a été modifié afin de permettre une lecture plus juste des vitesses de vent inférieures à 2m/s. La seconde modification consiste en la mise en place d'un filtre hautes fréquences afin d'atténuer la présence de bruit électrique et autres phénomènes qui peuvent affecter les canaux d'entrée.

#### 4.1.1 Distributions de vent obtenues

Les résultats présentés à cette section exposent les statistiques et les distributions de vent obtenues suite au contrôle de qualité des données.

#### Comparaison sur l'enregistreur NRG Symphonie

Après analyse des données éligibles aux comparaisons des divers instruments, des informations statistiques de base ont pu être calculées. Le tableau 4.2 présente le taux de récupération, la vitesse moyenne ( $\bar{U}$ ), la moyenne du cube de la vitesse ( $\bar{U}^3$ ) et l'écart-type ( $\sigma_{\bar{U}}^2$ ) des observations.

Tableau 4.2

Comparaison des informations statistiques sur les données recueillies à l'aide de l'enregistreur NRG Symphonie

	NRG#40 (20m)	Risø P2546a	NRG#40 (18m)	RMY-5103
Taux de récupération des données (%)	94.71	92.84	93.88	92.93
$\bar{U}$ (m/s)	4.21	4.11	4.01	3.78
$\bar{U}^3$ (m <sup>3</sup> /s <sup>3</sup> )	147.04	135.83	133.03	114.24
$\sigma_{\bar{U}}^2$ (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	2.24	2.16	2.24	2.14

À la lecture des résultats, on remarque que le taux de récupération est très similaire d'un instrument à l'autre. Un taux moyen d'environ 93.5% a été obtenu, ce qui donne une période de comparaison de l'ordre de 4300 heures.

Si l'on compare les résultats découlant des mesures effectuées à l'aide des instruments positionnés à 20 mètres, le NRG#40 et le Risø P2546a, on observe des différences appréciables. La variation de lecture, pour la vitesse moyenne  $\bar{U}$ , est d'environ 2.5% et, pour ce qui est du potentiel énergétique de l'écoulement mesuré ( $\bar{U}^3$ ), celle-ci passe à un peu plus de 8%.

Pour ce qui est du parallèle entre les mesures des anémomètres NRG#40 et RMY-5103, la variation est encore plus importante. La différence de mesure de vitesse moyenne  $\bar{U}$  est d'ap-

proximativement 6%, tandis que la variation de potentiel énergétique se chiffre à près de 16,5%.

Si maintenant ces valeurs sont utilisées pour déterminer les paramètres de Weibull reflétant la distribution de vent observée, on obtient, considérant les méthodes détaillées à la section 3.1.3, les facteurs présentés à la table 4.3. Les figures 36 et 37 illustrent les histogrammes obtenus suite au traitement des données. Les courbes visibles sur ces figures représentent les distributions de Weibull reflétant les mesures effectuées.

Tableau 4.3

Comparaisons des distributions de Weibull obtenues sur l'enregistreur Symphonie

		NRG#40 (20m)	Risø P2546a	NRG#40 (18m)	RMY-5103
Méthode 1	k	1.959	1.985	1.855	1.831
	c	4.753	4.638	4.512	4.256
Méthode 2	k	1.967	2.004	1.855	1.838
	c	4.772	4.678	4.512	4.273
Méthode 3	k	1.945	1.954	1.856	1.820
	c	4.752	4.636	4.512	4.254
Méthode 4	k	1.974	2.016	1.859	1.843
	c	4.761	4.653	4.515	4.261
Moyenne	k	1.961	1.990	1.856	1.833
	c	4.759	4.651	4.513	4.261

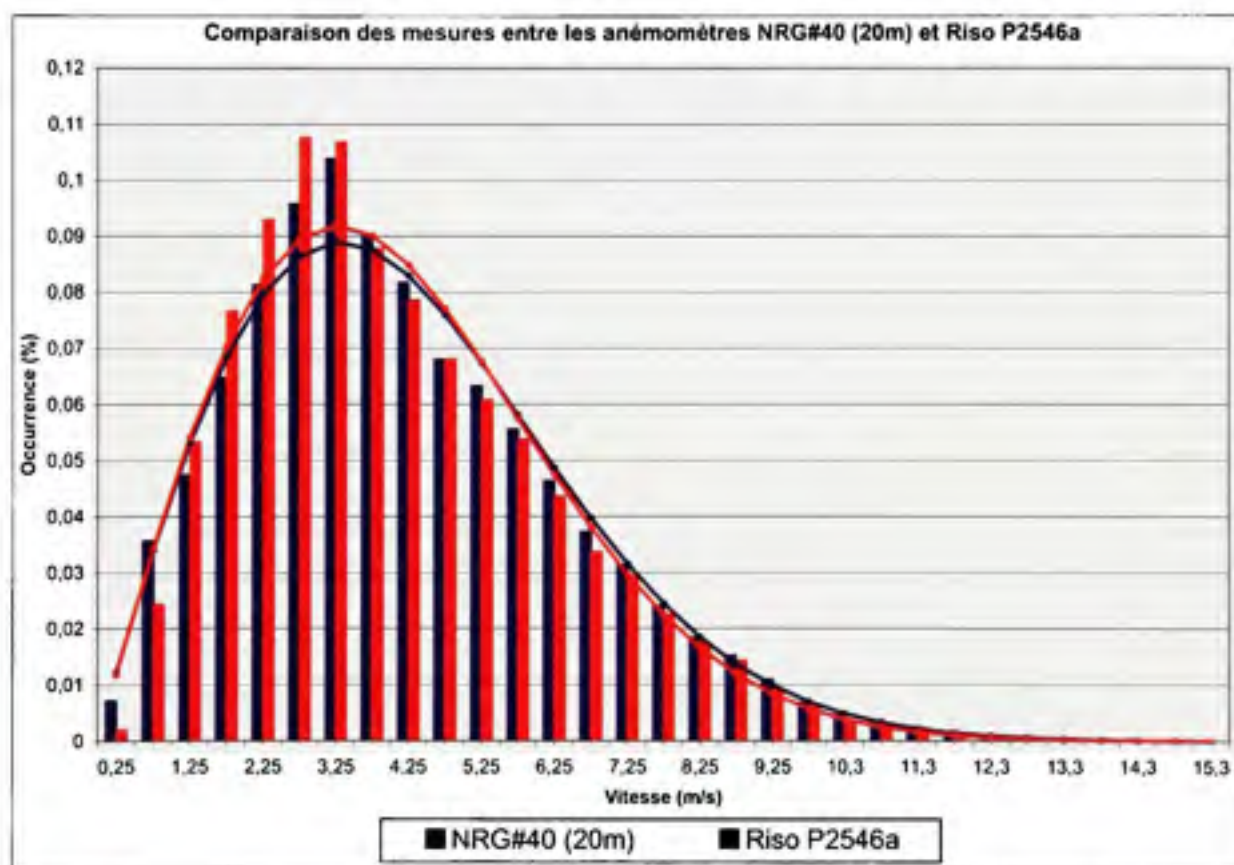
Si l'on s'attarde, premièrement, à l'interprétation des différences observées au tableau 4.2, il est probable que celles-ci soient explicables, du moins en grande partie, par le fait que les vitesses mesurées sont relativement basses. La vitesse moyenne sur le site étudié se situe aux environs de 4m/s, ce qui est très bas si on considère la plage généralement utilisée pour l'étalonnage, de 4 à 16m/s.

Il est reconnu que les régressions linéaires utilisées pour représenter le comportement des anémomètres n'est plus valide à des vitesses inférieures à environ 1m/s car un comportement non linéaire s'installe. De ce fait, dépendamment de la sensibilité de l'instrument à basse vitesse, la mesure de vitesse moyenne s'en trouve biaisée. La différence plus marquée entre l'anémomètre NRG#40 et l'anémomètre RMY-5103 est possiblement explicable par une plus grande incertitude de mesure à basse vitesse avec les appareils de type hélice/girouette. Les

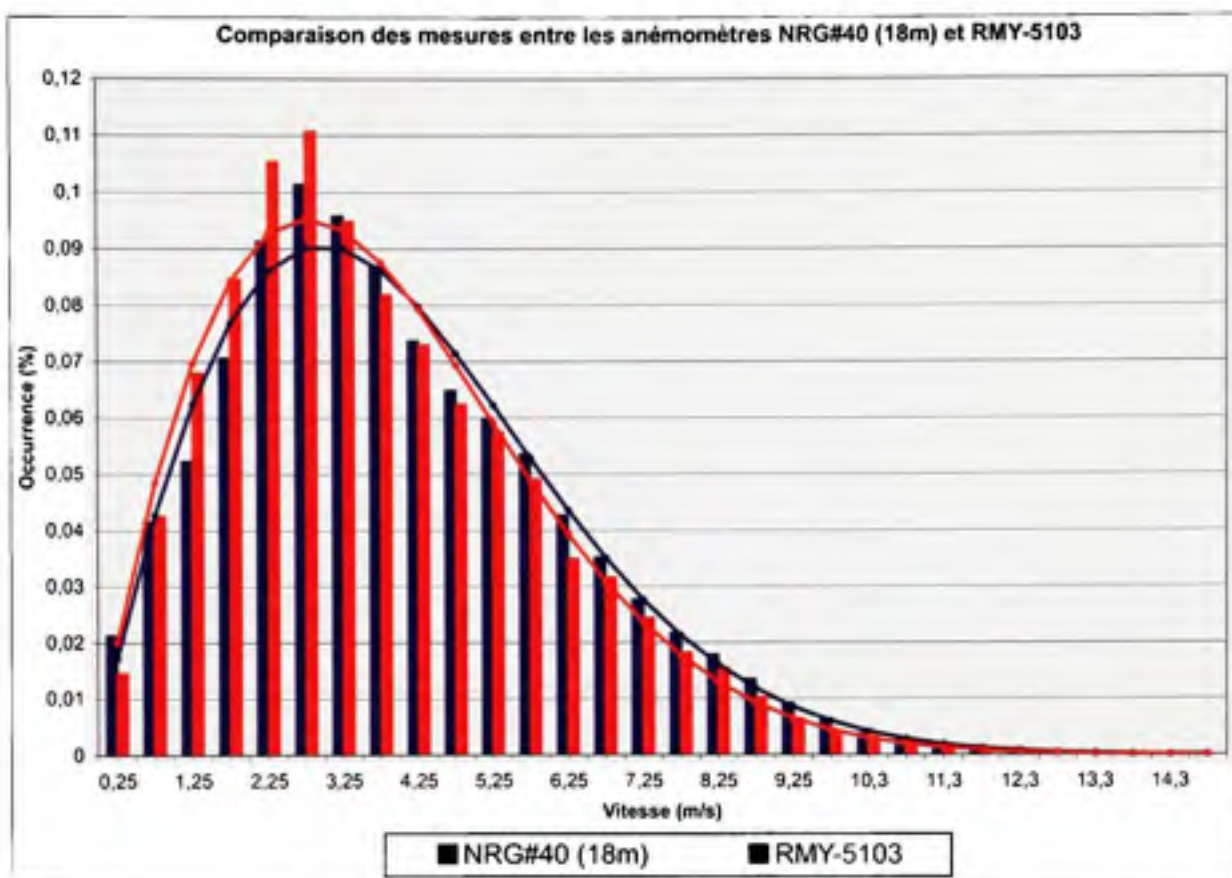


anémomètres à hélice de ce type devant se maintenir alignés dans le vent, il est possible que, à faible vitesse, la réponse de la girouette aux changements d'orientation soit plus lente. La vitesse mesurée sera donc inférieure à la vitesse réelle, ce qui est observé dans les résultats obtenus.

Pour ce qui est des différentes distributions de Weibull obtenues, la variation d'un instrument à l'autre s'explique par les différences entre les paramètres statistiques utilisés. Pour chacun des paramètres, la différence maximale moyenne entre les quatre méthodes est d'environ 1.5% et 0.5%, respectivement pour les valeurs de  $k$  et  $c$ . Cette différence ayant une répercussion très faible sur l'apparence de la courbe, à l'échelle considérée, il a été choisi de représenter la distribution basée sur la valeur moyenne des deux paramètres.



**Figure 4.1** Graphique de comparaison des distributions de vitesse entre les anémomètres NRG#40 (20m) et Riso P2546a



**Figure 4.2** Graphique de comparaison des distributions de vitesse entre les anémomètres NRG#40 (18m) et RMY-5103

À la lecture des graphiques illustrant les distributions de vitesse on observe, dans tous les cas, une très bonne correspondance entre les histogrammes et les courbes de Weibull. Si l'on se fie aux données recueillies, l'utilisation des courbes calculées entraîneraient une sous-évaluation de la ressource au maximum d'occurrence et une légère sous-évaluation dans la plage d'environ 4m/s à 5m/s. Par contre, aux vitesses plus élevées, celles d'intérêt pour la génération d'énergie, la correspondance est excellente. Sur la figure 37, on remarque un léger décalage, vers la gauche, de la courbe de l'anémomètre RMY-5103, s'expliquant, comme exposé précédemment, par un retard dans la réorientation de l'instrument.

### Comparaison entre les trois enregistreurs

Similairement à la section précédente, le tableau 4.4 présente les informations statistiques de base. Dans le cas présent, ces valeurs découlent de la base de données utilisée pour les comparaisons entre les trois enregistreurs.

À la lecture de ces résultats, on constate que le taux de récupération de données de l'enregistreur Ohmega est, dans les deux cas, inférieur d'environ 5% aux deux autres. Après observation des données de cet enregistreur, il a été constaté que la présence de valeur nulle de vitesse était beaucoup plus importante que pour les enregistreurs NRG et SecondWind. Le travail de traitement de données effectué par l'enregistreur Ohmega semble donc contribuer à une sous évaluation des mesures à basse vitesse. Considérant un taux de récupération de données moyen d'environ 95%, on obtient une base de données d'une durée approximative de 348 heures.

Tableau 4.4

Comparaison des informations statistiques sur les données recueillies à l'aide des trois enregistreurs

	NRG#40 (20m)			NRG#40 (18m)		
	NRG	Ohmega	SecondWind	NRG	Ohmega	SecondWind
Taux de récup. des données (%)	97.59	92.81	96.77	96.36	90.71	95.77
$\bar{U}$ (m/s)	3.91	3.94	3.90	3.67	3.72	3.65
$\bar{U}^3$ (m <sup>3</sup> /s <sup>3</sup> )	100.08	105.28	100.48	89.62	94.88	89.76
$\sigma_U^2$ (m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	1.79	1.90	1.82	1.83	1.93	1.87

Les valeurs obtenues pour la vitesse moyenne sont, comme attendues, légèrement inférieures pour l'instrument situé au premier niveau de mesure. Dans les deux cas, la variation entre les résultats d'évaluation des trois enregistreurs est relativement faible. Les résultats obtenus sont sensiblement les mêmes pour les enregistreurs NRG et SecondWind. Par contre, ceux obtenus à l'aide de l'appareil Ohmega présentent des valeurs légèrement supérieures, environ 1% et 2%, à 20m et 18m, respectivement.

En ce qui concerne le potentiel énergétique de l'écoulement ( $U^3$ ), on observe une variation maximale quasi identique dans les deux cas. Encore ici, les enregistreurs des compagnies NRG et SecondWind performant de façon similaire et celui de Ohmega présente une surévaluation moyenne du potentiel éolien d'environ 5.5%.

Comme précédemment, ces valeurs sont utilisées afin de déterminer, selon quatre méthodes différentes, les paramètres de la distribution de Weibull correspondant à la distribution de vent observée. Le tableau 4.5 présente les valeurs obtenues pour les paramètres  $k$  et  $c$  et les figures 38 et 39 illustrent les correspondances entre ces distributions et les données recueillies.

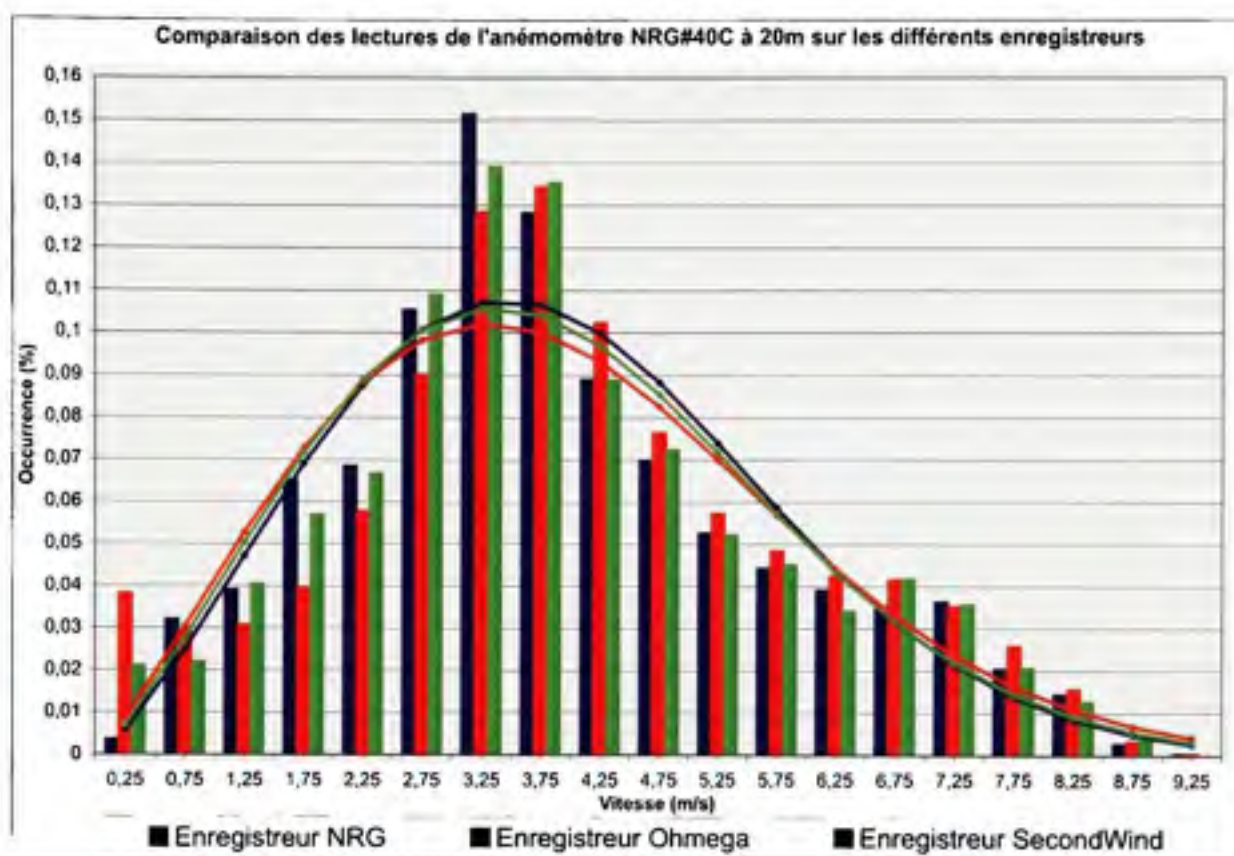
Les variations entre les paramètres, d'un instrument ou d'un enregistreur à l'autre, étant assimilable aux variations dans les statistiques rattachées aux données, il convient d'observer les variations entre les méthodes de calcul. Le facteur d'échelle,  $c$ , présente une variation maximale moyenne d'environ 1%, ce qui reste dans les mêmes ordres de grandeur que les résultats de la section précédente. Par contre, la même variation pour le facteur de forme,  $k$ , est d'environ 5%. Cette variabilité est plus importante que précédemment mais, encore ici, il a été choisi d'utiliser une moyenne de ces paramètres, l'apparence de la courbe n'étant que peu influencée.

Tableau 4.5

Comparaisons des distributions de Weibull obtenues sur les trois enregistreurs

		NRG#40 (20m)			NRG#40 (18m)		
		NRG	Ohmega	SecondWind	NRG	Ohmega	SecondWind
Méthode 1	k	2.316	2.180	2.262	2.103	2.017	2.050
	c	4.412	4.446	4.400	4.145	4.193	4.124
Méthode 2	k	2.319	2.156	2.255	2.098	1.990	2.035
	c	4.416	4.401	4.389	4.136	4.141	4.097
Méthode 3	k	2.311	2.232	2.276	2.114	2.066	2.077
	c	4.412	4.445	4.400	4.145	4.194	4.125
Méthode 4	k	2.322	2.075	2.190	2.101	1.933	1.952
	c	4.414	4.402	4.373	4.144	4.157	4.084
Moyenne	k	2.317	2.161	2.246	2.104	2.002	2.029
	c	4.413	4.423	4.390	4.143	4.171	4.107





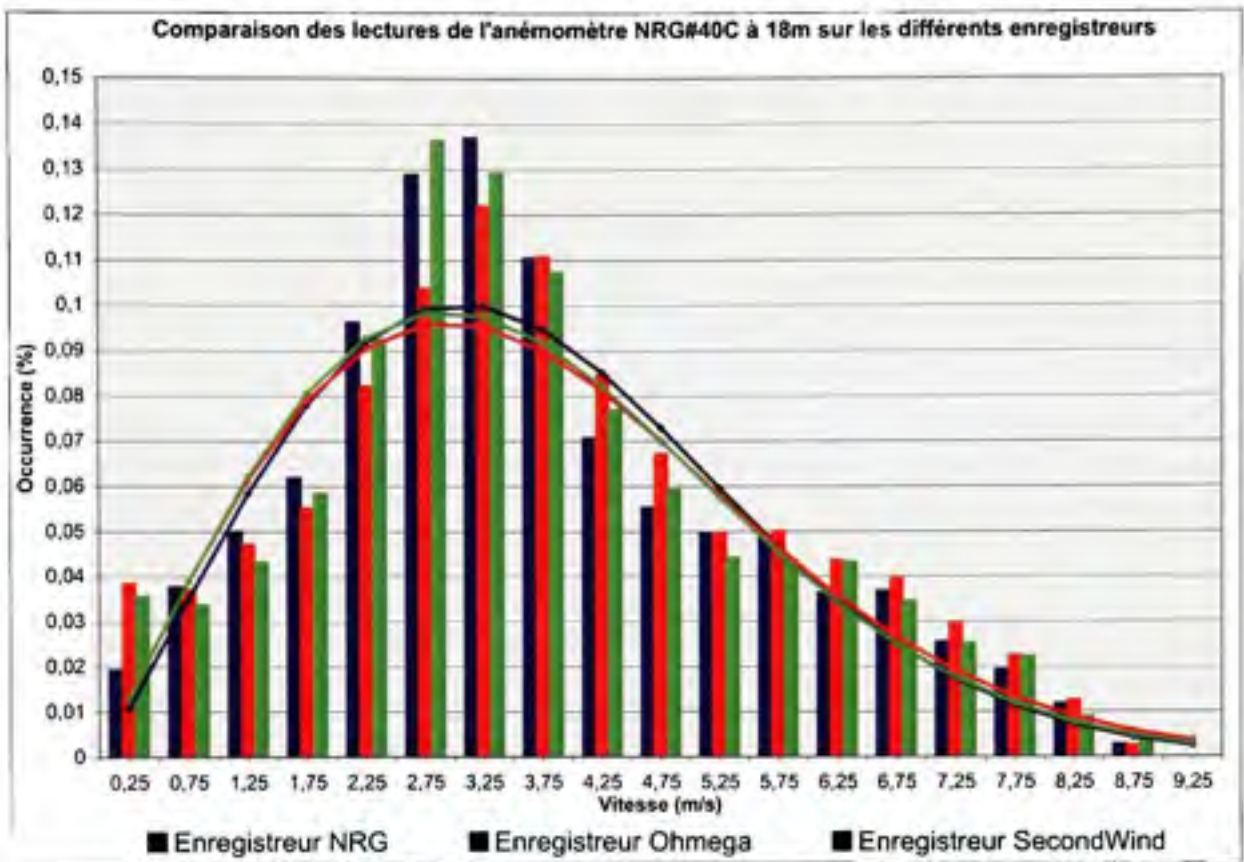
**Figure 4.3** *Graphique de comparaison des distributions de vitesse de l'anémomètre NRG#40 à 20m*

À l'analyse des figures 38 et 39, on remarque immédiatement une corrélation beaucoup moins bonne entre les courbes et les histogrammes. Celle-ci semble s'améliorer pour les vitesses supérieures à 5m/s, mais elle n'est vraiment pas aussi bonne que pour les comparaisons effectuées seulement sur l'enregistreur NRG. On observe également que, pour la classe centrée à 0.25m/s, sur la figure 38, l'occurrence est beaucoup plus grande pour l'enregistreur Omega.

Les variations observées dans les distributions de vent obtenues sur les trois enregistreurs de données à l'étude peuvent être expliquées par trois constatations.

Premièrement, la taille de la base de données utilisée est restreinte à environ 2 semaines, ce qui est relativement court si l'on compare à la plage de données utilisées pour les comparaisons entre les instruments redondants.





**Figure 4.4** *Graphique de comparaison des distributions de vitesse de l'anémomètre NRG#40 à 18m*

Deuxièmement, les vitesses de vent sur le site étudié sont relativement basses, la façon dont les enregistreurs traitent ces vitesses vient donc affecter les distributions mesurées. Ces appareils étant conçus pour l'utilisation dans un contexte éolien, où les vitesses d'intérêt sont supérieures à 4m/s, il est probable que la manière dont les données à faible vitesse, disons inférieures à 1m/s, sont traitées soit déficiente.

Troisièmement, les réglages de l'acquisition des données, déterminés lors de l'installation de la tour, ne sont pas semblables sur les trois enregistreurs. La résolution des données recueillies diffère d'un appareil à l'autre. L'enregistreur Omega est réglé pour enregistrer les données à une décimale, celui de la compagnie NRG est réglé sur une résolution de deux décimales et l'appareil de la compagnie SecondWind enregistre ses résultats à six décimales. Les valeurs n'étant pas arrondies au même nombre de décimales, les informations statistiques découlant de ces données s'en trouvent affectées.

Dans le cas des comparaisons de distributions de vent, compte tenu du fait que les enregistreurs sont considérés indépendamment, le décalage possible des signaux est sans effet sur les résultats observés.

#### **4.1.2 Influence de la température sur les données temporelles**

Cette section présente les comparaisons d'instruments en fonction de la température à laquelle les mesures ont été prises. Les résultats sont présentés en effectuant des régressions linéaires entre les points de mesure pour lesquelles les résultats devraient être semblables. Les figures illustrant ces comparaisons ainsi que les erreurs liées aux régressions utilisées sont présentées à l'annexe I.

##### **Comparaison sur l'enregistreur NRG Symphonie**

Les données disponibles pour ces comparaisons ont permis de vérifier le comportement des instruments sur trois plages de température :  $-15^{\circ}\text{C}$  à  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}$  à  $15^{\circ}\text{C}$  et plus de  $15^{\circ}\text{C}$ . Les figures présentées aux sections I.1.1 et I.1.2 de l'annexe I illustrent les résultats obtenus,

Les comparaisons entre les anémomètres connectés à l'enregistreur NRG présentent, aux deux niveaux de mesure et sur les trois plages de température considérées, des coefficients de corrélation très élevés et similaires. Ce faisant, l'erreur liée à l'utilisation de la régression linéaire (voir section 2.4.1) est très faible, une valeur moyenne d'environ 0.008% a été calculée, pour une plage de vitesse allant de 4 à 25 m/s. Aux deux niveaux de mesure, l'incertitude de régression est similaire, environ 0.005%, pour les températures supérieures à  $0^{\circ}\text{C}$ , alors que, pour les températures sous le point de congélation, cette même incertitude présente une valeur presque trois fois plus élevée, environ 0.014%. Cette faible erreur combinée au nombre élevé de points de mesure porte à croire que les droites présentées au tableau 4.6 illustrent bien le comportement des instruments,

Dans le cas où les instruments redondants mesureraient la vitesse du vent de façon identique, les droites seraient de pente unitaire et passeraient par l'origine, mais on constate, selon les résultats obtenus, que ce n'est pas le cas. Les différences de mesure générées par l'utilisation de ces régressions sont illustrées aux figures 49 et 51. Compte tenu du potentiel énergétique peu élevé des vitesses inférieures à 4m/s et de l'incertitude élevée de la mesure de certains instruments à basses vitesses, les analyses qui suivent négligent cette plage.

Considérant les deux niveaux de mesure observés, et une plage de vitesses supérieures à 4m/s, les différences de mesure découlant de l'utilisation des régressions sont d'ordre de grandeur similaire.

Tableau 4.6

Régressions linéaires résultant des comparaisons de mesures entre les anémomètres redondant en fonction de la température

	Température (°C)	Régression linéaire	R <sup>2</sup>
NRG#40 (20m) vs Risø P2546a (figure 48)	-15 à 0	$V_{\text{Risø P2546a}} = 0.952V_{\text{NRG\#40 (20m)}} + 0.366$	0.995
	0 à 15	$V_{\text{Risø P2546a}} = 0.965V_{\text{NRG\#40 (20m)}} + 0.201$	0.995
	15 et plus	$V_{\text{Risø P2546a}} = 0.965V_{\text{NRG\#40 (20m)}} + 0.099$	0.996
NRG#40 (18m) vs RMY-5103 (figure 50)	-15 à 0	$V_{\text{RMY-5103}} = 0.959V_{\text{NRG\#40 (18m)}} + 0.091$	0.996
	0 à 15	$V_{\text{RMY-5103}} = 0.957V_{\text{NRG\#40 (18m)}} + 0.039$	0.995
	15 et plus	$V_{\text{RMY-5103}} = 0.922V_{\text{NRG\#40 (18m)}} + 0.219$	0.995

À l'analyse des trois courbes de résultats des instruments positionnés à 20m, on observe que, pour des vitesses supérieures à 12m/s la différence de mesure est sensiblement la même. Celles-ci se situent toutes dans une plage inférieure à 1%. Les courbes couvrant la plage de température de -15°C à 15°C présentent un comportement similaire. Négligeant les faibles vitesses, la mesure obtenue à l'aide de l'anémomètre Risø est généralement inférieure à la mesure effectuée avec l'appareil NRG. Cette observation est toutefois inversée pour les vitesses de 4-7.5m/s, pour la plage de -15°C à 0°C, et de 4-6m/s, pour les températures variant de 0°C à 15°C. Si on considère la moyenne sur la plage 4-25m/s, la différence de mesure tend à augmenter avec la température. Elle passe de 1.5% à 2.6% entre les courbes de température minimales et maximales. La tendance générale est toutefois à une mesure plus faible de l'anémomètre Risø.

Pour ce qui est des instruments situés à 18m, la différence de mesure est très similaire pour les températures de -15°C à 15°C. La courbe rattachée aux températures supérieures présente

toutefois une différence de mesure nettement plus importante. Pour les trois courbes, et pour toute la plage de vitesse considérée, l'anémomètre NRG affiche une mesure de vitesse supérieure. Encore ici, la différence moyenne de mesure augmente avec la température. Elle passe de 3.3% à 5.8% entre les courbes de température minimales et maximales.

De façon globale, considérant la plage de température observée et l'incertitude de mesure des instruments, on ne peut conclure sur une influence marquée de la température sur la comparaisons des anémomètres redondants utilisés. Également, l'appareil NRG#40 mesure, en moyenne, une vitesse de vent supérieure aux anémomètres Riso P2546a et RMY-5103. Toutefois, ne connaissant pas la vitesse réelle de l'écoulement, on ne peut conclure sur les implications de cette observation.

### **Comparaison entre les trois enregistreurs**

Les données disponibles pour ces comparaisons ont permis de vérifier le comportement des instruments pour seulement deux plages de température : 0° à 15°C et plus de 15°C. Les figures présentées aux sections I.1.3 et I.1.4 de l'annexe I illustrent les résultats obtenus.

On remarque, à l'observation de ces figures et du tableau 4.7, que les régressions obtenues et leurs coefficients de corrélation sont similaires si l'on compare les deux anémomètres considérés. Pour les mêmes enregistreurs et la même plage de température, l'incertitude liée à l'utilisation des régressions (voir section 2.4.1) est donc très semblable d'un anémomètre à l'autre. Pour les deux anémomètres et les trois combinaisons d'enregistreurs, on observe, pour la plage de vitesse de 4 à 25 m/s, une incertitude moyenne environ trois fois plus élevée pour les données pour lesquelles la température est supérieure à 15°C, environ 1.6% contre 0.5%.

Considérant les six comparaisons, on observe, pour les données supérieures à 15°C, un degré de corrélation plus faible et des régressions s'éloignant de façon plus importante de la droite idéale. La différence de mesure entre les enregistreurs, sur cette plage de température, est donc globalement plus élevée. La banque de données utilisée pour générer ces droites est environ dix fois moins importante que celle utilisée pour les comparaisons seulement sur l'enregistreur NRG. Le nombre de points de données considérés pour les deux plages de température est toutefois similaire, de l'ordre d'environ 900 points.

De plus, si l'on s'attarde à l'évolution de l'erreur de mesure obtenue en comparant les enregistreurs entre eux, les courbes démontrent que celle-ci est plus importante pour les comparaisons entre les appareils NRG et Ohmega que pour celles entre les appareils NRG et SecondWind.



De même, les comparaisons entre les enregistreurs Ohmega et SecondWind montrent une erreur encore supérieure.

En analysant les régressions obtenues pour les comparaisons de mesure entre les divers enregistreurs, on observe une divergence nettement plus importante, par rapport à la droite idéale attendue, pour celles impliquant l'enregistreur Ohmega. Les comparaisons entre les enregistreurs NRG et SecondWind se rapprochent beaucoup plus d'une droite à pente unitaire et à origine nulle.

Les données recueillies par les différents enregistreurs n'ayant pas tous le même nombre de décimales, une vérification de l'influence s'avère souhaitable. Pour ce faire, les données ont toutes été arrondies à un chiffre après le point et les calculs ont été refaits. Cette opération n'a toutefois pas changé, de façon notable, le comportement de la différence de mesure. Les données utilisées étant des moyennes sur 10 minutes d'un signal enregistré à 0.5Hz, l'influence de la précision de ces mesures est également à considérer. Celle-ci n'explique toutefois pas des différences de mesure aussi importantes que celles observées.

La dispersion des points autour de la valeur attendue a été analysée, pour différentes vitesses d'écoulement. La répartition de ces valeurs ne répondant aucunement à une distribution normale, il a été convenu qu'une grande part des différences de mesure sont attribuables aux erreurs de traitement de signaux sur les trois enregistreurs. Certaines défaillances dans la lecture du signal de l'anémomètre peuvent mener à la perte de mesures instantanées. Ces pertes n'étant généralement pas synchronisées entre les enregistreurs, les moyennes de 10 minutes retenues peuvent donc présenter de grandes différences. Cette conclusion, quant à l'origine de cette différence de mesure, s'avère encore plus évidente si l'on compare avec la dispersion des points observée pour la comparaison d'instruments différents sur un même enregistreur. Malgré le fait que la comparaison des enregistrements s'effectue entre deux anémomètres différents, la similitude des mesures est beaucoup plus marquée que lors des mesures d'un même anémomètre sur différents enregistreurs.

Compte tenu de la gamme de température considérée, de l'incertitude rattachée aux régressions et des erreurs provenant du traitement des enregistreurs, il s'avère impossible de conclure à une influence marquée de la température sur la lecture des enregistreurs. On remarque toutefois une différence, parfois importante, dans le traitement du signal effectué par les enregistreurs. Notamment, les résultats obtenus par l'appareil Ohmega présentent des valeurs passablement inférieures aux autres enregistreurs considérés.



Tableau 4.7  
 Comparaison de mesures entre les enregistreurs de données en  
 fonction de la température

		Température (°C)	Régression linéaire	R <sup>2</sup>
NRG#40 (20m)	NRG/Ohm (fig. 52)	0 à 15	$V_{Ohm} = 1.082V_{NRG} - 0.529$	0.979
		15 et plus	$V_{Ohm} = 1.215V_{NRG} - 1.037$	0.934
	NRG/SW (fig. 53)	0 à 15	$V_{SW} = 0.999V_{NRG} - 0.023$	0.937
		15 et plus	$V_{SW} = 0.974V_{NRG} + 0.023$	0.865
	Ohm/SW (fig. 54)	0 à 15	$V_{SW} = 0.912V_{Ohm} + 0.512$	0.928
		15 et plus	$V_{SW} = 0.758V_{Ohm} + 0.994$	0.824
NRG#40 (18m)	NRG/Ohm (fig. 58)	0 à 15	$V_{Ohm} = 1.083V_{NRG} - 0.514$	0.981
		15 et plus	$V_{Ohm} = 1.211V_{NRG} - 1.001$	0.949
	NRG/SW (fig. 59)	0 à 15	$V_{SW} = 0.990V_{NRG} + 0.041$	0.956
		15 et plus	$V_{SW} = 0.966V_{NRG} + 0.031$	0.853
	Ohm/SW (fig. 60)	0 à 15	$V_{SW} = 0.903V_{Ohm} + 0.564$	0.946
		15 et plus	$V_{SW} = 0.764V_{Ohm} + 0.914$	0.830

#### 4.1.3 Influence de la vitesse verticale sur les données temporelles

Cette section présente les comparaisons de lecture, en fonction de la vitesse verticale, entre les instruments considérés pour les tests. Les données de cette composante de vitesse ont été obtenues à l'aide d'un anémomètre vertical RMY27106 connecté à l'enregistreur NRG Symphonie. Les valeurs moyennes obtenues pour les vitesses ascendantes et descendantes sont, respectivement, de 0.13m/s et 0.12m/s. Les vitesses extrêmes observées sont de l'ordre de  $\pm 0.5$ m/s.

Les observations effectuées à cette section sont peu concluantes car les vitesses verticales observées sont très faibles en comparaison aux vitesses horizontales. L'inclinaison de l'écoulement résultant étant donc très faible, l'influence sur la mesure de l'appareil devrait donc être également minime.

De façon similaire aux comparaisons en fonction de la température, celles-ci sont effectuées à l'aide de régressions linéaires. Les figures illustrant les régressions ainsi que leurs erreurs sont également présentées à l'annexe I.

### **Comparaison sur l'enregistreur NRG Symphonie**

Les données disponibles pour ces comparaisons ont permis de vérifier le comportement des instruments en réaction aux trois possibilités d'écoulement vertical. Les figures présentées aux sections I.2.1 et I.2.2 de l'annexe I illustrent les résultats obtenus.

Comme pour les analyses en fonction de la température, les comparaisons entre les anémomètres reliés à l'enregistreur NRG présentent, pour les deux niveaux de mesure et les trois gammes de vents verticaux, des coefficients de corrélation très élevés et similaires. De ce fait, l'erreur liée à l'utilisation de la régression linéaire est très faible. Pour une plage de vitesse variant de 4 à 25 m/s, une incertitude moyenne d'environ 0.015% a été observée. Considérant le nombre élevé de points de mesure et l'incertitude très faible des régression, l'utilisation des informations présentées au tableau 4.8 est justifiée.

Il aurait été convenable de penser que les lectures à vitesse verticale nulle seraient celles présentant la plus faible divergence de mesure entre les appareils redondants, mais c'est plutôt le cas contraire qui est observé. Dans les deux cas, celles-ci présentent la régression divergeant le plus de la droite idéale et ayant le coefficient de corrélation de plus faible.

Également, à 18m et 20m, les différences de mesure entre les anémomètres sont d'ordre similaire lorsque la vitesse verticale est nulle ou descendante. Les différences de mesure les plus faibles sont observées lorsque la vitesse est ascendante. Du fait de l'influence du corps des appareils et de la tour, il aurait plutôt été probable de croire que la présence de vitesse ascendante engendrerait une erreur plus importante.

Considérant la comparaison entre les anémomètres Risø P2546a et NRG#40, on constate une différence de mesure quasi-nulle lorsque la vitesse verticale est positive. Toutefois, dans les deux autres cas, on observe une lecture plus élevée, en moyenne 4 à 5%, de la part de l'appareil NRG.

Pour ce qui est du parallèle entre les appareils à 18m, on observe une différence de mesure encore plus importante. La mesure de l'anémomètre NRG est supérieure à celle du RMY-5103, et ce, sur toute la plage de vitesse. Lorsque la vitesse verticale est nulle ou descendante, on dénote une différence moyenne d'environ 7% et, lorsque celle-ci est descendante, la différence moyenne passe à 3.5%.

Tableau 4.8

Comparaison de mesures entre les anémomètres redondant  
en fonction de la vitesse verticale

	Vitesse verticale	Régression linéaire	R <sup>2</sup>
NRG#40 (20m) vs RisøP2546a	Ascendante	$V_{\text{Risø P2546a}} = 0.988V_{\text{NRG\#40 (20m)}} + 0.067$	0.993
	Nulle	$V_{\text{Risø P2546a}} = 0.925V_{\text{NRG\#40 (20m)}} + 0.288$	0.987
	Descendante	$V_{\text{Risø P2546a}} = 0.936V_{\text{NRG\#40 (20m)}} + 0.239$	0.992
NRG#40 (18m) vs RMY-5103	Ascendante	$V_{\text{RMY-5103}} = 0.962V_{\text{NRG\#40 (18m)}} + 0.034$	0.995
	Nulle	$V_{\text{RMY-5103}} = 0.908V_{\text{NRG\#40 (18m)}} + 0.230$	0.990
	Descendante	$V_{\text{RMY-5103}} = 0.909V_{\text{NRG\#40 (18m)}} + 0.227$	0.993

Dû à l'incertitude de mesure de chaque appareil, une certaine variation dans leur lecture peut être acceptable. Par contre, dans le cas de différence si importante, il est possible que les équations de calibration utilisées soient en cause. Les tests en soufflerie permettront de les valider.

### **Comparaison entre les trois enregistreurs**

Les données recueillies pour ces comparaisons présentent un degré de corrélation beaucoup plus faible que pour les analyses précédentes. En faisant abstraction du niveau de mesure, l'incertitude moyenne des régressions présentées au tableau 4.9 est d'environ 0,9%, 2,1% et 4,6%, respectivement, pour une vitesse verticale ascendante, nulle ou descendante. À cela, s'ajoute l'incertitude propre aux instruments.

Un si faible degré de corrélation est partiellement attribuable, comme expliqué précédemment, aux erreurs de lecture des signaux de vitesse instantanée acheminés aux enregistreurs. De plus, la taille de la base de donnée disponible pour chaque régression est plutôt petite, les données erronées ont donc vite fait de faire dévier la droite de régression.

Pour ces raisons, il a été jugé non pertinent de conclure sur le comportement des appareils dans cette situation. Des données supplémentaires seraient nécessaires afin de poser des conclusions valables.

Tableau 4.9

Comparaison de mesures entre les enregistreurs de données en fonction de la vitesse verticale

		Vitesse verticale	Régression linéaire	R <sup>2</sup>
NRG#40 (20m)	NRG/Ohm	Ascendante	$V_{Ohm} = 1.037V_{NRG} - 0.213$	0.860
		Nulle	$V_{Ohm} = 1.133V_{NRG} - 0.770$	0.760
		Descendante	$V_{Ohm} = 1.025V_{NRG} - 0.418$	0.670
	NRG/SW	Ascendante	$V_{SW} = 0.865V_{NRG} + 0.585$	0.587
		Nulle	$V_{SW} = 0.654V_{NRG} + 1.280$	0.310
		Descendante	$V_{SW} = 0.556V_{NRG} + 1.368$	0.289
	Ohm/SW	Ascendante	$V_{SW} = 0.767V_{Ohm} + 1.059$	0.579
		Nulle	$V_{SW} = 0.513V_{Ohm} + 1.915$	0.321
		Descendante	$V_{SW} = 0.467V_{Ohm} + 1.824$	0.319
NRG#40 (18m)	NRG/Ohm	Ascendante	$V_{Ohm} = 1.055V_{NRG} - 0.313$	0.867
		Nulle	$V_{Ohm} = 1.129V_{NRG} - 0.763$	0.781
		Descendante	$V_{Ohm} = 1.001V_{NRG} - 0.336$	0.672
	NRG/SW	Ascendante	$V_{SW} = 0.879V_{NRG} + 0.487$	0.618
		Nulle	$V_{SW} = 0.646V_{NRG} + 1.212$	0.313
		Descendante	$V_{SW} = 0.530V_{NRG} + 1.373$	0.273
	Ohm/SW	Ascendante	$V_{SW} = 0.768V_{Ohm} + 1.021$	0.606
		Nulle	$V_{SW} = 0.520V_{Ohm} + 1.788$	0.330
		Descendante	$V_{SW} = 0.473V_{Ohm} + 1.708$	0.321



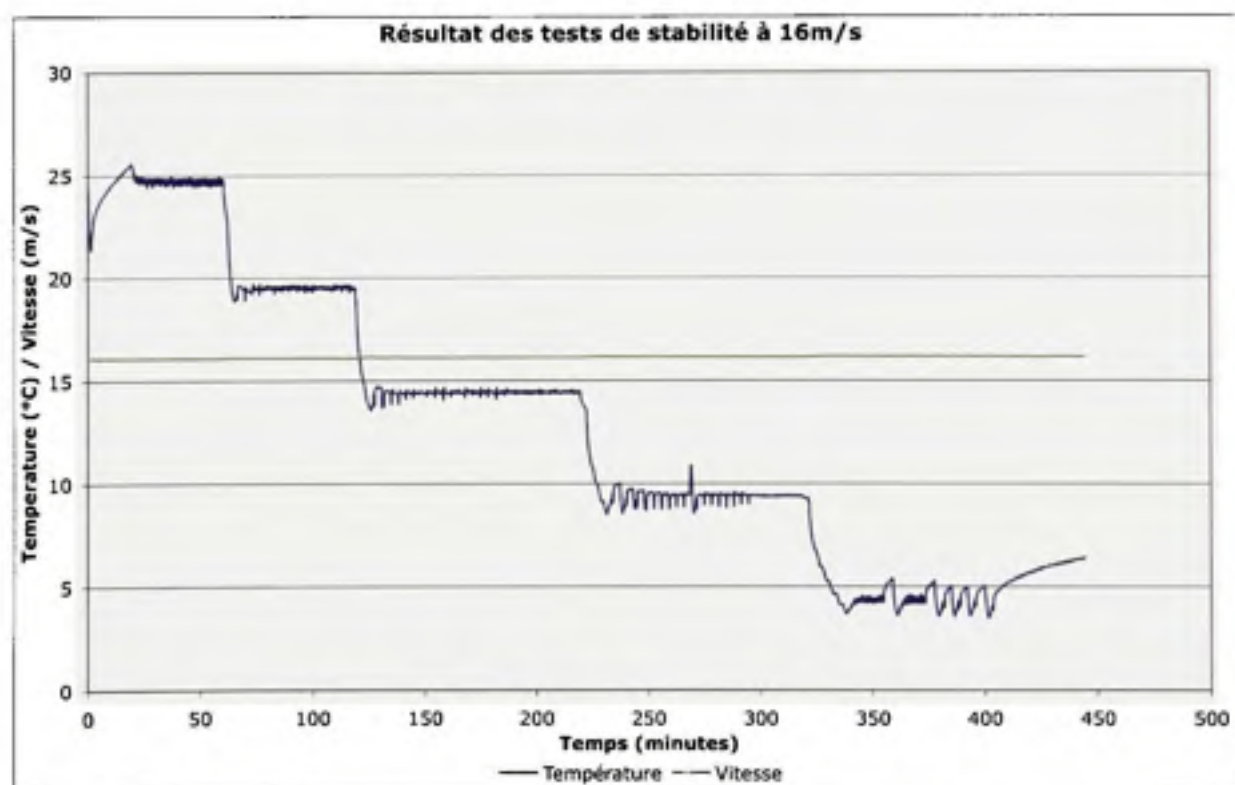
## 4.2 Résultats des tests effectués sur la soufflerie

Cette section expose les résultats découlant des tests de qualité de l'écoulement de la soufflerie. Les tests de stabilité, portant sur la vitesse et la température, ont été effectués d'octobre 2006 à décembre 2006. Pour ce qui est des tests de calibration de la mesure de référence, ils ont été réalisés dans les mois de mai et juin 2007.

### 4.2.1 Tests de stabilité

Suite aux modifications effectuées dans la partie inférieure de la soufflerie (amélioration de la motorisation et ajout du système de climatisation), il est nécessaire de vérifier leur influence sur l'écoulement observé dans la section d'essai.

La figure 40 présente la forme des courbes obtenues suite à l'application de la procédure présentée à la section 3.2.1.



**Figure 4.5** Graphique type des tests de stabilité

## Stabilité de la température

Considérant le fait que la température de l'écoulement joue un rôle de premier ordre dans les tests effectués sur les anémomètres, il est important de vérifier la capacité et la stabilité du système de climatisation.

Le tableau 4.10 présente les observations concernant la stabilité de température à différentes vitesses. Les températures les plus basses affichées pour chacune correspondent à la température minimale atteinte, tout en observant le critère de stabilité adopté à la section 3.2.1.

Suite à l'analyse des résultats de ces tests, il a été décidé d'améliorer l'isolation des installations. La section métallique accueillant le système de climatisation ainsi que le convergent ont été recouvert de mousse isolante afin de réduire les échanges thermiques avec l'environnement. Pour ce qui est des autres sections, possédant des parois de bois suffisamment épaisses, il n'a pas été jugé essentiel de les recouvrir.

De plus, tout au long des mois passés à effectuer ces vérifications, des réglages et des modifications ont été apportés au système de climatisation. Étant son tout premier utilisateur, de longues périodes ont été nécessaires afin d'étreindre et corriger les malfonctionnements de l'installation.

Après l'installation de l'isolation, au mois de mai 2007, quelques tests rapides ont été effectués afin de vérifier son impact. On remarqua une amélioration dans la stabilité et dans la température minimale stable, mais il était encore difficile d'obtenir, à haute vitesse, des températures inférieures à 0°C. Il a donc fallu modifier la procédure de réglage de la soufflerie afin de pouvoir effectuer des prises de mesures sur des plages de vitesse et de température convenables.

Il a été convenu que, lorsque la stabilité à long terme de la température ne peut être obtenue, la température consigne doit être réglée à une température inférieure à celle désirée et la mesure est effectuée lors de la remontée de température, suite à l'arrêt de la climatisation. Les points de mesure, découlant de moyennes sur 30 secondes d'acquisition, sont obtenus sur une plage de variation de température d'au plus 1°C. Pour ce faire, il est donc nécessaire de redémarrer, pour un certain temps, et arrêter le système de climatisation à chaque prise de données. Cette manière de faire demande beaucoup plus de temps, mais elle constitue la seule méthode permettant d'obtenir les données nécessaires au projet.

Suite à la complétion des tests du présent projet, à la session d'hiver 2008, des travaux ont été effectués sur le système de climatisation afin d'en améliorer les performances. D'après les commentaires des utilisateurs actuels, celles-ci ont permis l'obtention d'une excellente stabilité jusqu'à des températures aux environs de  $-15^{\circ}\text{C}$ .

### **Stabilité de la vitesse**

La vérification de la stabilité de la vitesse permet également de quantifier l'intensité de turbulence de l'écoulement. Les données de vitesse utilisées sont celles correspondant aux plages de température stable. L'intensité de turbulence est donc calculée pour chacune de ces plages et moyennée par la suite pour chacune des vitesses vérifiées. Le tableau 4.11 présente les résultats obtenus suite à la mesure de stabilité de vitesse.

Suite à l'analyse de ces résultats, on constate que, pour la plage de vitesse testée, le niveau d'intensité de turbulence répond correctement à la limite prescrite de 2%. Il est toutefois nécessaire de rapporter certaines observations.

Premièrement, lorsque la soufflerie fonctionne sur de longues périodes, à des températures inférieures à  $0^{\circ}\text{C}$ , la formation de givre dans la section de climatisation provoque une augmentation des pertes de charge. Cette augmentation a pour effet d'induire une réduction de la vitesse lue dans la zone d'essai. Pour palier à ce problème, les tests à basse température sont effectués sur de courtes périodes et la présence de givre sur l'échangeur thermique est vérifiée régulièrement.

De plus, il a été nécessaire de modifier le fonctionnement du système de climatisation après quelques tests. Afin d'optimiser le fonctionnement du contrôle de température, une valeur maximale avait été imposée à la vitesse de l'écoulement dans l'échangeur thermique. Lorsque cette valeur était dépassée, un système de volet permettait à une partie de l'air de contourner la climatisation. L'asservissement de l'ouverture causant des variations de vitesse dans l'écoulement, il a été décidé de rendre manuel le contrôle d'ouverture des volets. Pour tous les tests effectués subséquemment, la consigne d'ouverture a été fixée à 60%.

Tableau 4.10

Résultats des tests de stabilité de température

<b>Mesures à 4m/s</b>		
<b>Température (°C)</b>	<b>Temps stabilisation (minutes)</b>	<b>Commentaires</b>
20 → 15	10	Variation quasi nulle de température après environ 80 minutes de fonctionnement
15 → 10	10	—
10 → 5	15	Certains dépassements ponctuels de la plage de variation permise
5 → 0	15	Certains dépassements ponctuels de la plage de variation permise
0 → -5	35	—
<b>Mesures à 8m/s</b>		
<b>Température (°C)</b>	<b>Temps stabilisation (minutes)</b>	<b>Commentaires</b>
20 → 15	10	—
15 → 10	10	—
10 → 5	20	—
5 → 0	15	—
<b>Mesures à 12m/s</b>		
<b>Température (°C)</b>	<b>Temps stabilisation (minutes)</b>	<b>Commentaires</b>
20 → 15	10	—
15 → 10	15	—
10 → 5	100	Une certaine stabilité a été atteinte après 30 minutes mais d'importantes variations étaient périodiquement observées
5 → 0	20	—
<b>Mesures à 16m/s</b>		
<b>Température (°C)</b>	<b>Temps stabilisation (minutes)</b>	<b>Commentaires</b>
25 → 20	10	—
20 → 15	20	—
15 → 10	75	Une certaine stabilité a été atteinte après 25 minutes mais d'importantes variations étaient observées à intervalles d'environ 5 minutes

Tableau 4.11

Résultats des tests de stabilité de vitesse

Vitesse moyenne (m/s)	Écart-type (m/s)	Intensité de turbulence (%)
3.99	0.0184	0.46
7.98	0.0364	0.46
11.96	0.0504	0.42
16.12	0.0113	0.07

**Figure 4.6** Photo illustrant le système de climatisation lors de son installation

Source : Cette figure origine de photos personnelles prises des installations.



#### 4.2.2 Tests de calibration

La calibration obtenue entre la position prévue pour les anémomètres et la position de référence est donnée par une régression linéaire moyenne basée sur 3 tests de calibration. Les conditions dans lesquelles ils ont été effectués et les résultats obtenus sont présentés au tableau 4.12. Pour ces tests, l'ordre de mesure entre les deux tubes de pitot a été inversé à chaque changement de vitesse. L'équation 4.1 présente la régression linéaire moyenne obtenue suite à ces mesures.

Tableau 4.12

Conditions des tests de calibration de la mesure de référence

	Calibration 1	Calibration 2	Calibration 3
Vitesses	3-15m/s et 14-2m/s par saut de 2m/s		
Température	25°C		15°C
Pression atm.	761.4mmHg	760.8mmHg	761.4mmHg
Pente	1.0034	0.9949	0.9942
Ordonnée	0.0017	0.0002	0.0002
R <sup>2</sup>	0.999998	0.999997	0.999997

$$U_{\text{Anémomètre}} = 0.9975U_{\text{Référence}} + 0.0007 \quad (4.1)$$

La différence de lecture moyenne, sur une plage de vitesse variant de 4m/s à 16m/s, est d'environ 0.24%. L'omission de cette correction n'entraîne que de faibles variations dans la vitesse de référence mais, par souci d'exactitude, celle-ci est tout de même considérée.

#### 4.3 Résultats des tests sur les anémomètres

La présente section expose les résultats obtenus suite aux tests en soufflerie effectués sur les différents anémomètres considérés pour le projet. Les observations en lien avec les étalonnages ainsi qu'avec les tests d'influence de la température sont détaillés.

### 4.3.1 Résultats des tests de calibration

Les paragraphes qui suivent présentent les observations découlant des étalonnages effectués sur les anémomètres à l'essai. Les calibrations utilisées consistent en une moyenne de quatre séquences d'étalonnage effectuées à 20°C.

Les points de mesure recueillis lors des étalonnages couvrent une plage de 2 à 15 m/s. Toutefois, après traitement des données et calcul des coefficients de corrélation, il a été décidé de ne pas considérer les points de mesure à 2m/s car certains instruments répondaient de façon non linéaire à cette vitesse. Cette élimination se justifie par le fait que l'objectif du projet n'est pas de qualifier le fonctionnement à basse vitesse, l'accent est donc mis sur une plage de vitesse plus représentative des conditions visées par le domaine de l'énergie éolienne.

Comme exigé par les normes régissant l'étalonnage de ce type d'appareil, des calculs ont été effectués afin de connaître l'incertitude de mesure de chaque appareil. Toutefois, compte tenu des objectifs du projet et de l'équipement utilisé, certaines des contributions (voir section 2.4.2) ont été négligées ou combinées à d'autres.

Notamment, la contribution d'incertitude originant de l'amplification du signal du capteur de pression a été négligée. Cette omission s'explique par le fait que le signal généré par le capteur couvrait la plage de lecture du système d'acquisition, aucune amplification ne s'est donc avérée nécessaire.

De plus, les apports à l'incertitude provenant du signal du baromètre, en ce qui a trait à l'amplification et à l'échantillonnage, furent rejetés. Ceci s'explique par le fait que le baromètre utilisé consiste en un instrument au mercure, à lecture manuelle. La pression atmosphérique était entrée au début de la séquence de prise de données et considérée comme stable sur la période de mesure.

La dernière contribution non considérée est celle en lien avec la correction de la densité en fonction de l'humidité. Cette influence sur la valeur de la densité de l'air fut omise dans le cadre des tests effectués.

Pour terminer, il a été choisi de combiner les trois contributions d'incertitude du capteur de température en une seule. Cette approche est tirée des procédures de calcul d'incertitude adoptées par l'institut de recherche DEWI (Deutsches Windenergie Institut) que l'on retrouve dans le document de Eecen et de Noord (2005). La seule contribution retenue est celle causée par la

sonde elle-même, l'incertitude rattachée au signal de l'instrument  $y$  est incorporée en triplant la précision réelle de l'instrument.

En ce qui a trait aux contributions retenues, il est à noter que celles rattachées au capteur de pression servant à la mesure de vitesse de référence ne sont valides qu'à des vitesses inférieures à environ 16m/s. Au delà de ce point, la capacité de mesure de pression du capteur est dépassée.

Les figures illustrant les droites de calibration obtenues ainsi que leurs incertitudes sont présentées en annexe, à la section I.3.

### Risø P2546a

L'équation 4.2 représente la calibration obtenue pour l'anémomètre Risø P2546a. Le coefficient de corrélation de cette régression est de 99.999%, il est donc conforme aux exigences minimales du MEASNET (voir section 1.5).

$$U[\text{m/s}] = (0.6045 \times f[\text{Hz}]) + 0.19 \quad (4.2)$$

Cette équation diffère de l'équation standard ( $U = 0.6201 \times f + 0.27$ ), donnée par le fabricant, mais reste toutefois dans la zone de variation acceptée pour les différents instruments du même modèle.

Tableau 4.13

Incertaince de calibration de l'anémomètre Risø P2546a

Vitesses (m/s)	Incertaince		Vitesses (m/s)	Incertaince	
	(m/s)	(%)		(m/s)	(%)
3	0,0326	1,09%	10	0,0356	0,36%
4	0,0296	0,74%	11	0,0383	0,35%
5	0,0286	0,57%	12	0,0413	0,34%
6	0,0288	0,48%	13	0,0446	0,34%
7	0,0298	0,43%	14	0,0482	0,34%
8	0,0313	0,39%	15	0,0521	0,35%
9	0,0333	0,37%			

L'incertitude totale obtenue pour cet instrument est présentée au tableau 4.13. À la lecture de ce tableau, on observe un pourcentage d'incertitude relativement constant pour les vitesses supérieures à 6m/s. Pour les vitesses inférieures, la valeur de l'incertitude reste du même ordre de grandeur, mais, compte tenu qu'elles sont plus faibles, la valeur relative de l'incertitude est plus importante. Sur la plage de vitesse considérée, on observe une valeur moyenne d'incertitude de 0.47%. De plus, l'incertitude à 10m/s est près du tiers de la valeur maximale prescrite, qui est de 0.1m/s. De façon globale, on peut affirmer que l'incertitude de calibration de cet instrument est très faible.

Pour terminer, on note que tous les points de mesure ayant été utilisés pour l'étalonnage moyen se situent dans la zone d'incertitude calculée.

#### **NRG #40**

L'équation 4.3 représente la calibration obtenue pour l'anémomètre NRG#40. Dans le cas de cet instrument, le coefficient de corrélation de la régression se chiffre à 99.997%, il donc conforme à la valeur minimale prescrite de 99.995%.

$$U[\text{m/s}] = (0.7457 \times f[\text{Hz}]) + 0.40 \quad (4.3)$$

Encore ici, l'équation trouvée diffère passablement de celle disponible dans la documentation du fabricant ( $U = 0.765 \times f + 0.35$ ). Celui-ci présente, sur son site internet, un graphique illustrant la distribution de la pente de calibration pour 12400 tests. Toutefois, même en considérant la variation maximale de 1.2%, qui correspond à trois fois la valeur de l'écart-type de la distribution, l'équation trouvée n'entre pas dans les limites prescrites. Cette observation peut-être attribuable au fait que l'instrument considéré n'est pas neuf, il a été utilisé dans d'autres campagnes de mesure avant ce projet.

Le tableau 4.14 présente l'incertitude de l'étalonnage trouvé. On y observe la même tendance que pour l'anémomètre précédent, une incertitude relative plus élevée à basse vitesse et une stabilisation pour les vitesses supérieures à 7m/s. Dans le cas présent, on obtient une incertitude moyenne de 0.54% et le critère concernant l'incertitude à 10m/s est respecté.

Les points de mesure obtenus lors de la procédure d'étalonnage se retrouvent majoritairement dans la zone d'incertitude, la seule exception est le point à 12m/s. Celui-ci se situe très légèrement à l'extérieur de la borne supérieure d'incertitude. Cette observation est probablement attribuable au fait que certaines contributions d'incertitudes ont été négligées. De plus, pour deux des quatre étalonnages ayant servi à générer l'étalonnage maître, le coefficient de régression est légèrement plus faible. Pour ceux-ci, l'élimination du point à 12m/s permet de rapprocher le coefficient  $R^2$  des deux autres. Il est donc également possible que l'acquisition de ces points ait pu être effectuée avant l'atteinte d'une stabilité convenable.

Tableau 4.14

Incertaince de calibration de l'anémomètre NRG#40

Vitesses (m/s)	Incertaince		Vitesses (m/s)	Incertaince	
	(m/s)	(%)		(m/s)	(%)
3	0,0404	1,35%	10	0,0380	0,38%
4	0,0357	0,89%	11	0,0412	0,37%
5	0,0333	0,67%	12	0,0450	0,37%
6	0,0324	0,54%	13	0,0494	0,38%
7	0,0326	0,47%	14	0,0544	0,39%
8	0,0337	0,42%	15	0,0600	0,40%
9	0,0355	0,39%			

### NRG IcefreeIII

L'anémomètre NRG IcefreeIII étant un anémomètre chauffant, des tests ont été faits avec et sans l'activation du système de chauffage afin d'en vérifier l'impact. Les équations 4.4 et 4.5 représentent, respectivement, les étalonnages obtenus pour l'anémomètre chauffé et non-chauffé. Les coefficients de corrélation des deux droites sont, respectivement, de 99.855% et 99.857%. Les coefficients  $R^2$  trouvés sont en deçà des exigences prescrites dans le document du MEASNET.

$$U[\text{m/s}] = (0.5864 \times f[\text{Hz}]) + 0.22 \quad (4.4)$$

$$U[\text{m/s}] = (0.5855 \times f[\text{Hz}]) + 0.21 \quad (4.5)$$



On observe une légère différence entre l'étalonnage chauffé et celui non-chauffé. L'étalonnage non chauffé résulte en une mesure de vitesse légèrement plus faible. La variation étant très faible, en moyenne 0.37%, sur la plage d'étalonnage, il est difficile de conclure sur sa cause. Il est possible que ce soit causé par le changement du couple friction sur le rotor de l'appareil. Des tests plus poussés seraient toutefois nécessaires pour confirmer cette hypothèse.

Également, les deux calibrations obtenues divergent de façon non négligeable de celle recommandée par le manufacturier ( $U = 0.572 \times f + 1$ ). Les pentes des deux régressions se situent dans les limites attribuables aux variations normales observées entre différents exemplaires de l'appareil. Par contre, le décalage de la courbe est très différent, une valeur environ cinq fois plus faible a été observée. L'installation et le système d'acquisition fonctionnant très bien pour les autres instruments testés, il est envisageable de considérer que ce comportement soit attribuable à l'anémomètre.

De plus, les tests ont présenté un comportement qui semble non linéaire sur la plage couvrant les vitesses de 6m/s à 10m/s. Afin d'enquêter sur ce phénomène, des tests de stabilité du signal de l'instrument ont été faits.

Ces tests ont démontré une instabilité pour des fréquences de signal aux environs de 15Hz. Cette fréquence correspond à un multiple de la fréquence d'éjection tourbillonnaire derrière un cylindre ayant un diamètre similaire à celui du corps de l'instrument.

Afin de confirmer cette hypothèse, le diamètre du corps de l'anémomètre a été augmenté par l'ajout d'un tube autour de celui-ci. Comme attendu, cet ajout a eu pour effet de décaler la zone d'instabilité vers une valeur de fréquence inférieure.

Dans le but de conclure ces vérifications, une dernière séance de tests a été effectuée en ajoutant une ailette derrière le corps de l'instrument. Cet ajout a eu pour objectif d'éliminer l'éjection de tourbillons derrière le corps de l'appareil. L'effet obtenu par l'ajout de ce dispositif s'est avéré concluant car, d'après les résultats obtenus, aucune instabilité n'a pu être détectée pour un signal variant de 10Hz à 19Hz.

Malgré ces observations sur le comportement de l'instrument, il a été choisi de l'utiliser dans sa configuration standard, sans aucune modification. Les calibrations utilisées pour les tests subséquents sont donc celles présentées aux équations 4.4 et 4.5. Les valeurs de l'incertitude rattachée à celles-ci sont présentées aux tableaux 4.15 et 4.16.

À la lecture des tableaux présentant les valeurs d'incertitudes, on ne peut que convenir que l'incertitude est semblable pour les deux cas. Donc, globalement, on observe une incertitude beaucoup plus élevée que pour les deux anémomètres précédents. La valeur calculée à 10m/s reste acceptable mais on obtient une incertitude moyenne d'environ 1.2%, plus de deux fois supérieure aux deux autres anémomètres à coupoles considérés.

Tableau 4.15  
Incertitude de calibration de l'anémomètre  
NRG IcefreeIII (chauffé)

Vitesses (m/s)	Incertitude		Vitesses (m/s)	Incertitude	
	(m/s)	(%)		(m/s)	(%)
3	0,1193	3,98%	10	0,0617	0,62%
4	0,0971	2,43%	11	0,0697	0,63%
5	0,0806	1,61%	12	0,0816	0,68%
6	0,0686	1,14%	13	0,0972	0,75%
7	0,0609	0,87%	14	0,1166	0,83%
8	0,0573	0,72%	15	0,1397	0,93%
9	0,0576	0,64%			

Tableau 4.16  
Incertitude de calibration de l'anémomètre  
NRG IcefreeIII (non-chauffé)

Vitesses (m/s)	Incertitude		Vitesses (m/s)	Incertitude	
	(m/s)	(%)		(m/s)	(%)
3	0,1188	3,96%	10	0,0615	0,62%
4	0,0968	2,42%	11	0,0695	0,63%
5	0,0803	1,61%	12	0,0813	0,68%
6	0,0684	1,14%	13	0,0968	0,74%
7	0,0607	0,87%	14	0,1160	0,83%
8	0,0571	0,71%	15	0,1391	0,93%
9	0,0574	0,64%			

Excluant la zone d'instabilité, de 6m/s à 10m/s, seul le point de mesure à 3m/s se retrouve hors de la zone d'incertitude de la régression. Cette irrégularité peut-être attribuable à la réponse non-linéaire de ce type de rotor à faible vitesse.

### **RMY-5103**

L'équation 4.6 représente le résultat de la campagne de calibration de l'anémomètre à hélice RMY-5103. La valeur du coefficient de corrélation de cette régression, considérant cinq décimales, est de 100%.

$$U[\text{m/s}] = (0.0971 \times f[\text{Hz}]) + 0.07 \quad (4.6)$$

La variation par rapport à l'équation donnée par le manufacturier ( $U = 0.098 \times f$ ) est minime et peut-être assimilé à la variation entre les divers appareils du même modèle. Le manufacturier ne présente aucune information quant à la variabilité de la calibration d'un instrument à l'autre.

L'incertitude de la calibration de cet instrument (Tableau 4.17) est, jusqu'à présent, la plus faible obtenue avec les instruments testés. La plage de vitesse considérée pour l'étalonnage présente une incertitude moyenne de 0.44% et un maximum d'un peu moins de 1%. La faible valeur d'incertitude trouvée est causée par le haut degré de corrélation de la droite de régression de l'étalonnage. L'incertitude de type A étant quasi nulle, il ne reste que l'incertitude de type B, celle engendré par l'installation et l'équipement utilisé pour les tests.

### **RMY-5305**

Le résultat obtenu à la suite des quatre étalonnages de cet instrument est présenté à l'équation 4.7. Le coefficient de corrélation de cette droite est quasi parfait, avec une valeur de 99.999%.

$$U[\text{m/s}] = (0.0987 \times f[\text{Hz}]) + 0.06 \quad (4.7)$$

La différence de cette équation par rapport à l'équation proposée par le fabricant ( $U = 0.102 \times f$ ) est plus importante que pour l'autre modèle d'anémomètre à hélice considéré.

Tableau 4.17

Incertitude de calibration de l'anémomètre RMY-5103

Vitesses (m/s)	Incertitude		Vitesses (m/s)	Incertitude	
	(m/s)	(%)		(m/s)	(%)
3	0,0286	0,95%	10	0,0344	0,34%
4	0,0264	0,66%	11	0,0369	0,34%
5	0,0262	0,52%	12	0,0395	0,33%
6	0,0270	0,45%	13	0,0422	0,32%
7	0,0283	0,40%	14	0,0451	0,32%
8	0,0301	0,38%	15	0,0480	0,32%
9	0,0321	0,36%			

Aucune information n'est fournie à ce sujet par le fabricant. La pente de la régression trouvée diverge d'environ 3,6% de la pente attendue. Les quatre étalonnages étant très bien regroupés, cette variation ne peut être à l'origine d'une manipulation erronée. Toutefois, considérant les heures d'utilisation de l'appareil avant les test en soufflerie, il est possible que l'usure de l'appareil soit à considérer. Il faut également considérer le fait que ce type d'appareil est généralement utilisé dans des contextes où la justesse de la mesure est moins sévère, le fabricant suggère une valeur de  $\pm 0.2\text{m/s}$ , l'équation standard donnée reflète donc possiblement cette caractéristique.

L'incertitude de la calibration de cet instrument, présentée au tableau 4.18, est très similaire à l'anémomètre RMY-5305. Une valeur moyenne d'incertitude de 0,48%, et un maximum de 1,1%, ont été calculés sur la plage de vitesse d'étalonnage. Comme pour l'instrument précédent, l'incertitude de type A n'apporte qu'une très faible contribution à l'incertitude totale.

Tableau 4.18

Incertitude de calibration de l'anémomètre RMY-5305

Vitesses (m/s)	Incertitude		Vitesses (m/s)	Incertitude	
	(m/s)	(%)		(m/s)	(%)
3	0,0330	1,10%	10	0,0357	0,36%
4	0,0299	0,75%	11	0,0385	0,35%
5	0,0289	0,58%	12	0,0415	0,35%
6	0,0290	0,48%	13	0,0449	0,35%
7	0,0299	0,43%	14	0,0485	0,35%
8	0,0314	0,39%	15	0,0525	0,35%
9	0,0334	0,37%			

#### 4.3.2 Résultats des tests sur l'influence de la température

Les paragraphes qui suivent présentent les résultats obtenus à la suite des tests d'influence de température imposés aux anémomètres considérés pour le projet.

Les observations découlant de ces résultats prennent en considération l'incertitude de calibration calculée précédemment. De plus, la contribution d'incertitude retenue pour la sonde de température est fonction de la température de fonctionnement de la soufflerie.

##### Risø P2546a

Le comportement de l'anémomètre Risø P2546a ayant été très bien documenté (voir Pedersen, 2004a), il s'est avéré plus facile de corroborer les résultats obtenus avec les observations effectuées par d'autres chercheurs.

Le tableau 4.19 présente, pour différentes vitesses et températures, la déviation relative de vitesse entre la valeur mesurée par la sonde de référence et la valeur attendue d'après l'étalonnage. Une différence négative signifie que la valeur mesurée est inférieure à la vitesse prédite par la calibration.

La tendance générale étant sensiblement la même d'une vitesse à l'autre, la figure 42 illustre seulement les points moyens (losanges). Les symboles de part et d'autre de ces losanges, représentent l'incertitude de la mesure.



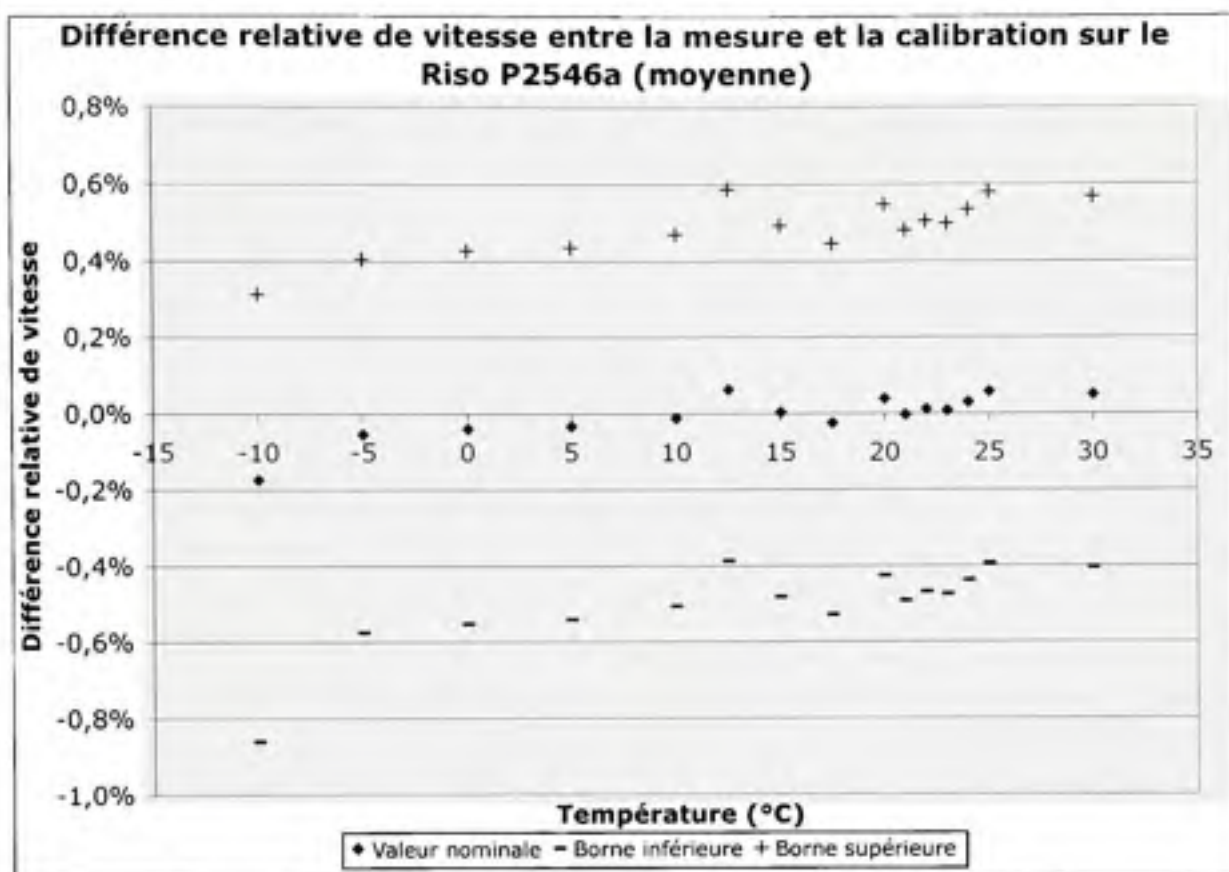
Tableau 4.19

Influence de la température sur la mesure de l'anémomètre Risø P2546a

Température	3m/s	6m/s	9m/s	12m/s	15m/s	MOYENNE
30	0,017%	0,125%	-0,076%	0,097%	0,089%	0,050%
25	0,019%	0,101%	-0,010%	0,065%	0,112%	0,057%
20	0,109%	0,144%	-0,039%	-0,015%	-0,007%	0,039%
15	0,085%	0,042%	-0,054%	-0,052%	-0,001%	0,004%
10	0,019%	0,063%	-0,095%	-0,063%	0,020%	-0,011%
5	-0,020%	0,034%	-0,117%	-0,042%	-0,019%	-0,033%
0	-0,060%	0,007%	-0,078%	-0,036%	-0,027%	-0,039%
-5	-0,093%	0,022%	-0,110%	-0,052%	-0,033%	-0,053%
-10	-0,192%	-0,168%	-0,157%	n/d	n/d	-0,172%

De l'analyse de cette figure et de ce tableau, on observe une déviation plutôt constante pour les températures supérieures au point de congélation. Par la suite, lorsque la température diminue, il semble y avoir une augmentation de la différence entre la mesure de référence et celle prédite par la calibration. Si l'on se réfère aux travaux de Pedersen (2004a), ce comportement a été observé lors de simulations sur le modèle informatique de l'instrument. Cette augmentation de la déviation de la mesure est attribuable, en partie, à l'augmentation de la friction dans les roulements du rotor.

Toutefois, considérant la taille de la zone d'incertitude et les faibles variations observées, cette analyse nécessite l'appui de résultats supplémentaires afin d'être confirmée. Le comportement observé est possiblement attribuable à l'incertitude de mesure de l'appareil. Celle-ci pourrait être réduite par la prise de données supplémentaires lors de l'étalonnage et par l'utilisation d'appareils plus performants dans la chaîne d'acquisition.



**Figure 4.7** Influence de la température sur la mesure de l'anémomètre Riso P2546a

#### NRG #40

L'ampleur de la déviation relative de vitesse entre la valeur référence et la valeur attendue par l'étalonnage de l'anémomètre NRG#40 est présentée au tableau 4.20. Celle-ci est présentée en fonction de la température et de la vitesse. La convention de signe utilisée est la même qu'utilisée pour l'appareil précédent.

Les déviations mesurées à 3m/s présentent une évolution similaire à celles des autres vitesses considérées, mais la valeur obtenue à 20°C est anormalement élevée, considérant qu'il s'agit de la température à laquelle la calibration a été effectuée. De ce fait, on constate donc que les effets de la variation de la température sur le comportement de l'appareil se font sentir de façon plus importante à cette vitesse. Il a donc été décidé d'éliminer cette vitesse dans le calcul de la valeur moyenne de la déviation. La figure 43 illustre les valeurs moyennes obtenues.

Tableau 4.20

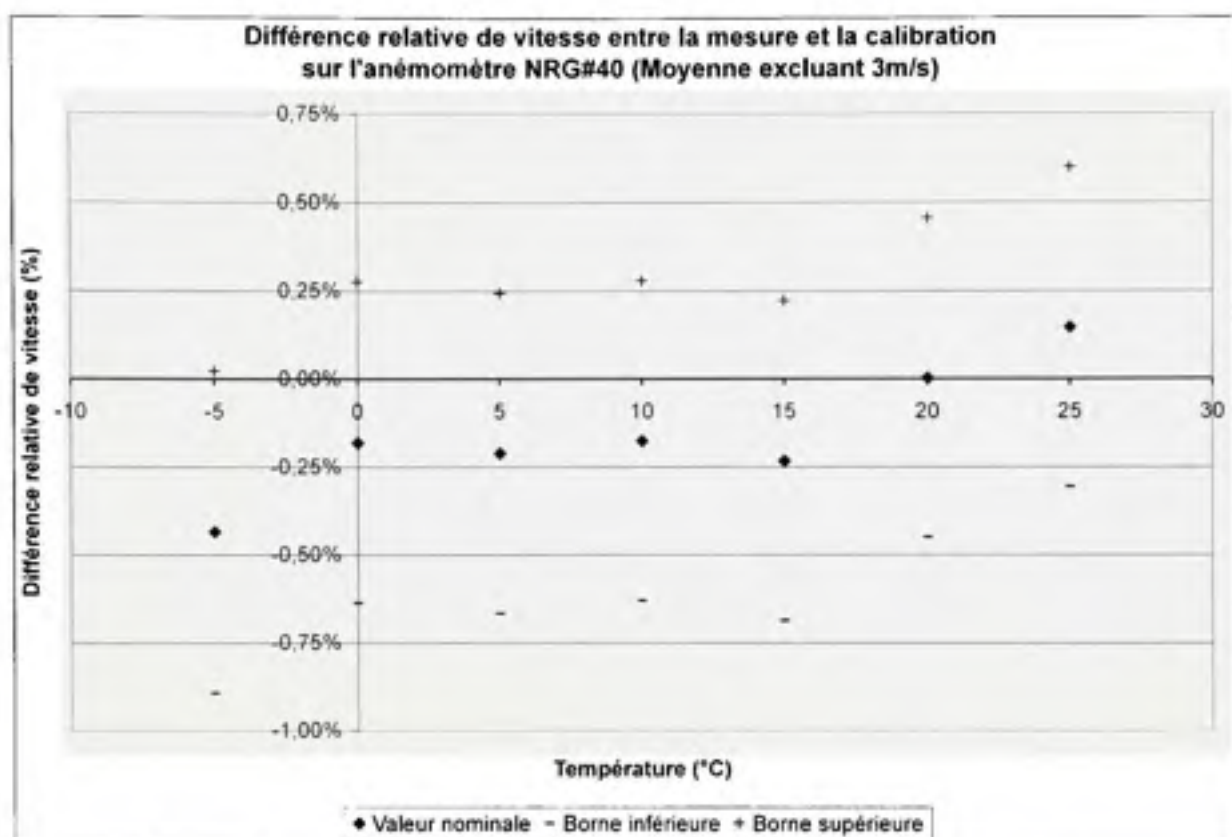
Influence de la température sur la mesure de l'anémomètre NRG#40

Température	3m/s	6m/s	9m/s	12m/s	15m/s	MOYENNE (6-15m/s)
25	2,051%	0,141%	0,215%	0,434%	-0,203%	0,147%
20	1,598%	-0,082%	-0,043%	0,297%	-0,158%	0,003%
15	-0,161%	-0,605%	-0,153%	0,094%	-0,267%	-0,233%
10	0,901%	-0,373%	-0,086%	0,045%	-0,288%	-0,176%
5	-1,623%	-0,524%	-0,043%	-0,061%	-0,218%	-0,212%
0	-1,425%	-0,326%	0,020%	-0,161%	-0,254%	-0,180%
-5	-2,344%	-0,946%	-0,293%	-0,322%	-0,177%	-0,434%

La figure illustre une baisse de la vitesse lue par l'anémomètre lorsque la température passe sous le point de congélation. La friction dans l'appareil pourrait, encore ici, être en cause. Considérant les températures de 0°C à 15°C, on observe un plateau dans l'évolution de la différence relative de vitesse.

Toutefois, lorsque l'on s'attarde aux températures supérieures à 15°C, on remarque une nette divergence de ce plateau. Cette observation est plutôt surprenante et nécessiterait de plus amples expérimentations. Si l'on considère l'incertitude rattachée à ces valeurs, une hausse aussi soudaine peut y être entièrement attribuable. Cette observation est aussi vraie pour les mesures sous le point de congélation.

Considérant la plage de température observée et l'ampleur de la plage d'incertitude par rapport aux variations observées, il est impossible de conclure, avec certitude, d'une influence de la température sur cet anémomètre.



**Figure 4.8** Influence de la température sur la mesure de l'anémomètre NRG#40

### NRG IcefreeIII

La procédure de vérification de l'influence de température pour l'anémomètre NRG IcefreeIII a été appliquée, comme pour sa calibration, avec et sans le système de chauffage en fonction.

La lecture des tableaux 4.21 et 4.22, présentant l'écart observé entre la référence de vitesse et l'étalonnage, nous permet de constater que les valeurs trouvées à 3m/s et 6m/s sont très élevées. Ce type d'appareil n'étant pas reconnu pour être des plus justes, et considérant le phénomène d'instabilité présenté précédemment, les données à ces vitesses ont été négligées dans l'interprétation des résultats et le calcul de la déviation moyenne.

Les figures 44 et 45 illustrent la déviation moyenne de l'instrument par rapport à sa calibration, chauffé et non-chauffé, respectivement.

Tableau 4.21

Influence de la température sur la mesure de l'anémomètre NRG IcefreeIII  
(chauffé)

Température	3m/s	6m/s	9m/s	12m/s	15m/s	MOYENNE (9-15m/s)
25	6,427%	-2,840%	0,007%	0,502%	-0,334%	0,058%
20	6,612%	-2,714%	0,606%	0,482%	-0,400%	0,229%
15	6,520%	-2,670%	1,746%	0,558%	-0,276%	0,676%
10	7,271%	-2,404%	1,855%	0,640%	0,079%	0,858%
5	3,189%	-4,013%	0,525%	-0,452%	-1,035%	-0,321%
0	8,918%	-1,511%	2,389%	0,737%	-0,183%	0,981%
-5	7,523%	-1,900%	1,701%	0,213%	-0,476%	0,479%

Tableau 4.22

Influence de la température sur la mesure de l'anémomètre NRG IcefreeIII  
(non-chauffé)

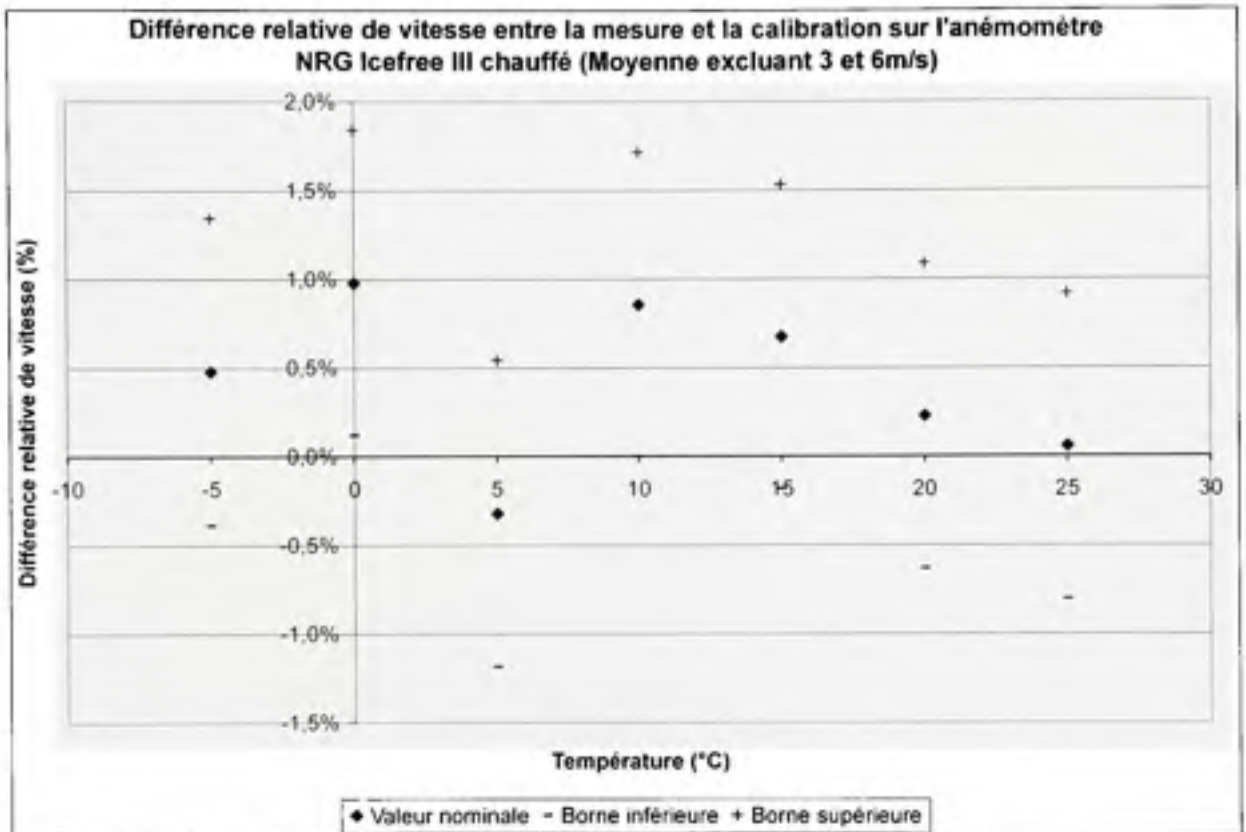
Température	3m/s	6m/s	9m/s	12m/s	15m/s	MOYENNE (9-15m/s)
25	6,159%	-2,364%	-0,098%	0,490%	-0,258%	0,045%
20	5,757%	-2,690%	1,330%	0,283%	-0,456%	0,386%
15	5,547%	-2,936%	1,353%	0,076%	-0,609%	0,273%
10	6,580%	-2,591%	1,404%	0,187%	-0,539%	0,351%
5	6,327%	-3,216%	0,995%	-0,067%	-0,786%	0,047%
0	4,910%	-3,569%	0,733%	-0,106%	-0,744%	-0,039%
-5	10,779%	-1,977%	1,291%	0,368%	-0,263%	0,465%

En premier lieu, si l'on s'attarde aux points correspondant au comportement de l'appareil lorsque le chauffage est enclenché, on observe un comportement plutôt irrégulier. Tout d'abord, la déviation obtenue à la température de calibration est assez importante. De plus, les mesures effectuées à 5°C divergent de façon assez importante du comportement observé pour les températures avoisinantes.

Avant de tirer des conclusions sur le comportement observé pour cet appareil, il est important de considérer la taille de la plage d'incertitude de mesure. Des déviations de l'ordre de 1%



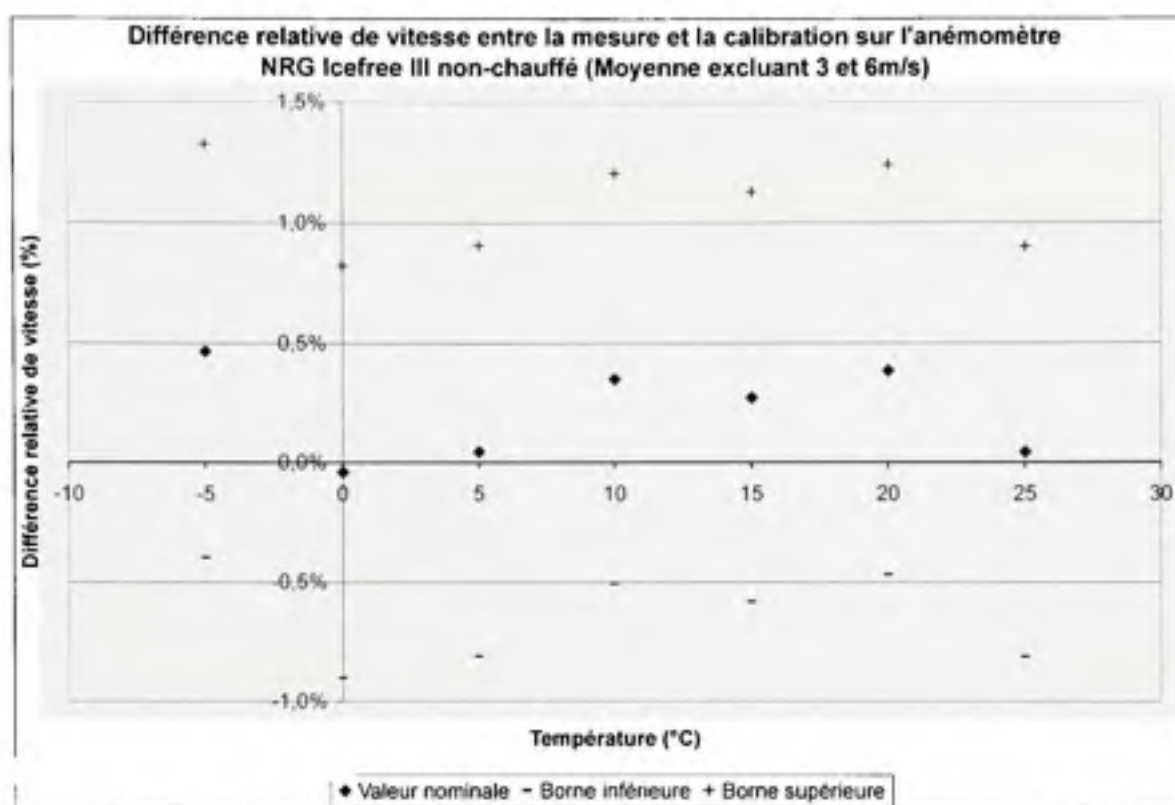
ont été observées mais l'incertitude s'y rattachant est d'ordre similaire. La déviation pourrait donc s'avérer nulle sur toute la plage de température observée.



**Figure 4.9** Influence de la température sur la mesure de l'anémomètre NRG IcefreeIII (chauffé)

Par la suite, à l'analyse de la figure correspondant au fonctionnement de l'appareil sans chauffage, on observe un comportement plus stable. Les valeurs observées varient dans une plage approximative de 0% à 0,5%. La déviation à 20°C est toutefois plutôt importante si l'on considère qu'il s'agit de la température à laquelle l'étalonnage a été effectué.

Aussi, il importe de se remémorer le fait que les déviations observées découlent de l'étalonnage obtenu précédemment. Le phénomène d'instabilité de la mesure à certaines fréquences de rotation n'ayant pas été exclu de cette équation, l'équation de référence utilisée se trouve donc entachée par ce comportement.



**Figure 4.10 Influence de la température sur la mesure de l'anémomètre  
NRG IcefreeIII (non-chauffé)**

### RMY-5103

Le tableau 4.23 présente l'ampleur de la déviation relative de vitesse entre la valeur mesurée à l'aide de la pression dynamique et la valeur attendue suite à l'équation obtenue par la procédure d'étalonnage de l'anémomètre.

Pour les cinq vitesses considérées, la déviation est d'ordre de grandeur similaire. Les résultats obtenus à 3m/s présentent une variation plus importante que pour les vitesses plus élevées, on y observe une plage de variation d'environ 0.6%, en comparaison à environ 0.2% pour les autres vitesses considérées. Dans tous les cas on retrouve une déviation très faible à la température d'étalonnage.

Considérant que le comportement est très similaire d'une vitesse à une autre, il a été décidé de considérer les résultats moyennés en fonction de la vitesse. La figure 46 présente les valeurs obtenues ainsi que l'incertitude qui s'y rattache.

Tableau 4.23

Influence de la température sur la mesure de l'anémomètre RMY-5103

Température	3m/s	6m/s	9m/s	12m/s	15m/s	MOYENNE
25	0,049%	0,101%	0,086%	0,071%	0,097%	0,081%
20	-0,058%	0,000%	0,003%	0,006%	-0,022%	-0,014%
15	-0,135%	-0,101%	-0,087%	-0,065%	-0,078%	-0,093%
10	-0,116%	-0,017%	-0,036%	0,032%	0,007%	-0,026%
5	0,006%	0,010%	-0,060%	0,025%	-0,032%	-0,010%
0	0,431%	0,162%	0,133%	0,119%	0,079%	0,185%
-5	0,477%	0,118%	0,050%	-0,032%	n/d	0,153%

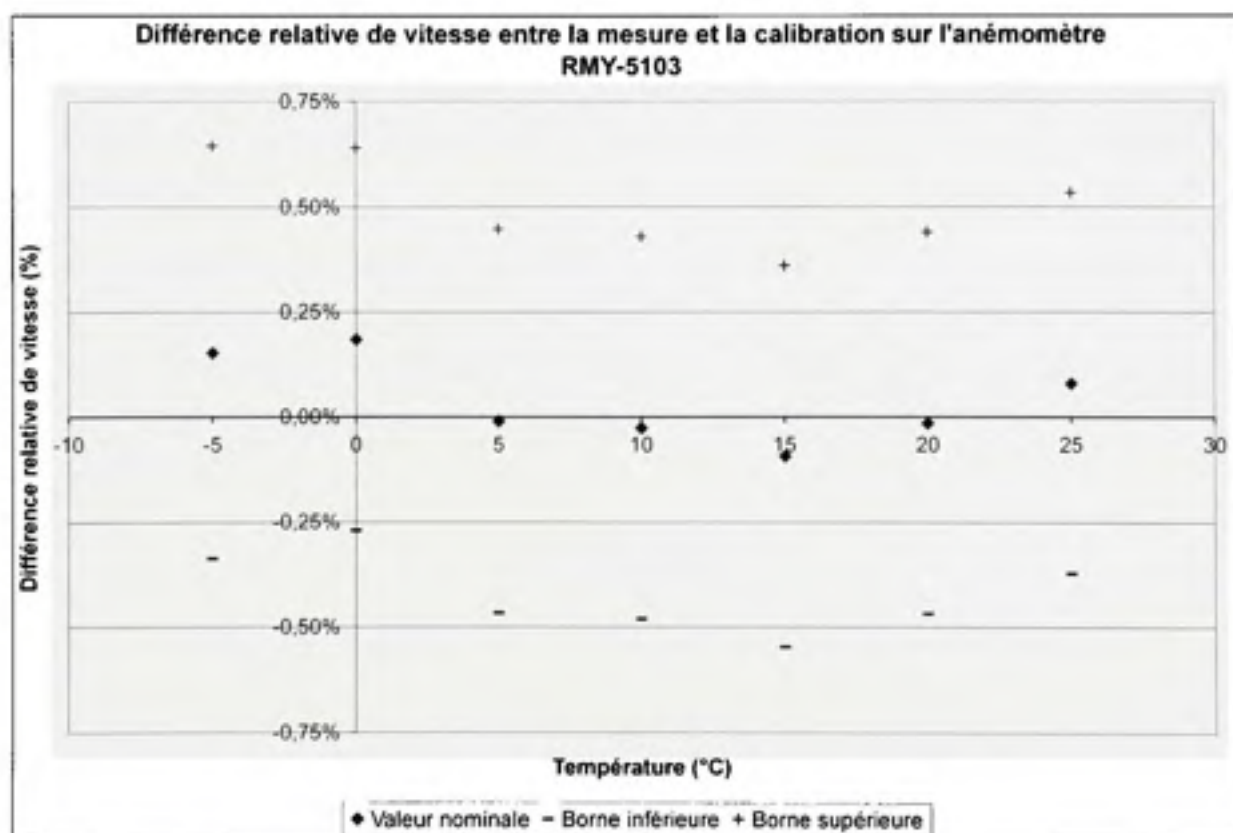


Figure 4.11 Influence de la température sur la mesure de l'anémomètre RMY-5103

Encore ici, les résultats obtenus ne semblent pas démontrer une influence marquée de la température. On observe une variation dans la déviation de l'instrument par rapport à sa calibration, mais, compte tenu de la taille de la zone d'incertitude, il n'est pas possible de la lier à l'influence de la température.

### RMY-5305

Le tableau 4.24 présente l'ampleur de la déviation entre la lecture de vitesse de l'anémomètre RMY-5305 et la lecture de la vitesse réelle dans la soufflerie.

Les cinq vitesses considérées ont une évolution quasi-similaire. On observe globalement une légère baisse de la valeur lue par l'anémomètre au fur et à mesure que la température diminue. Les données obtenues à 3m/s présentent une déviation plus décalée vers les valeurs positives que pour les autres vitesses. Dans ce cas, l'instrument mesurerait donc une valeur plus élevée que la mesure vraie. Les déviations restent tout de même d'un ordre de grandeur similaire, il a été choisi de représenter la moyenne sur toute la plage de vitesse. La figure 47 illustre les valeurs obtenues.

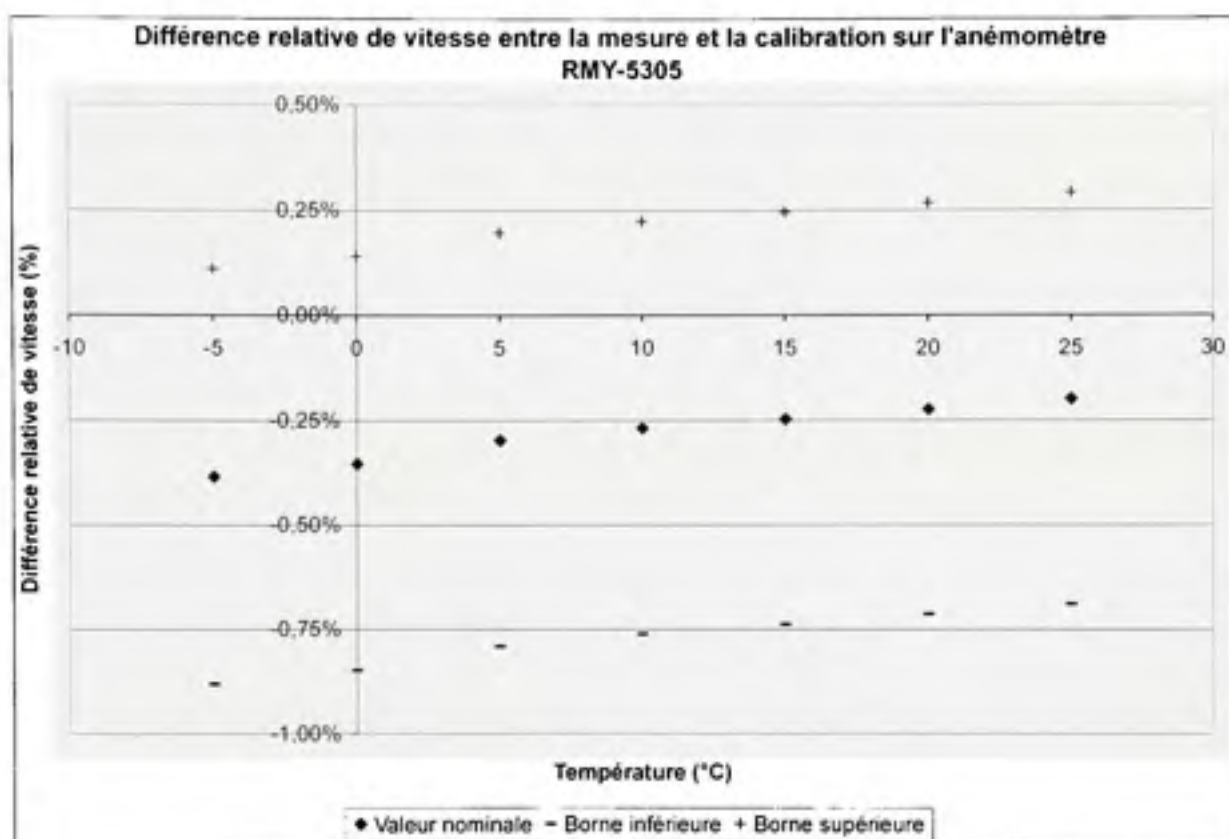
La valeurs moyennes visible sur cette figure illustre un comportement quasi-linéaire, avec une pente faiblement ascendante. La déviation à 20°C est toutefois assez importante. Comme pour les instruments précédents, la plage d'incertitude englobe une possibilité de déviation nulle à toutes les températures, on ne peut encore conclure sur une influence certaine de la température.

Tableau 4.24

Influence de la température sur la mesure de l'anémomètre RMY-5305

Température	3m/s	6m/s	9m/s	12m/s	15m/s	MOYENNE
25	0,285%	-0,319%	-0,355%	-0,351%	-0,254%	-0,199%
20	0,263%	-0,340%	-0,415%	-0,393%	-0,232%	-0,223%
15	0,071%	-0,359%	-0,384%	-0,382%	-0,180%	-0,247%
10	0,132%	-0,410%	-0,435%	-0,387%	-0,246%	-0,269%
5	0,048%	-0,446%	-0,457%	-0,415%	-0,218%	-0,297%
0	-0,111%	-0,473%	-0,484%	-0,374%	-0,327%	-0,354%
-5	-0,131%	-0,557%	-0,556%	-0,409%	-0,271%	-0,385%





**Figure 4.12** Influence de la température sur la mesure de l'anémomètre RMY-5305

#### 4.4 Résultats des tests d'impact des enregistreurs de données

Les résultats tabulés à cette section représentent la différence de lecture, obtenue par les enregistreurs de données utilisés pour ce projet, entre les signaux des anémomètres utilisés précédemment et celui de la mesure de pression dynamique. Ceux-ci découlent des combinaisons de mesures présentées au tableau 3.1.

Afin d'interpréter convenablement ces variations de lecture, il importe de considérer l'incertitude d'étalonnage rattachée aux différents anémomètres. Ces informations, calculées à la section 4.3.1 sont présentées au tableau 4.25.

Dans les tableaux 4.26 à 4.31 une variation de mesure positive se traduit par une lecture de vitesse supérieure provenant de la sonde de référence. Dans le cas où la variation est négative, l'anémomètre considéré enregistre une vitesse d'écoulement plus élevée que la référence.



Tableau 4.25

Incertitudes des étalonnages des anémomètres à 4m/s et 12m/s

Vitesse (m/s)	Incertitude (m/s)				
	Risø P2546a	NRG#40	NRG IcefreeIII	RMY-5103	RMY-5305
4	0,030	0,036	0,097	0,026	0,030
12	0,041	0,045	0,082	0,039	0,042

#### 4.4.1 NRG Symphonie

Les tableaux 4.26 et 4.27 regroupent, respectivement, les données découlant des branchements des anémomètres sur l'enregistreur NRG seul ou en parallèle avec les autres enregistreurs.

Premièrement, pour ce qui est du branchement des anémomètres Risø P2546a et RMY-5305, aucune divergence n'est observée, et ce, dans les deux cas de branchement. Il est donc possible de conclure que l'utilisation de ces anémomètres avec cet enregistreur ne cause pas de problèmes de mesure.

Ensuite, à l'observation des résultats obtenus pour les anémomètres NRG#40 et RMY-5103, on observe aucun changement dans le comportement des appareils lorsque l'on passe du branchement standard au branchement en parallèle. Toutefois, à 4m/s pour le NRG#40 et 12m/s pour le RMY-5103, la lecture obtenue dépasse la mesure de référence de 0.1m/s. Dans le premier cas, le fonctionnement à basse vitesse combiné à l'incertitude de l'étalonnage et le fait que les données ne sont disponibles qu'à une décimale, peut très bien expliquer cette observation. Pour ce qui est du RMY-5103, on considère encore l'influence de l'incertitude de la calibration et la possible erreur d'arrondi de l'enregistreur. Dans les deux cas, la différence de mesure étant plutôt faible, on ne peut considérer une quelconque incompatibilité entre les appareils. Des tests supplémentaires, avec une précision d'enregistrement supérieure, permettraient de confirmer ces observations.

Tableau 4.26  
Influence de l'enregistreur NRG sur la mesure des anémomètres  
(branchement solo)

4m/s	Temps	Risø P2546a	NRG#40	NRG IcefreeIII	RMY-5103	RMY-5305
	0-10	0	-0,1	0	0	0
	10-20	0	-0,1	0	0	0
	20-30	0	-0,1	0	0	0
	30-40	0	-0,1	0	0	0
	40-50	0	-0,1	0	0	0
	50-60	0	-0,1	0	0	0
	12m/s	Temps	Risø P2546a	NRG#40	NRG IcefreeIII	RMY-5103
0-10	0	0	0,1	-0,1	0	
10-20	0	0	0,1	-0,1	0	
20-30	0	0	0,1	-0,1	0	
30-40	0	0	0,1	-0,1	0	
40-50	0	0	0,1	-0,1	0	
50-60	0	0	0,1	-0,1	0	

Tableau 4.27  
Influence de l'enregistreur NRG sur la mesure des anémomètres  
(branchement parallèle)

4m/s	Temps	Risø P2546a	NRG#40	NRG IcefreeIII	RMY-5103	RMY-5305
	0-10	0	-0,1	-0,1	0	0
	10-20	0	-0,1	-0,1	0	0
	20-30	0	-0,1	-0,1	0	0
	30-40	0	-0,1	-0,1	0	0
	40-50	0	-0,1	-0,1	0	0
	50-60	0	-0,1	-0,1	0	0
	12m/s	Temps	Risø P2546a	NRG#40	NRG IcefreeIII	RMY-5103
0-10	0	0	0	-0,1	0	
10-20	0	0	0	-0,1	0	
20-30	0	0	0	-0,1	0	
30-40	0	0	0	-0,1	0	
40-50	0	0	0	-0,1	0	
50-60	0	0	0	-0,1	0	

#### 4.4.2 Ohmega Go-Logger

Les tableaux 4.28 et 4.29 résument les observations effectuées à l'aide de l'enregistreur de données Ohmega. Pour les tests sur cet enregistreur, l'anémomètre Risø P2546a n'a pu être utilisé car son mode de fonctionnement s'est avéré incompatible. Il a été tenté d'alimenter le signal de l'anémomètre à l'aide de la sortie en tension de l'enregistreur afin d'obtenir un signal pouvant être traité par le système, mais ce fut sans succès.

Tableau 4.28

Influence de l'enregistreur Ohmega sur la mesure des anémomètres  
(branchement solo)

<b>4m/s</b>	<b>Temps</b>	<b>NRG#40</b>	<b>NRG IcefreeIII</b>	<b>RMY-5103</b>	<b>RMY-5305</b>
	0-10	-0,1	0	0,2	0,1
	10-20	-0,1	0	0,2	0,1
	20-30	-0,1	0	0,2	0,2
	30-40	-0,1	0	0,2	0,2
	40-50	-0,1	0	0,2	0,2
	50-60	-0,1	0	0,2	0,2
<b>12m/s</b>	<b>Temps</b>	<b>NRG#40</b>	<b>NRG IcefreeIII</b>	<b>RMY-5103</b>	<b>RMY-5305</b>
	0-10	0	0	9,5	9,7
	10-20	0	0,1	9,5	9,7
	20-30	0	0	9,5	9,7
	30-40	0	0,1	9,5	9,7
	40-50	0	0	9,5	9,7
	50-60	0	0	9,5	9,7

Première observation, le comportement de l'anémomètre NRG#40 sur cet enregistreur est semblable à celui observé sur l'appareil NRG Symphonie. Encore ici, la faible différence de mesure observée ne peut être attribuable à une quelconque incompatibilité entre les appareils.

Par la suite, pour ce qui est du second appareil NRG, le IcefreeIII, la variation de lecture peut être considérée nulle. Les quelques différences de mesure observées sont causées par l'incertitude de mesure de l'anémomètre combinée à la précision d'enregistrement du système.

Pour terminer, dans le cas des deux appareils à hélices, RMY-5103 et RMY-5305, on observe un comportement plutôt particulier. Les déviations observées à 12m/s sont de l'ordre de 10 m/s. La fréquence de rotation de ce type d'appareil étant beaucoup plus élevée que pour les

anémomètres à coupoles, on observe une fréquence de signal pouvant facilement dépasser 100Hz. Toutefois, cet enregistreur n'étant pas conçu pour traiter des signaux présentant des fréquences aussi élevées, on observe un repliement du signal. Ce phénomène explique les grandes différences de mesure observées à 12m/s. Pour des observations à 4m/s, on observe une différence de mesure beaucoup plus faible, mais elle reste tout de même supérieure aux observations effectuées sur les autres enregistreurs. Compte tenu qu'à cette vitesse on observe une fréquence beaucoup plus élevée que pour les autres instruments, de l'ordre de 40Hz, il est également possible que l'enregistreur présente des problèmes de lecture à cette fréquence.

Tableau 4.29

Influence de l'enregistreur Omega sur la mesure des anémomètres  
(branchement parallèle)

<b>4m/s</b>	<b>Temps</b>	<b>NRG#40</b>	<b>NRG IcefreeIII</b>	<b>RMY-5103</b>	<b>RMY-5305</b>
	0-10	-0,1	0	0,2	0,2
	10-20	-0,1	0	0,2	0,2
	20-30	-0,1	0	0,2	0,2
	30-40	-0,1	-0,1	0,2	0,2
	40-50	-0,1	0	0,2	0,2
	50-60	-0,1	-0,1	0,2	0,2
<b>12m/s</b>	<b>Temps</b>	<b>NRG#40</b>	<b>NRG IcefreeIII</b>	<b>RMY-5103</b>	<b>RMY-5305</b>
	0-10	0	0	9,4	9,7
	10-20	0	0	9,4	9,7
	20-30	0	0	9,4	9,7
	30-40	0	0	9,4	9,7
	40-50	0	0	9,4	9,7
	50-60	0	0	9,4	9,7

Pour remédier à ce phénomène, le fabricant suggère l'utilisation d'anémomètres avec une sortie 4-20mA ou 0-5V. À défaut de disposer de ce type d'appareil, on nous a suggéré d'ajouter un convertisseur fréquence-voltage sur les entrées pour lesquelles la fréquence excède la limite de l'enregistreur. Cette constatation ayant toutefois été faite suite à la fin des tests, il fut impossible de reproduire les tests en incluant ce dispositif.

#### 4.4.3 SecondWind Nomad2

Les tableaux 4.30 et 4.31 présentent les résultats découlant des données recueillies à l'aide de l'enregistreur SecondWind. La plus grande précision des valeurs recueillies sur cet enregistreur permet une analyse plus juste des observations effectuées.

Tableau 4.30  
Influence de l'enregistreur SecondWind sur la mesure des anémomètres  
(branchement solo)

<b>4m/s</b>	<b>Temps</b>	<b>Risø P2546a</b>	<b>NRG#40</b>	<b>NRG IcefreeIII</b>	<b>RMY-5103</b>	<b>RMY-5305</b>
	0-10	0,02	-0,07	-0,09	-0,02	0,01
	10-20	0,01	-0,08	-0,09	-0,02	0,01
	20-30	0,01	-0,07	-0,09	-0,02	0,01
	30-40	0,01	-0,07	-0,1	-0,02	0,01
	40-50	0,02	-0,07	-0,1	-0,02	0,01
	50-60	0,02	-0,07	-0,1	-0,02	0,01
<b>12m/s</b>	<b>Temps</b>	<b>Risø P2546a</b>	<b>NRG#40</b>	<b>NRG IcefreeIII</b>	<b>RMY-5103</b>	<b>RMY-5305</b>
	0-10	-0,01	0,04	0,02	-0,08	-0,01
	10-20	-0,01	0,03	0,02	-0,08	-0,01
	20-30	0	0,03	0,01	-0,08	-0,01
	30-40	-0,01	0,02	0,02	-0,08	-0,01
	40-50	-0,01	0,02	0	-0,08	-0,01
	50-60	-0,02	0,02	0,01	-0,08	-0,02

Premièrement, comme pour les deux enregistreurs précédents, le fait de brancher les anémomètres uniquement sur l'enregistreur SecondWind ou en parallèle sur plus d'un appareil ne semble pas avoir d'effets notables sur les résultats.

Ensuite, si l'on se concentre sur les observations à 4m/s, on constate que pour tous les anémomètres, à l'exception du NRG#40, la différence de mesure peut être assimilable à l'incertitude de mesure. Le NRG#40 est le seul pour lequel la divergence observée est supérieure à l'incertitude.



Pour ce qui est des mesures effectuées à 12m/s, une observation similaire peut être faite. Dans ce cas, le seul anémomètre dont la différence de mesure avec la référence est supérieure à l'incertitude de mesure est le RMY-5103. Pour conclure sur l'influence de cet enregistreur, il convient de revenir sur les causes possibles des observations effectuées sur les anémomètres NRG#40 et RMY-5103.

Tableau 4.31

Influence de l'enregistreur SecondWind sur la mesure des anémomètres  
(branchement parallèle)

4m/s	Temps	Risø P2546a	NRG#40	NRG IcefreeIII	RMY-5103	RMY-5305
	0-10	0,01	-0,1	-0,06	-0,02	0,01
	10-20	0,02	-0,1	-0,07	-0,02	0,01
	20-30	0,02	-0,09	-0,08	-0,02	0,01
	30-40	0,02	-0,08	-0,07	-0,02	0,01
	40-50	0,01	-0,07	-0,07	-0,02	0,01
	50-60	0,02	-0,07	-0,08	-0,02	0,01
	12m/s	Temps	Risø P2546a	NRG#40	NRG IcefreeIII	RMY-5103
0-10		0	0	0,02	-0,09	-0,01
10-20		0	0	0,02	-0,08	0
20-30		-0,01	0	0,02	-0,09	-0,01
30-40		-0,01	0	0,02	-0,09	-0,01
40-50		-0,01	0,01	0,01	-0,09	-0,01
50-60		0	0	0,02	-0,09	-0,01

Tout d'abord, pour l'appareil NRG, les valeurs quasi nulles obtenues à 12m/s portent à croire que les observations effectuées à 4m/s sont plutôt attribuables au comportement de l'anémomètre à basse vitesse. Une déviation sur la mesure à haute vitesse aurait également été visible si l'enregistreur avait été en cause.

En ce qui a trait à l'anémomètre RMY-5103, les déviations observées, en branchements seul et en parallèle, s'élèvent à environ le double de la valeur de l'incertitude de l'étalonnage. Cette différence de mesure correspond à une surévaluation de la vitesse d'environ 0.75% par l'anémomètre. Considérant l'exactitude de mesure de  $\pm 0.3\text{m/s}$  prescrite par le fabricant, il est difficile d'incriminer l'enregistreur de données pour une déviation de mesure de cet ordre. De plus, le RMY-5305, générant un signal de fréquence similaire, fonctionne sans déviation

notable sur cet enregistreur. Les problèmes de lecture de fréquence, observés sur l'appareil Ohmega, sont donc à exclure dans ce cas.

Pour terminer, suite à ces observations, on ne peut affirmer que l'enregistreur de données SecondWind Nomad2 exerce une influence notable sur le traitement des signaux des anémomètres considérés.

## CHAPITRE 5

### CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Ce chapitre présente un condensé des résultats obtenus suite à ce projet. Un retour sur la problématique précède la présentation des conclusions obtenues suite aux analyses effectuées. Les contributions découlant de ce travail sont par la suite présentées avant de conclure sur certaines recommandations provenant des observations effectuées au cours du projet.

#### 5.1 Retour sur la problématique

L'évaluation de la ressource éolienne étant la base d'un projet de parc éolien, il est important de comprendre les différentes influences sur les instruments utilisés.

Pour ce faire, ce projet a été consacré à l'analyse de l'impact, sur divers appareils disponibles sur le marché, des facteurs suivants :

- La variation de la température de fonctionnement.
- Le choix des combinaisons anémomètre/enregistreur.
- La vitesse verticale.

Les deux premiers facteurs ont été vérifiés en condition d'utilisation réelle, sur une tour de mesure anémométrique, et en laboratoire, par des tests en soufflerie. Le dernier point a été caractérisé uniquement par des mesures extérieures.

#### 5.2 Compte rendu des conclusions

Les conclusions découlant de ce projet sont présentées ci-dessous. Elles sont subdivisées selon le fait qu'elles proviennent des mesures extérieures ou des tests en laboratoire.

##### 5.2.1 Conclusions sur les mesures extérieures

Les résultats des mesures extérieures se présentent selon deux grands thèmes. Le premier regroupe les conclusions découlant des comparaisons entre les mesures des anémomètres redondants, à 18 et 20 mètres, sur l'enregistreur NRG Symphonie. Le second représente les conclusions résultant des comparaisons des mesures des anémomètres NRG#40 effectuées en parallèle sur les trois enregistreurs.

### **Anémomètres redondants**

La première analyse effectuée sur les anémomètres redondants a été de comparer les distributions de vent. La comparaison entre les anémomètres NRG#40 et Risø P2546a, tous deux à coupoles, a permis d'observer des distributions très similaires. La seconde comparaison, entre les appareils NRG#40 et RMY-5103, a toutefois démontrée des différences plus marquées. Dans les deux cas, une part de cette différence de mesure est attribuable au comportement des appareils à basse vitesse et à la qualité des équations de calibration utilisées. Pour ce qui est de la comparaison entre l'anémomètre à coupoles NRG et l'anémomètre à hélice R.M. Young, la plus grande différence observée dans la quantification de la ressource serait attribuable au retard dans la réponse de la girouette du RMY-5103. Les données provenant d'un site dont la vitesse moyenne est faible, de l'ordre de 4m/s, l'appareil semble avoir de la difficulté à répondre rapidement aux changements d'orientation, ce qui résulte en une sous évaluation de la ressource.

En second lieu, les données des anémomètres furent analysées en fonction de la température observée sur le site. La plage de température observée, de -15°C à environ 25°C, n'a pas permis de constater une influence marquée de la température sur aucun des quatre anémomètres.

Troisièmement, l'influence de la vitesse verticale sur la lecture des anémomètres a été vérifiée. De façon similaire aux comparaisons en fonction de la température, une variation est observée entre les trois classes de vitesse. Toutefois, considérant l'incertitude de la mesure des appareils et l'ampleur de ces variations, on ne peut conclure sur une influence marquée de la vitesse verticale.

Pour terminer, à l'observation des graphiques des comparaisons en fonction de la température et de la vitesse verticale, il a été constaté que l'anémomètre NRG#40 présentait une tendance à sous évaluer la vitesse lorsque la vitesse passait sous la barre des 2m/s.

### **Enregistreurs multiples**

Les statistiques rattachées aux données de vent obtenues lors de la première partie du traitement des données sont, pour les deux anémomètres considérés, semblables. Une légère différence a été observée mais celle-ci a été attribuée aux erreurs de lecture des signaux instantanés acheminés aux enregistreurs. Les histogrammes de vitesse présentent, à basse vitesse, des va-

riations non négligeables mais les distributions de Weibull s'y rattachant restent toutefois très similaire d'un enregistreur à l'autre.

Pour ce qui est des comparaisons en fonction de la température, la gamme de variation observée, de 0°C à environ 25°C, ne permet pas de conclure sur une influence de ce paramètre sur le traitement des enregistreurs. D'importantes variations ont été constatées, sur les différentes classes de température, entre les enregistreurs. Toutefois, compte tenu de la faible ampleur des changements de température, il est impossible qu'un impact aussi important puisse être causé par ce seul paramètre.

Pour terminer, les tests d'impact de vitesse verticale ont été négligés. Le degré de corrélation entre les différents points de mesure étant très faible, de l'ordre de 25% dans certains cas, il n'a pas été jugé sage de tirer des conclusions de ces données.

### **5.2.2 Conclusions sur les tests en soufflerie**

Cette section porte sur les divers aspects des tests effectués dans la soufflerie du département de Génie Mécanique de l'Université Laval.

#### **Installation utilisée**

Tout d'abord, il importe de préciser que, avant les tests sur les équipements, les installations utilisées ont été vérifiées afin de valider leur conformité aux exigences minimales énoncées pour les procédures de calibration d'anémomètre à rotor.

Suite aux tests de stabilité de vitesse effectués il a été démontré que la qualité de l'écoulement dans la soufflerie répondait aux normes en vigueur. Également, dans le cas des instruments testés, les dimensions de la section d'essai répondent aux critères concernant le ratio de blocage maximum prescrit.

Afin de rendre possible la calibration certifiée d'anémomètres à l'aide de ces installations, il suffirait d'instaurer des procédures répondant aux normes MEASNET et obtenir les certifications pour les équipements de mesure constituant l'installation.

De plus, la présence d'un système de contrôle de température ajoute une possibilité très intéressante pour des tests supplémentaires sur d'autres appareils liés à la mesure de vent.



## **Influence de la température**

Les conclusions obtenues ci-dessous sont basées sur des essais à des vitesses variant de 3m/s à 15m/s, couvrant une plage de température de -5°C à 25°C.

Premier point à noter, sur la plage de température observée, aucun des instruments testés n'a démontré une influence notable face aux variations de température. Tous les instruments ont présenté des variations de mesure lors des changements de température, mais, compte tenu de la faible taille de celles-ci par rapport à l'incertitude rattachée aux étalonnages et aux appareils, elles ont été jugées négligeables. Les conclusions qui suivent portent donc uniquement sur les valeurs nominales de la déviation de la lecture des instruments et sont à prendre avec précautions.

Pour l'anémomètre Risø P2546a, lors des tests à des températures supérieures à -5°C, on observe un plateau dans la variation de la mesure par rapport à la référence. Exceptionnellement, les conditions présentes lors des tests de cet appareil ont permis des mesures jusqu'à -10°C. À cette température, une baisse de la vitesse mesurée a été observée.

L'anémomètre NRG#40 présente également une baisse marquée de la mesure de vitesse lorsque la température passe sous le point de congélation. De plus, on observe le phénomène inverse lorsque le mercure dépasse 15°C.

L'appareil chauffant utilisé, le NRG IcefreeIII, présente un comportement plutôt particulier. Lorsque le système de chauffage n'est pas enclenché, le comportement face aux variations de température semble relativement stable. Toutefois, lorsque le chauffage est utilisé l'appareil présente des déviations beaucoup plus marquées. Lors des calibrations, des instabilités dans le signal de l'appareil ont été observées sur une plage de fréquence correspondant à des vitesses d'environ 6 à 10m/s. Les déviations observées sont donc possiblement le fruit de l'influence de ces instabilités sur l'étalonnage utilisé.

L'anémomètre à hélice RMY-5103 est, parmi les instruments testés, celui pour lequel l'incertitude de calibration est la plus faible. Malgré cela, le comportement de cet appareil face aux variations de température ne semble pas refléter une dépendance marquée face à ce paramètre.

Pour terminer, le second appareil R.M. Young, le RMY-5305, présente un comportement très linéaire face aux variations de la température. On observe une baisse constante de la vitesse lue par l'anémomètre à mesure que la température diminue. La différence de lecture mesurée à la

température de calibration étant toutefois d'une importance non négligeable ce comportement nécessiterait de plus amples vérifications.

### **Influence des branchements**

Les conclusions en ce qui a trait aux tests de connections proviennent de données recueillies lors du branchement des anémomètres sur l'un des trois enregistreurs ou sur plusieurs branchés en parallèle. L'objectif de ces tests est d'infirmer ou de confirmer l'influence du choix des appareils sur certaines irrégularités observées sur les données recueillies sur la tour de mesure.

Tout d'abord, il a été noté que le fait de brancher un même instrument sur divers enregistreurs n'a pas eu de répercussions notables sur les données obtenues. La présence de bruit électronique aurait pu être la cause de données erronées mais ce phénomène n'a pas été observé. Les conclusions obtenues au sujet de l'influence des branchements font donc abstraction du nombre d'enregistreur recevant le signal de l'anémomètre.

À l'analyse des données de l'enregistreur NRG Symphonie, aucune incompatibilité n'a pu être détectée entre celui-ci et les anémomètres qui y ont été branchés. Des variations, de l'ordre de 0.1m/s, ont été observées entre les mesures de l'enregistreur et la lecture de la vitesse de référence mais, compte tenu de l'incertitude de mesure des anémomètres et de la résolution des données recueillies par l'enregistreur, celles-ci n'ont pas été considérées suffisamment grandes pour être attribuées à un problème d'incompatibilité entre les appareils.

Pour ce qui est du bilan découlant des tests effectuées sur l'enregistreur Ohmega Go-logger, deux constatations ont été faites. Premièrement, il s'est avéré impossible d'obtenir des données valides provenant de l'anémomètre Risø P2546a. Pour rendre le signal de l'anémomètre compréhensible, il a été tenté de l'alimenter en le reliant à la sortie en tension de l'enregistreur, cette procédure est toutefois restée sans résultat. Ensuite, il a été constaté que les anémomètres à hélice utilisés, RMY-5103 et RMY-5305, ne sont pas compatibles avec cet enregistreur. La limite de lecture fréquentielle de l'appareil étant trop basse, un phénomène de repliement est constaté lors de l'interprétation du signal.

Pour terminer cette section, l'analyse de compatibilité de l'enregistreur SecondWind Nomad2 est abordée. À ce sujet, aucun problème n'a pu être attribué au fonctionnement de l'enregistreur. Il a par contre été nécessaire, conformément aux recommandations du guide de l'appa-

reil, d'alimenter en tension le signal de l'anémomètre Risø P2546a afin d'obtenir un signal pouvant être interprété par le système d'acquisition.

### 5.3 Contributions

L'apport de ce projet à l'industrie éolienne canadienne se retrouve sous deux aspects distincts. D'une part, les caractéristiques de fonctionnement en condition réelle de certains des appareils commerciaux les plus utilisés dans la quantification de ressource éolienne ont été documentées. Les avantages et les inconvénients s'y rattachant ont ainsi pu être documentés afin d'en permettre une utilisation plus éclairée.

De plus, la portion du projet réalisée dans la soufflerie du département de génie mécanique de l'Université Laval a permis de vérifier la conformité de cette installation face aux normes du MEASNET. Les caractéristiques de celle-ci répondant aux normes établies, l'industrie éolienne se voit offrir la possibilité, moyennant l'implantation de procédures de travail normalisées, de disposer d'une installation permettant d'effectuer des calibrations d'anémomètres à couples répondant aux standards de l'industrie.

### 5.4 Recommandations

Les recommandations en lien avec ce projet se présentent sous trois aspects : les possibilités d'investigations supplémentaires concernant l'influence en température, les vérifications au sujet de problèmes de fonctionnement observés sur certains appareils et les choix à privilégier dans les instruments testés.

Tout d'abord, suite aux conclusions obtenues, il pourrait s'avérer profitable d'effectuer des prises de données à des températures inférieures à celles ayant été atteintes dans le présent projet. Les performances du système de climatisation de la soufflerie ayant été améliorées, ces tests permettraient de confirmer les tendances observées avec certains anémomètres. En ce qui concerne les mesures extérieures, il pourrait être intéressant d'obtenir des données sur un site ayant un potentiel éolien plus important, l'influence de la mesure à faible vitesse serait ainsi réduite.

Ensuite, des vérifications supplémentaires pourraient être utiles sur certains des instruments. Le phénomène d'instabilité observé sur l'anémomètre NRG IcefreeIII pourrait être étudié plus en détail. Il serait intéressant de tenter de régler convenablement ce problème afin de vérifier

son impact sur l'étalonnage de l'appareil ainsi que son comportement face à des températures changeantes.

De plus, lors des tests en soufflerie, le rotor du IcefreeIII s'est retrouvé à plusieurs reprises en position où les forces tentant de le faire tourner s'équilibraient de part et d'autre. Le rotor se mettait alors à osciller, sans toutefois tourner, jusqu'à une vitesse approximative de 10m/s. À partir de ce moment, l'équilibre se trouvait rompu et l'instrument se remettait à fonctionner normalement. Il pourrait être intéressant de vérifier si ce comportement n'est pas susceptible de se reproduire en utilisation normale de l'appareil.

Il pourrait également s'avérer profitable de réduire l'incertitude rattachée aux prises de mesure en soufflerie. Cette amélioration permettrait de conclure avec une plus grande certitude sur l'influence de la température sur les instruments. Celle-ci pourrait être réduite sous deux aspects. Premièrement, l'incertitude de type A pourrait être réduite en améliorant le coefficient de détermination de l'étalonnage moyen. La réalisation d'un plus grand nombre d'étalonnages permettrait l'atteinte de cet objectif. Le second aspect vise à réduire l'incertitude de type B. Pour atteindre cet objectif, l'utilisation d'équipements plus performants et l'amélioration de l'installation seraient envisageables. Il faut toutefois noter que, pour fin de simplification des calculs d'incertitude, différentes contributions pourraient avoir été légèrement surévaluées. La faible valeur des variations observées nécessitant une incertitude réduite, il serait profitable de mener une analyse d'incertitude propre à l'installation utilisée. Cette procédure permettrait de réduire l'incertitude de mesure sans avoir à modifier l'équipement utilisé.

Il importe de noter que, malgré le fait qu'il semble non recommandable de comparer entre elles les mesures ponctuelles effectuées sur différents enregistreurs, les distributions de vents résultant des différents enregistreurs sont similaires.

Pour terminer, en ce qui concerne les recommandations quant au choix d'un anémomètre, il importe de préciser que, à moins d'utilisation en présence non négligeable de givre, l'anémomètre NRG IceFree III n'est pas recommandé pour la quantification de ressource éolienne. Il peut être utilisé pour des mesures météorologiques d'usage, mais, considérant son comportement irrégulier et sa précision de mesure plutôt faible, d'autres appareils seraient à privilégier. Le premier choix serait le Riso P2546a. Ce choix s'explique, entre autre, par une très faible sensibilité à la température jusqu'à environ -10°C, une faible incertitude de mesure et par une réponse angulaire se rapprochant de la réponse cosinusoidale. Le second choix se tournerait vers le NRG#40. Ce choix présente des caractéristiques se rapprochant du Riso P2546a.

Toutefois, la sensibilité aux températures sous zéro semble plus élevée et la réponse angulaire présente un comportement s'éloignant de la réponse idéale lorsque l'inclinaison dépasse  $20^\circ$ . Pour ce qui est des anémomètres à hélice, considérant leur comportement à basse vitesse en conditions turbulentes, il ne sont pas à recommander pour la caractérisation du potentiel éolien.



## ANNEXE I

### FIGURES ADDITIONNELLES

Cette annexe rassemble les graphiques, résultant des mesures extérieures, n'ayant pas été présentés dans le corps du mémoire.

#### **I.1 Comparaisons en fonction de la température**

##### **I.1.1 Mesures avec les anémomètres redondants à 20m**

La figure 48 présente les régressions obtenues entre les anémomètres NRG#40 et Risø P2546a. Alors que la figure 49 présente la différence de mesure entre les deux instruments, si l'on considère ces régressions.

Comparaison des lectures des anémomètres NRG#40 à 20m et Riso P2546a sur l'enregistreur NRG en fonction de la température

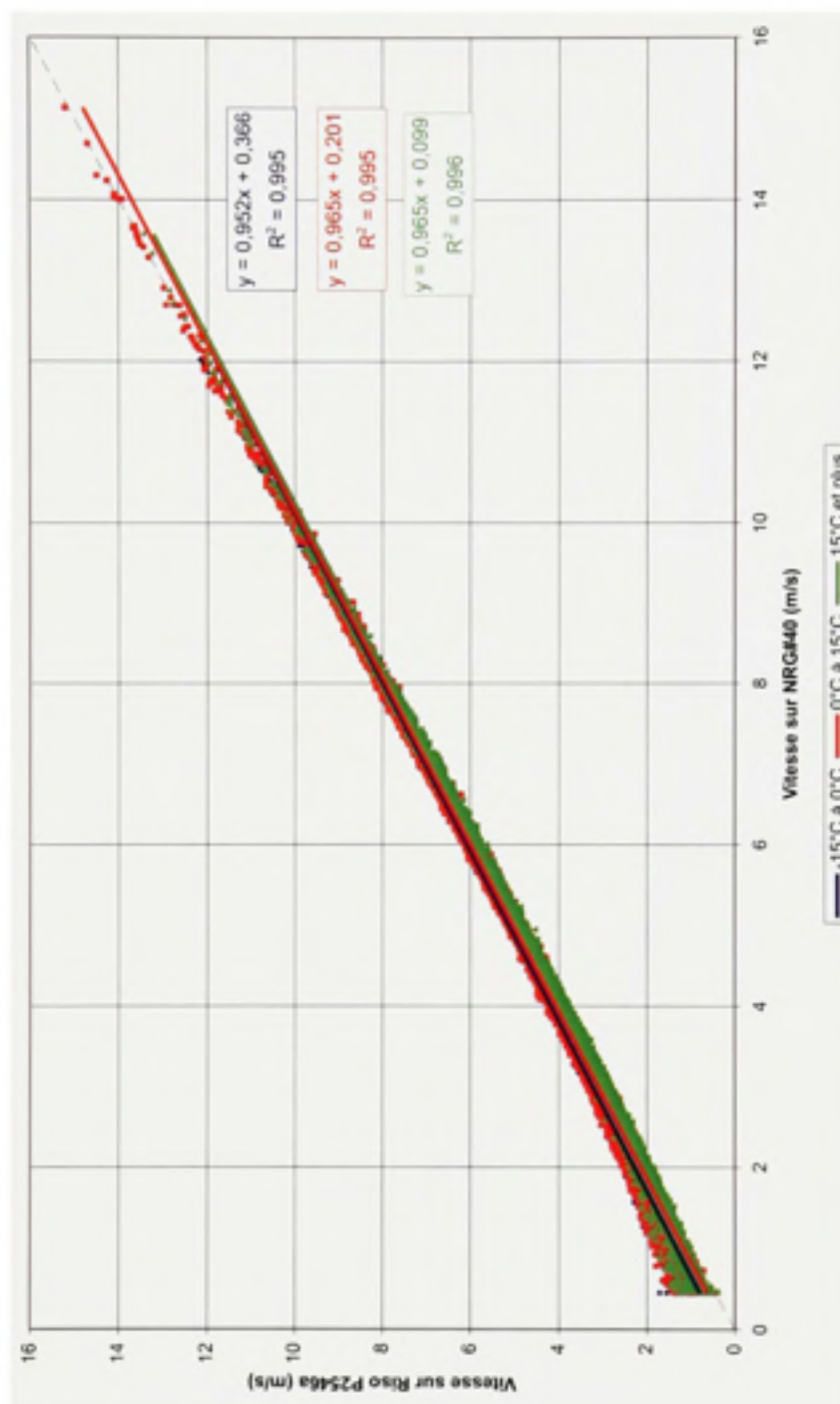
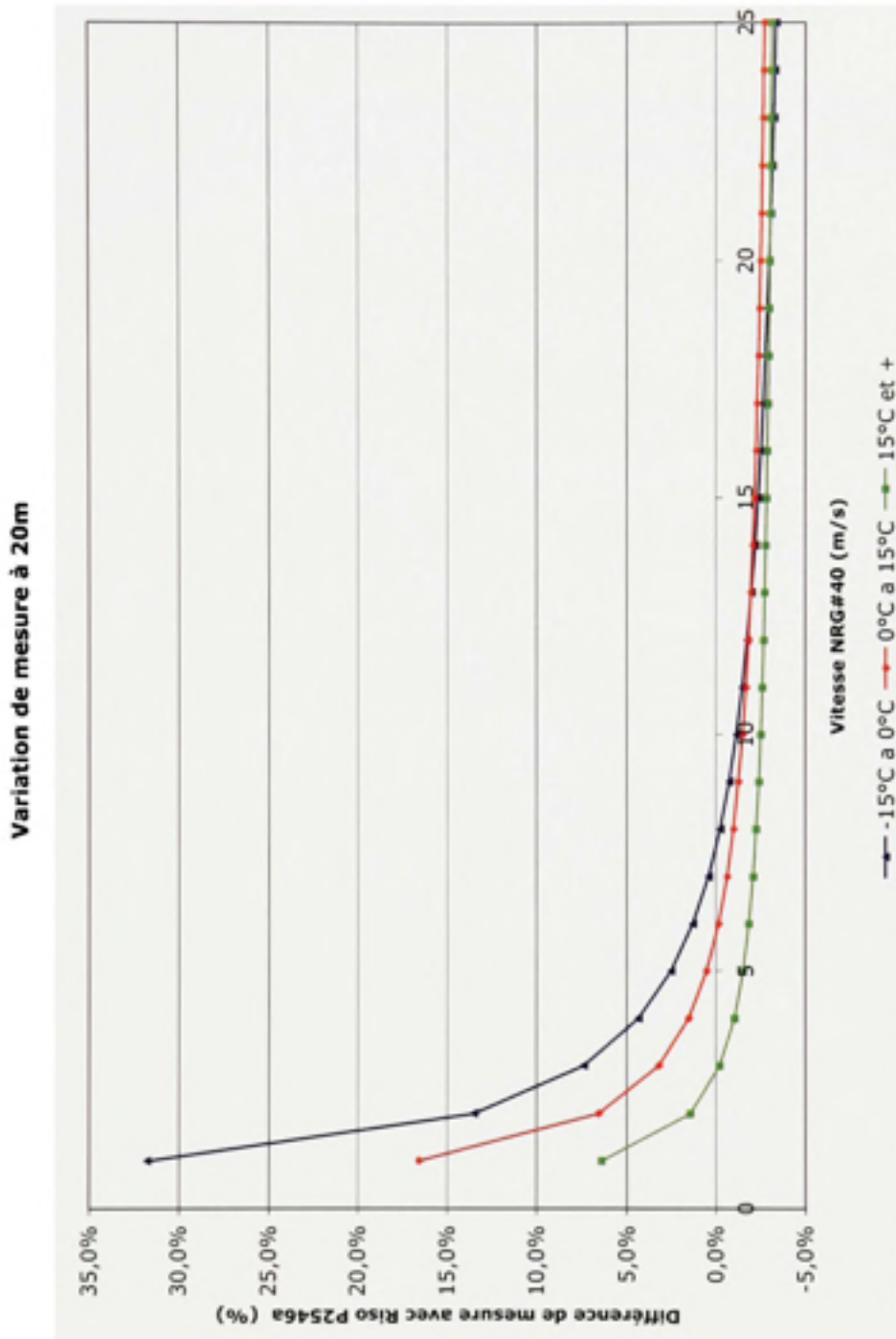


Figure I.1 Lecture des anémomètres NRG#40 (20m) et Riso P2546a en fonction de la température



**Figure I.2** *Variation de lecture des anémomètres NRG#40 (20m) et Risø P2546a en fonction de la température*

### **I.1.2 Mesures avec les anémomètres redondants à 18m**

La figure 50 présente les régressions obtenues entre les anémomètres NRG#40 et RMY-5103. Alors que la figure 51 présente la différence de mesure entre les deux instruments, si l'on considère ces régressions.

Comparaison des lectures des anémomètres NRG#40 à 18m et RMY-5103 sur le l'enregistreur NRG en fonction de la température

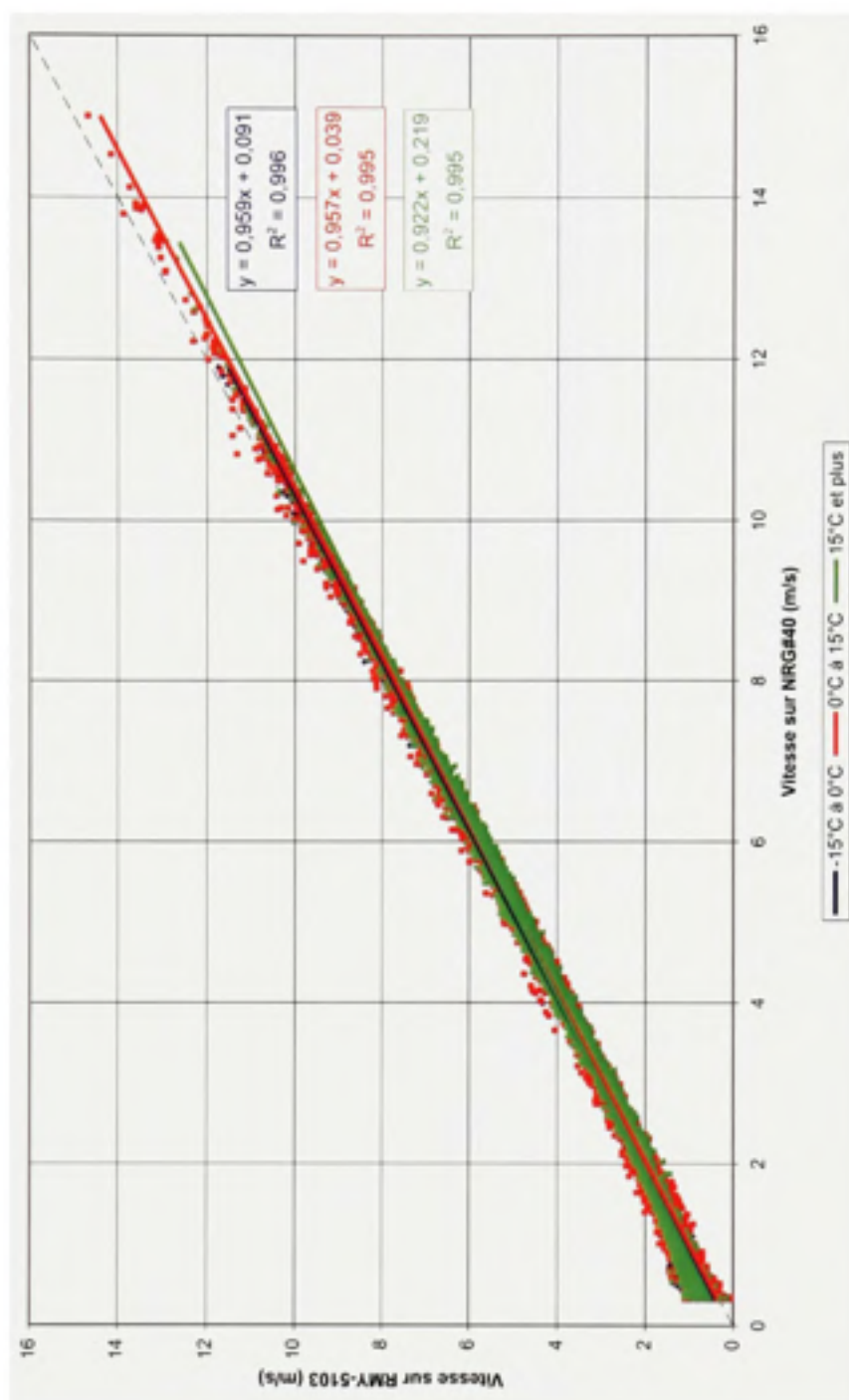
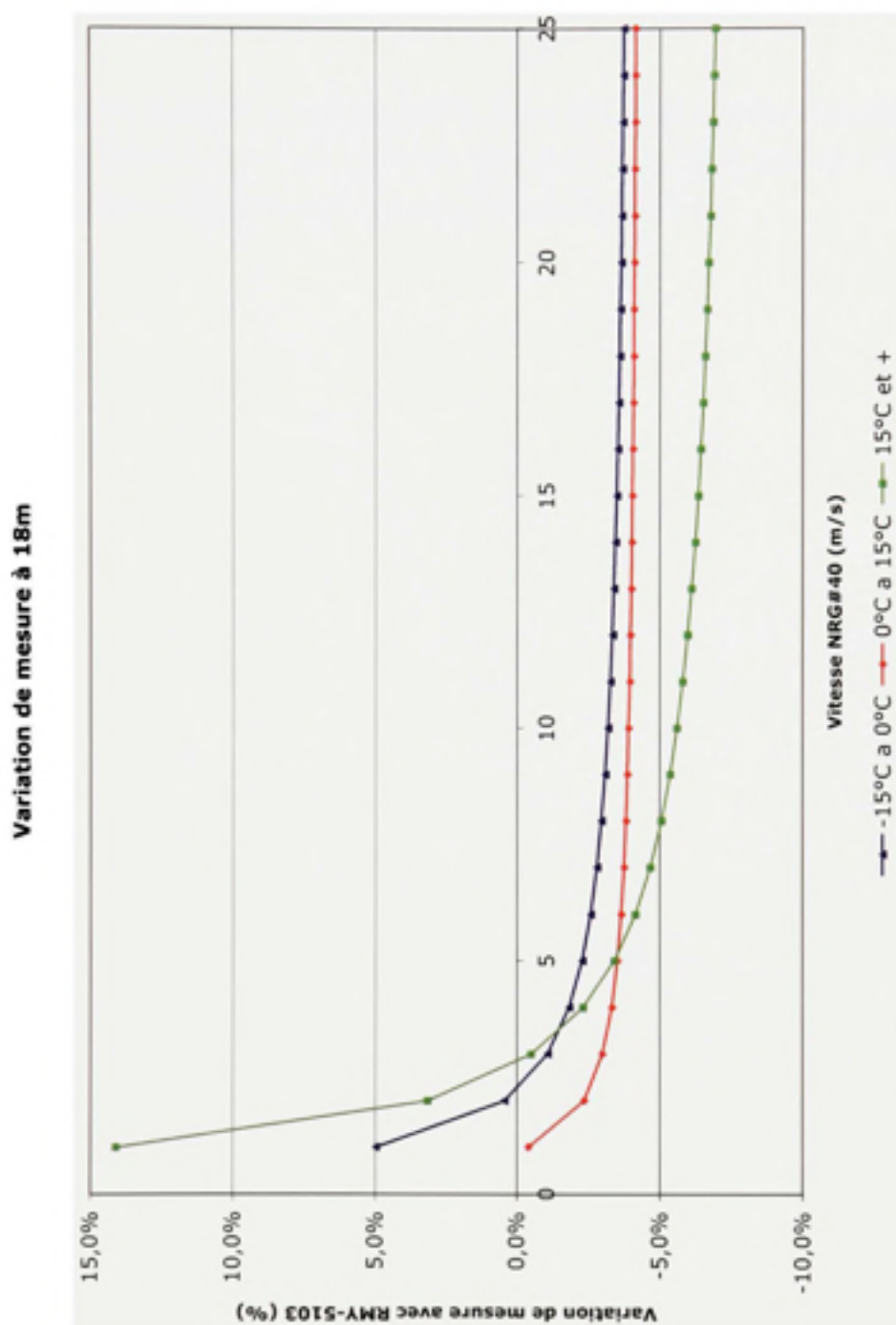


Figure I.3 Lecture des anémomètres NRG#40 (18m) et RMY-5103 en fonction de la température





**Figure I.4** *Variation de lecture des anémomètres NRG#40 (18m) et RMY-5103 en fonction de la température*

### **I.1.3 Mesures avec l'anémomètre NRG#40 à 20m**

Les figures 52 à 54 présentent les régressions obtenues, entre les différents enregistreurs, pour l'anémomètre NRG#40 à 20m. Alors que les figures 55 à 57 présentent les différences de mesure entre les divers appareils, si l'on considère ces régressions.

Comparaison des lectures de l'anémomètre NRG#40 à 20m sur les enregistreurs NRG et Ohmega en fonction de la température

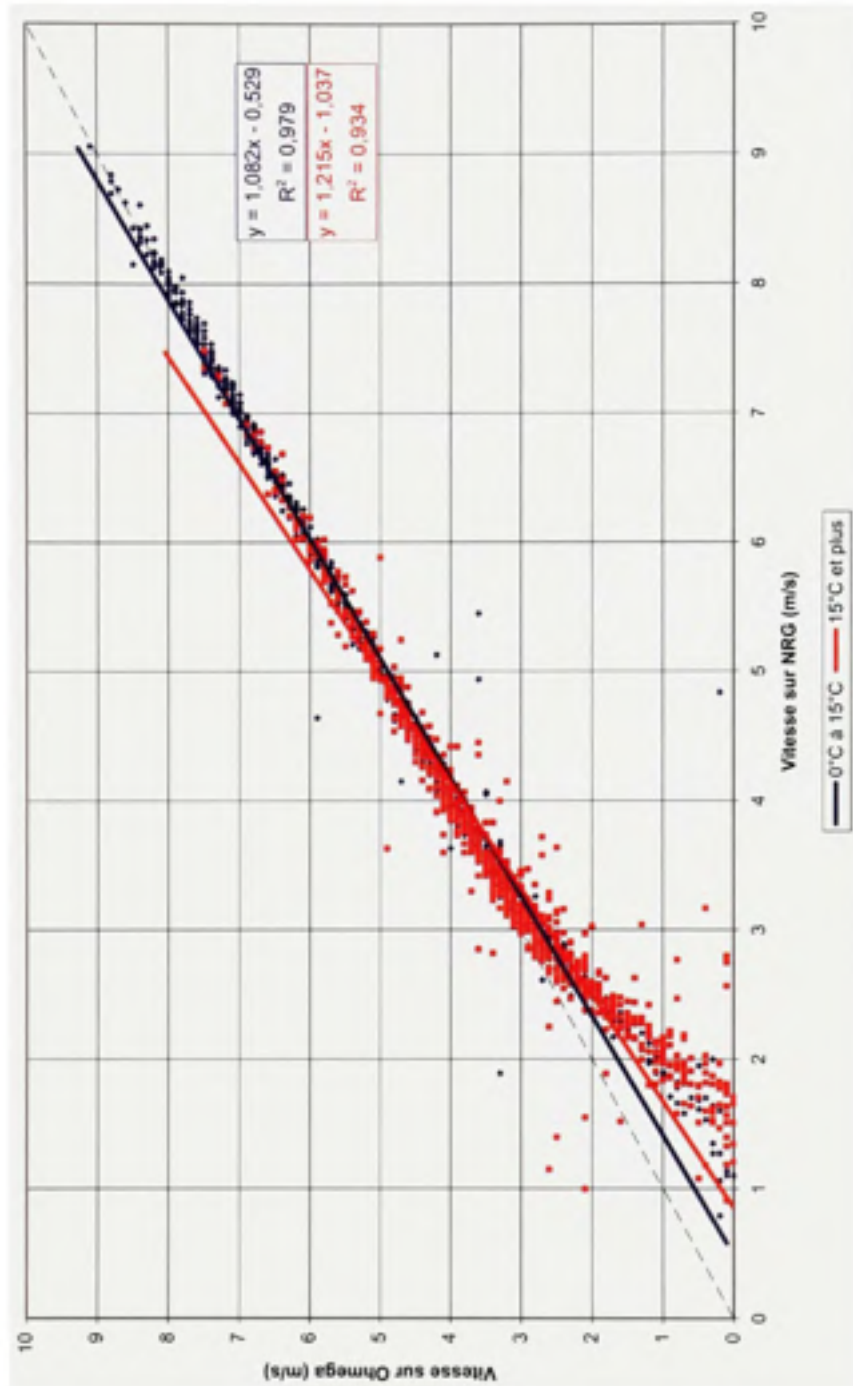


Figure I.5 Lecture de l'anémomètre NRG#40 (20m) sur les enregistreurs NRG et Ohmega en fonction de la température

Comparaison des lectures de l'anémomètre NRG#40 à 20m sur les enregistreurs NRG et SecondWind en fonction de la température

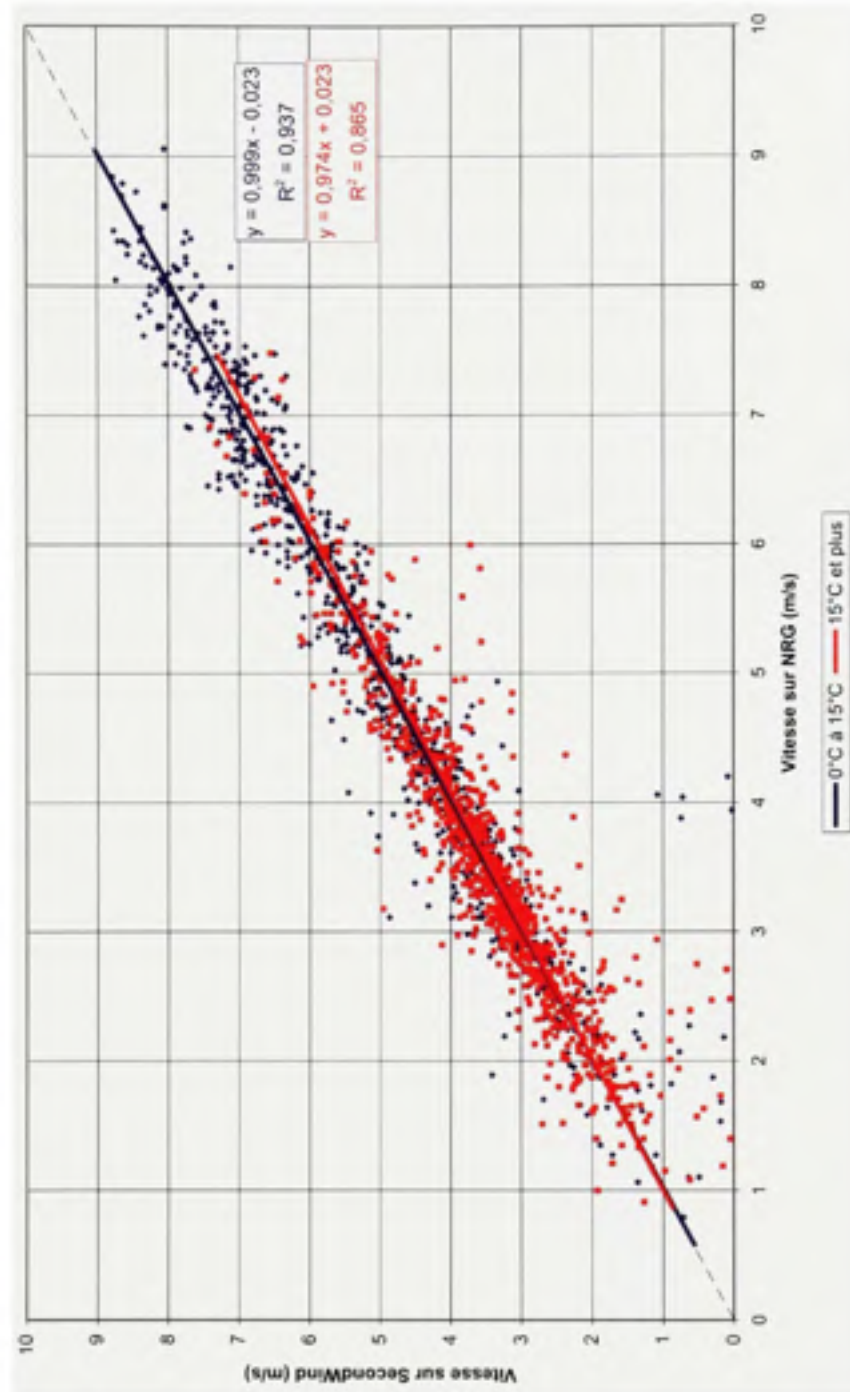


Figure I.6 Lecture de l'anémomètre NRG#40 (20m) sur les enregistreurs NRG et SecondWind en fonction de la température

Comparaison des lectures de l'anémomètre NRG#40 à 20m sur les enregistreurs Ohmega et SecondWind en fonction de la température

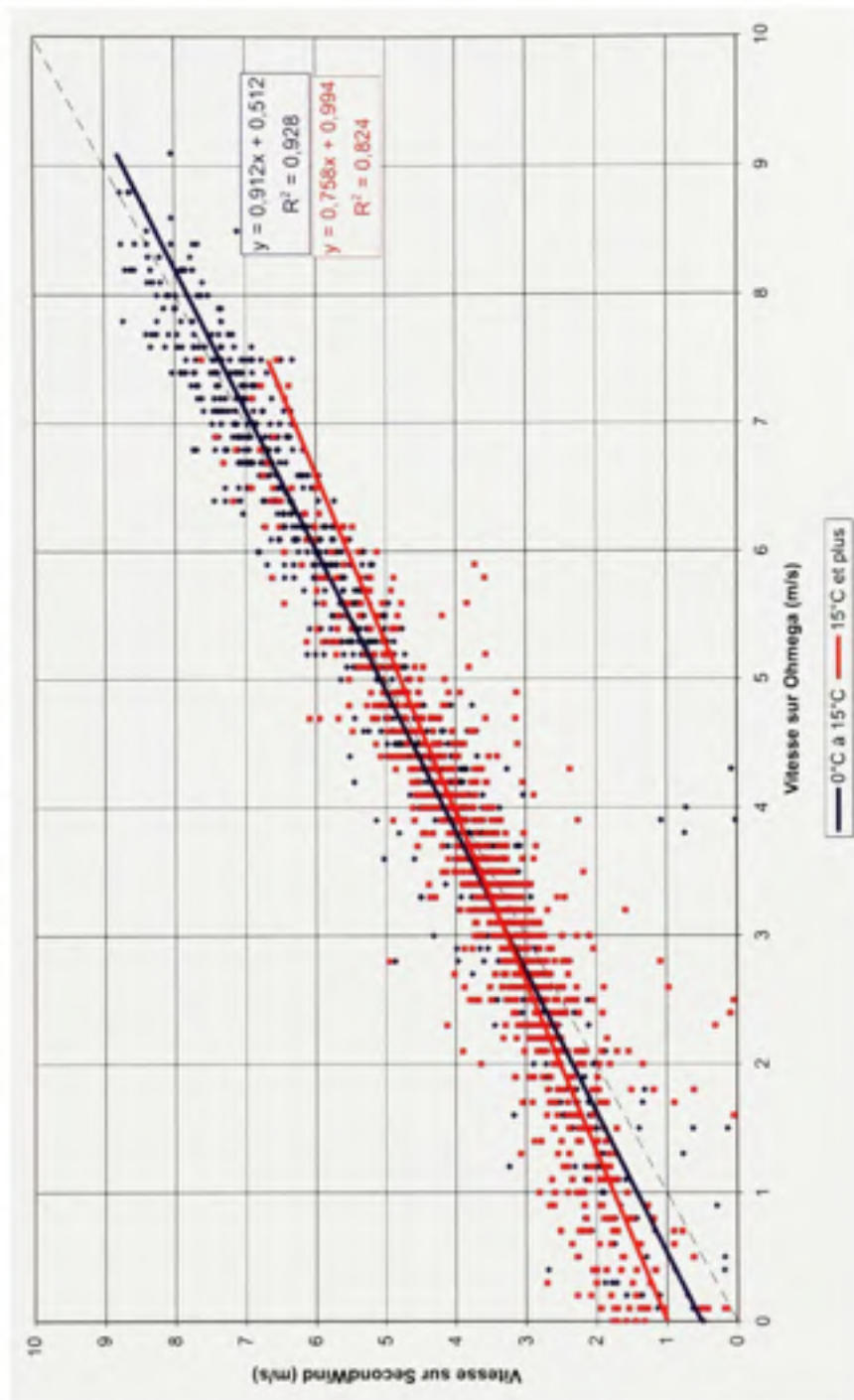
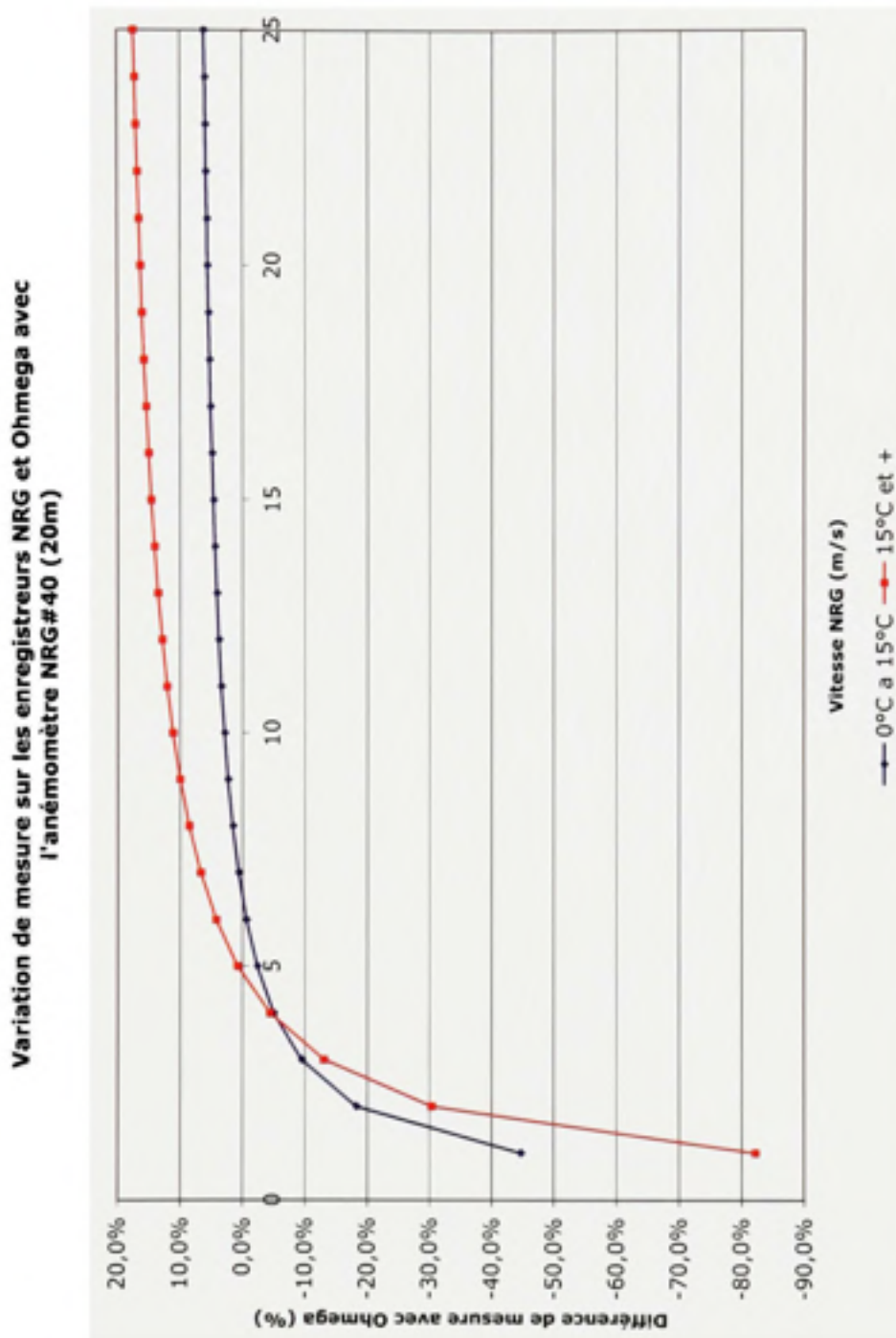
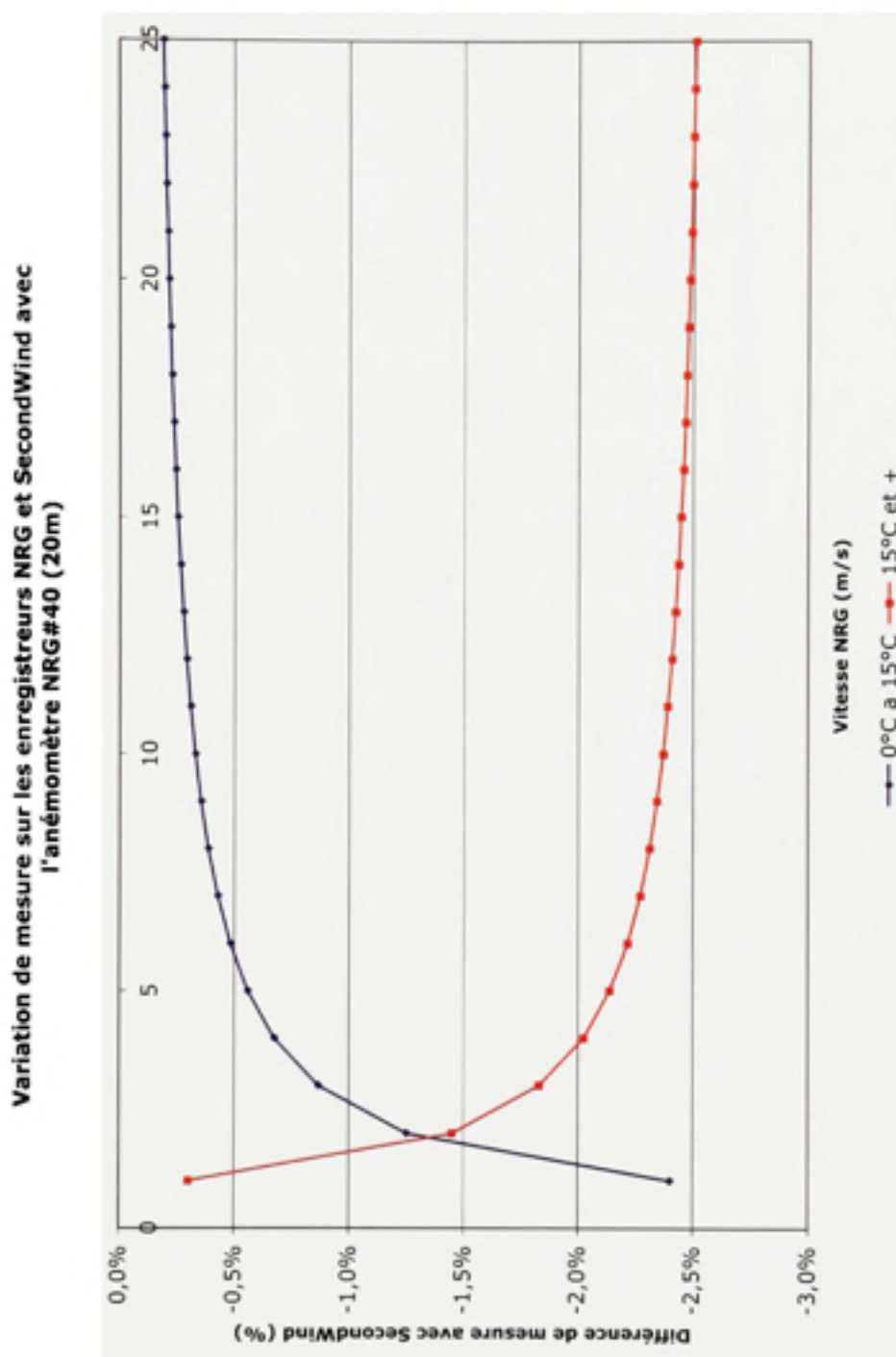


Figure I.7 Lecture de l'anémomètre NRG#40 (20m) sur les enregistreurs Ohmega et SecondWind en fonction de la température

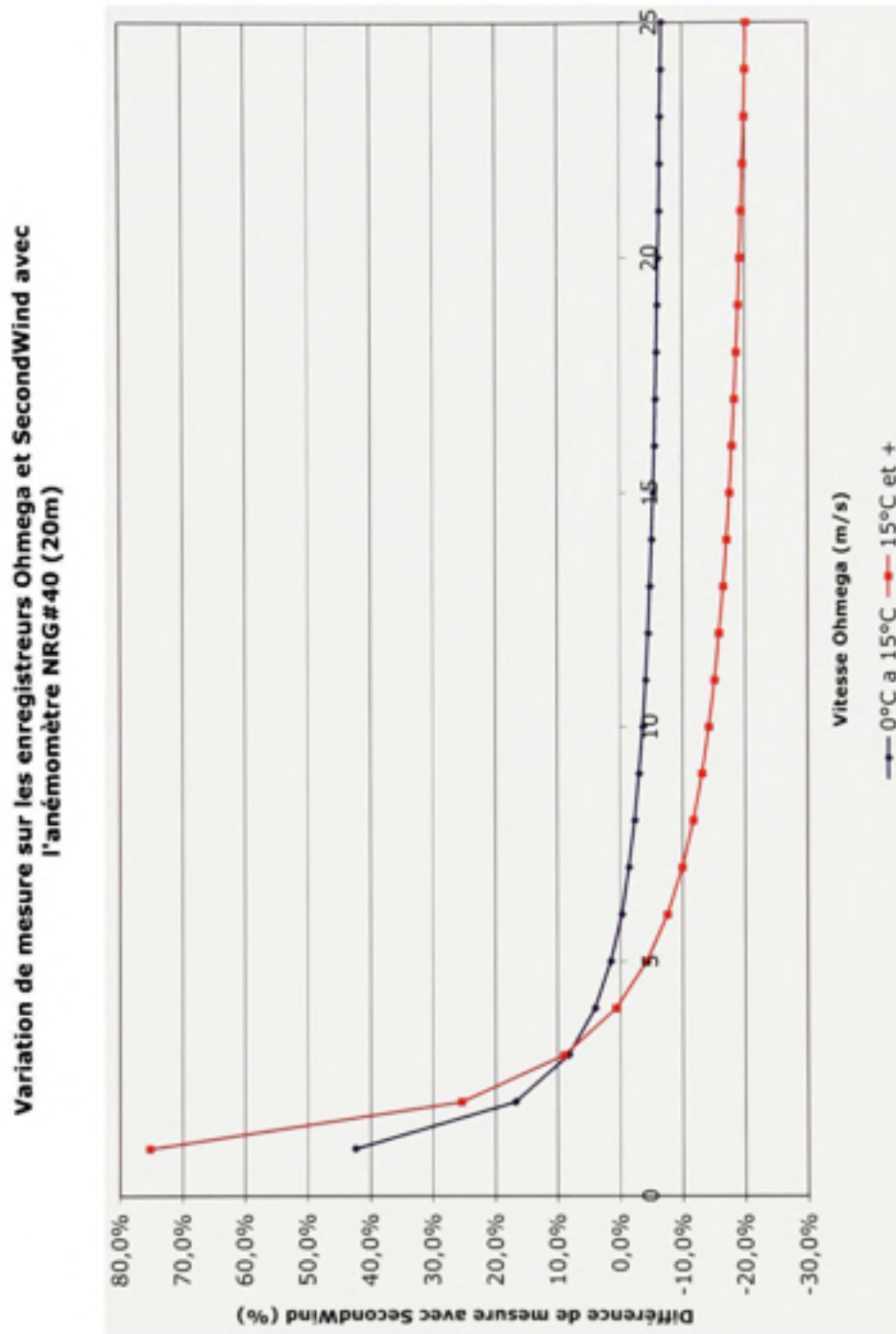




**Figure I.8** *Variation de lecture de l'anémomètre NRG#40 (20m) sur les enregistreurs NRG et Ohmega en fonction de la température*



**Figure I.9** Variation de lecture de l'anémomètre NRG#40 (20m) sur les enregistreurs NRG et SecondWind en fonction de la température



**Figure I.10** *Variation de lecture de l'anémomètre NRG#40 (20m) sur les enregistreurs Omega et SecondWind en fonction de la température*

#### **I.1.4 Mesures avec l'anémomètre NRG#40 à 18m**

Les figures 58 à 60 présentent les régressions obtenues, entre les différents enregistreurs, pour l'anémomètre NRG#40 à 18m. Alors que les figures 61 à 63 présentent les différences de mesure entre les divers appareils, si l'on considère ces régressions.

Comparaison des lectures de l'anémomètre NRG#40 à 18m sur les enregistreurs NRG et Ohmega en fonction de la température

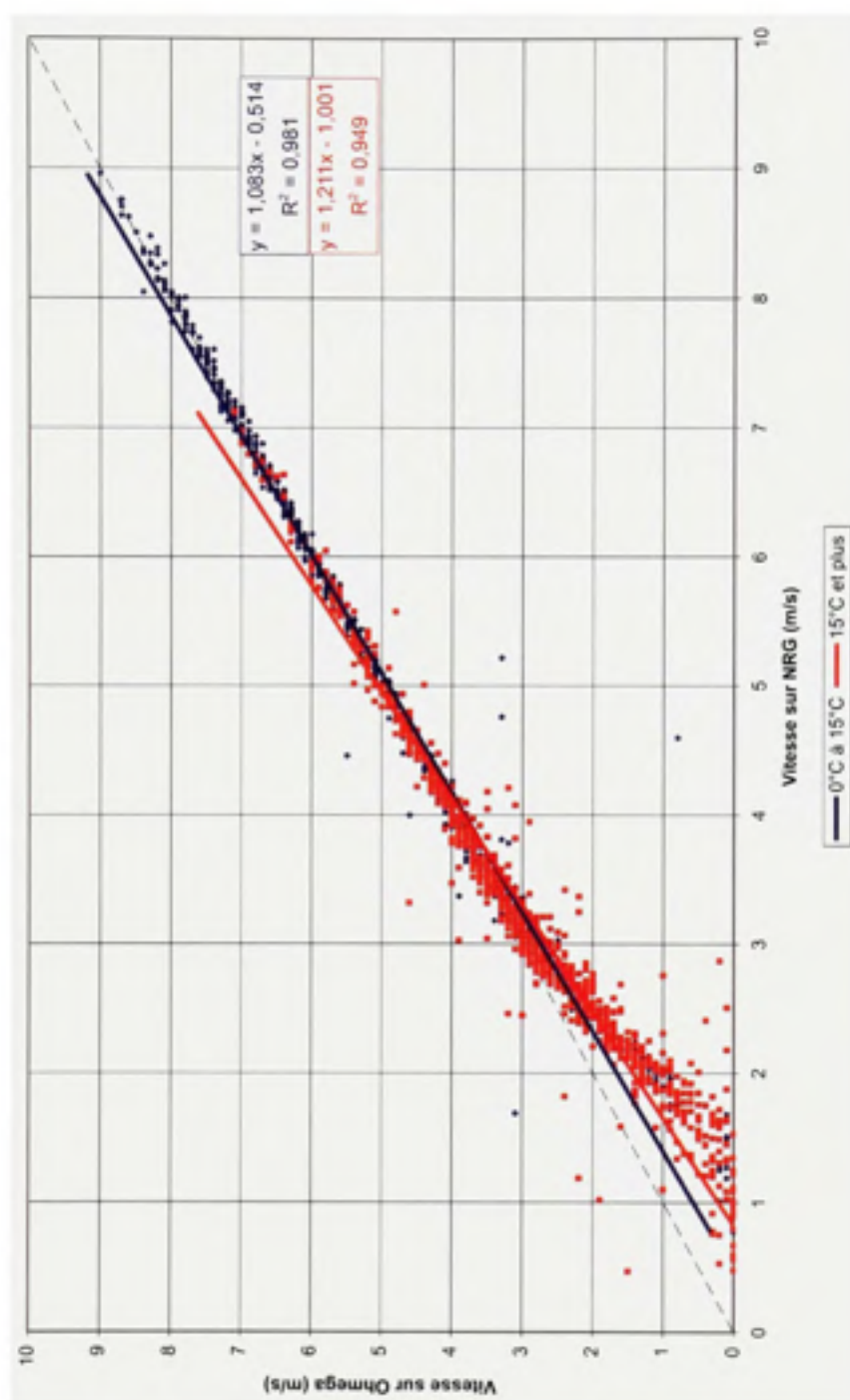


Figure I.11 Lecture de l'anémomètre NRG#40 (18m) sur les enregistreurs NRG et Ohmega en fonction de la température



Comparaison des lectures de l'anémomètre NRG#40 à 18m sur les enregistreurs NRG et SecondWind en fonction de la température

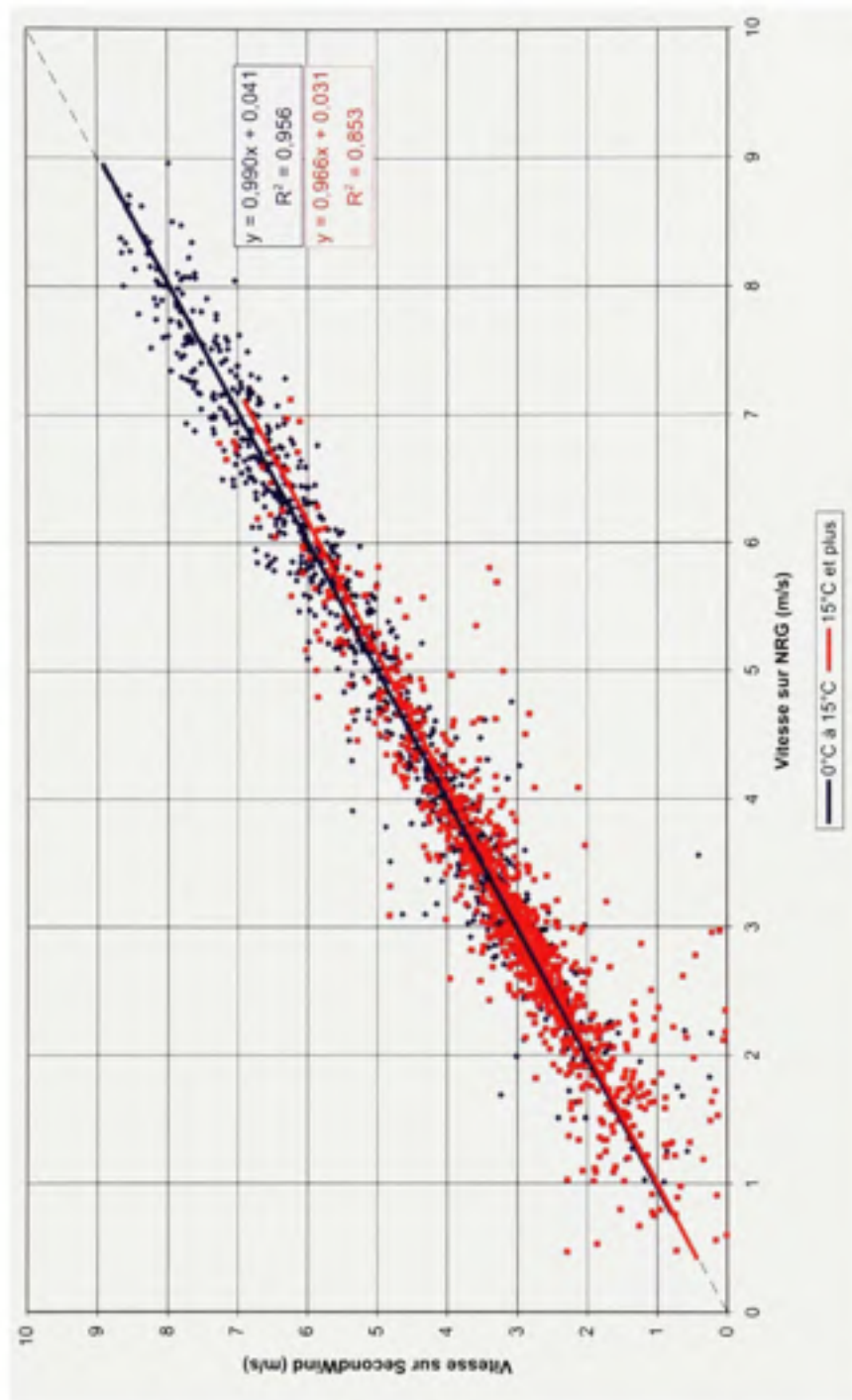


Figure I.12 Lecture de l'anémomètre NRG#40 (18m) sur les enregistreurs NRG et SecondWind en fonction de la température

Comparaison des lectures de l'anémomètre NRG#40 à 18m sur les enregistreurs Ohmega et SecondWind en fonction de la température

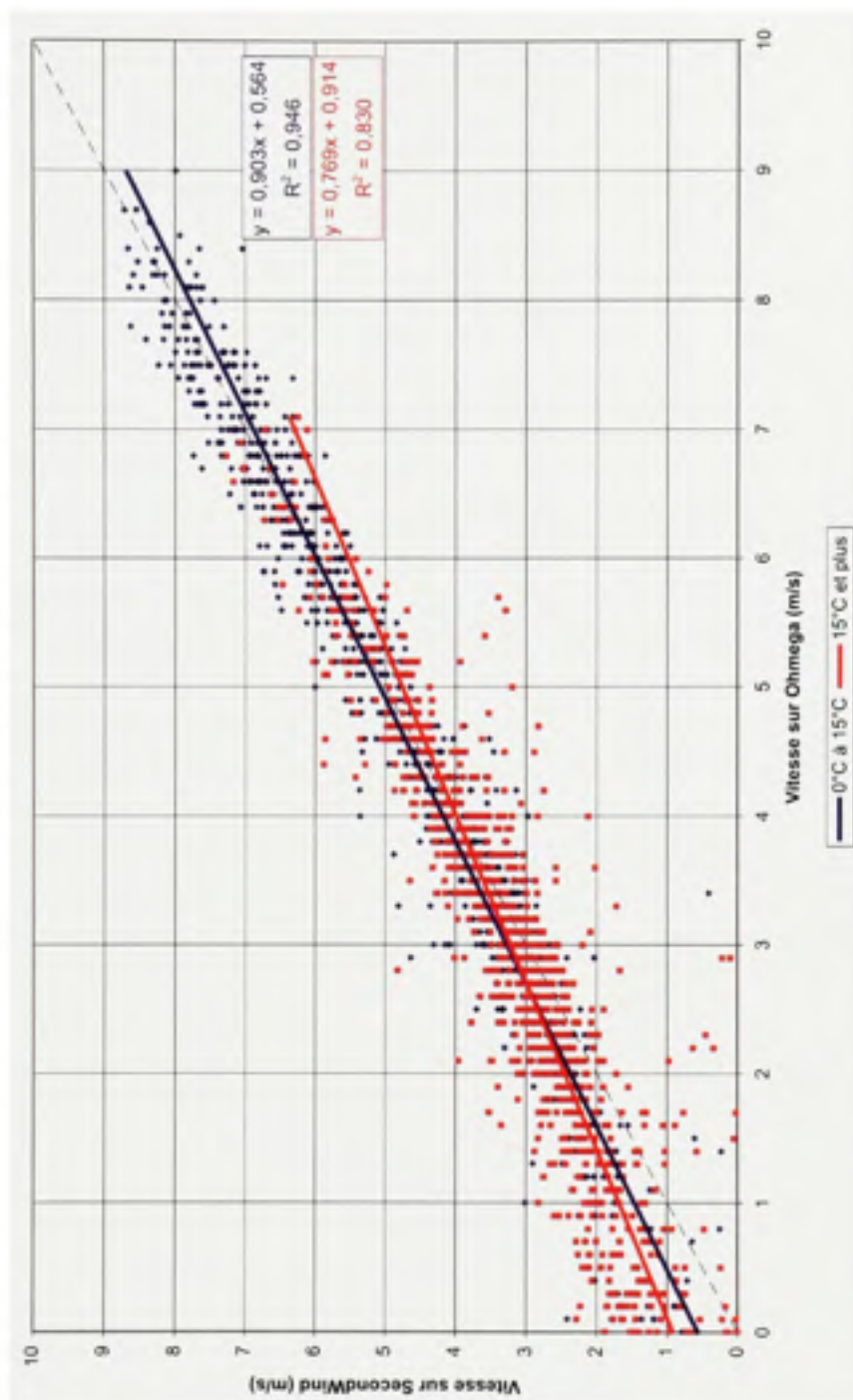
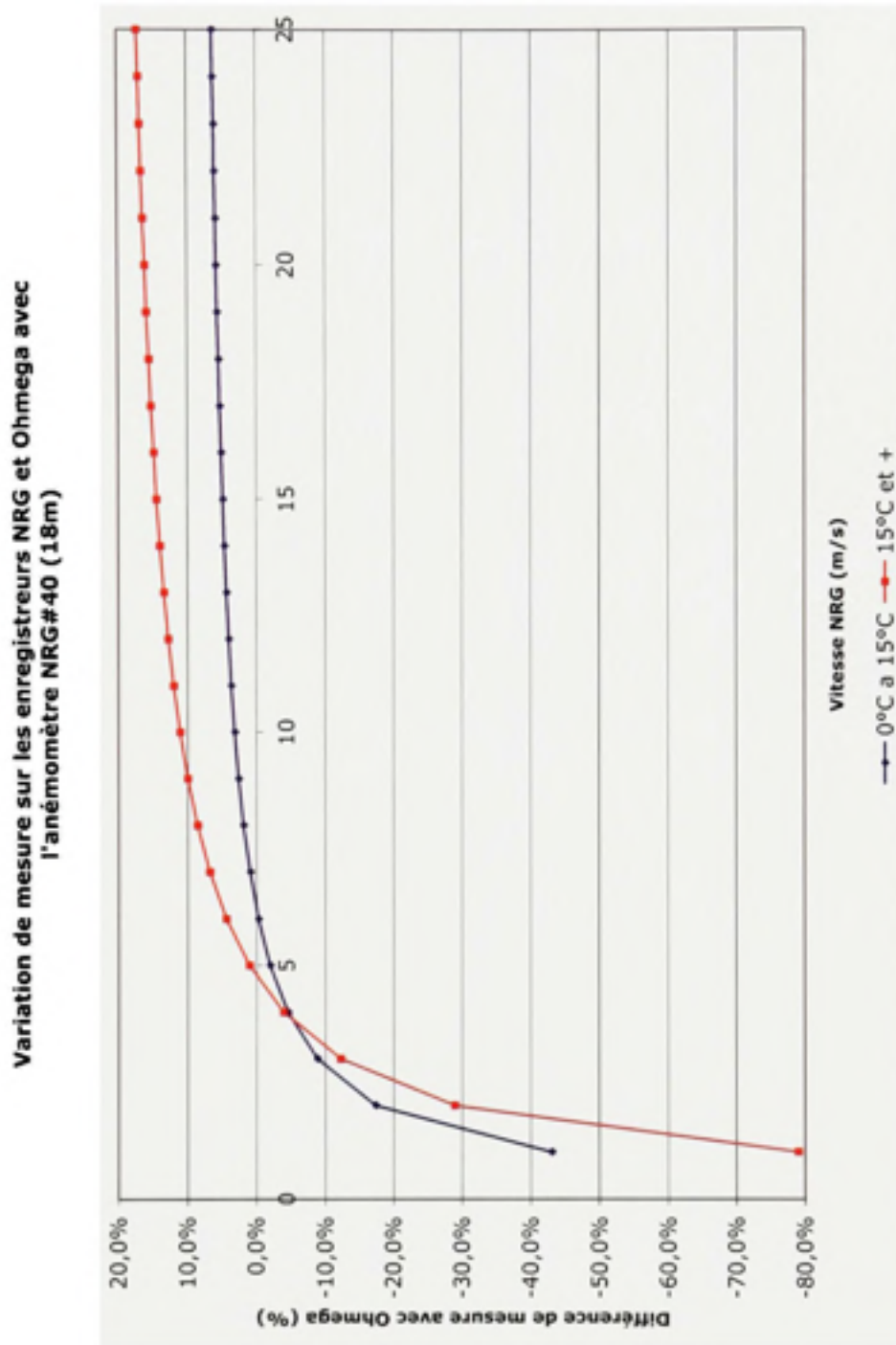


Figure I.13 Lecture de l'anémomètre NRG#40 (18m) sur les enregistreurs Ohmega et SecondWind en fonction de la température



**Figure I.14** *Variation de lecture de l'anémomètre NRG#40 (18m) sur les enregistreurs NRG et Ohmega en fonction de la température*

Variation de mesure sur les enregistreurs NRG et SecondWind avec l'anémomètre NRG#40 (18m)

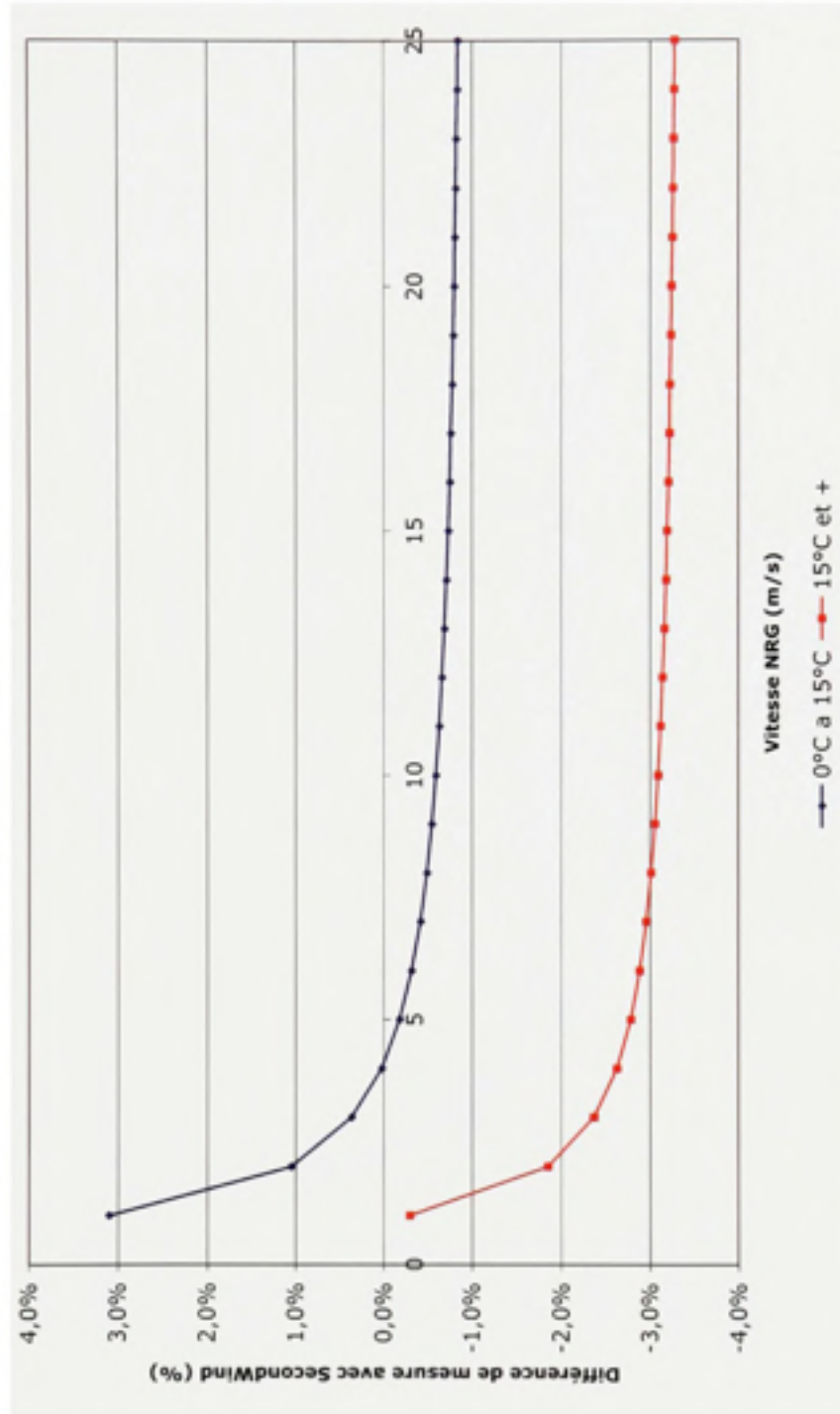


Figure I.15 Variation de lecture de l'anémomètre NRG#40 (18m) sur les enregistreurs NRG et SecondWind en fonction de la température

Variation de mesure sur les enregistreurs Omega et SecondWind avec l'anémomètre NRG#40 (18m)

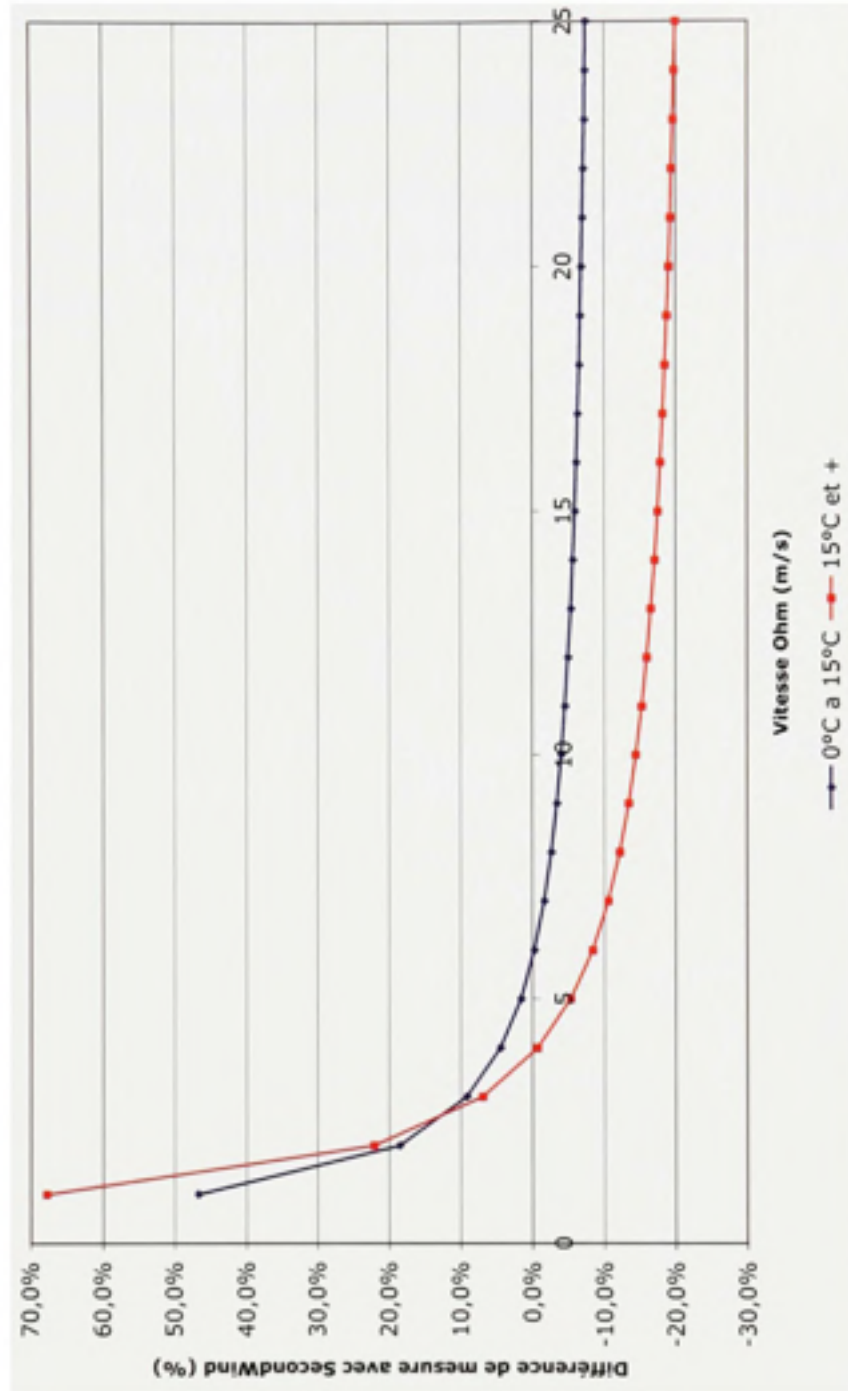


Figure I.16 Variation de lecture de l'anémomètre NRG#40 (18m) sur les enregistreurs Omega et SecondWind en fonction de la température



## **I.2 Comparaisons en fonction de la vitesse verticale**

### **I.2.1 Mesures avec les anémomètres redondants à 20m**

La figure 64 présente les régressions obtenues entre les anémomètres NRG#40 et Risø P2546a. Alors que la figure 65 présente la différence de mesure entre les deux instruments, si l'on considère ces régressions.

Comparaison entre les anémomètres NRG#40 et Riso P2546A à 20m en fonction de la composante verticale de la vitesse (Enregistreur NRG)

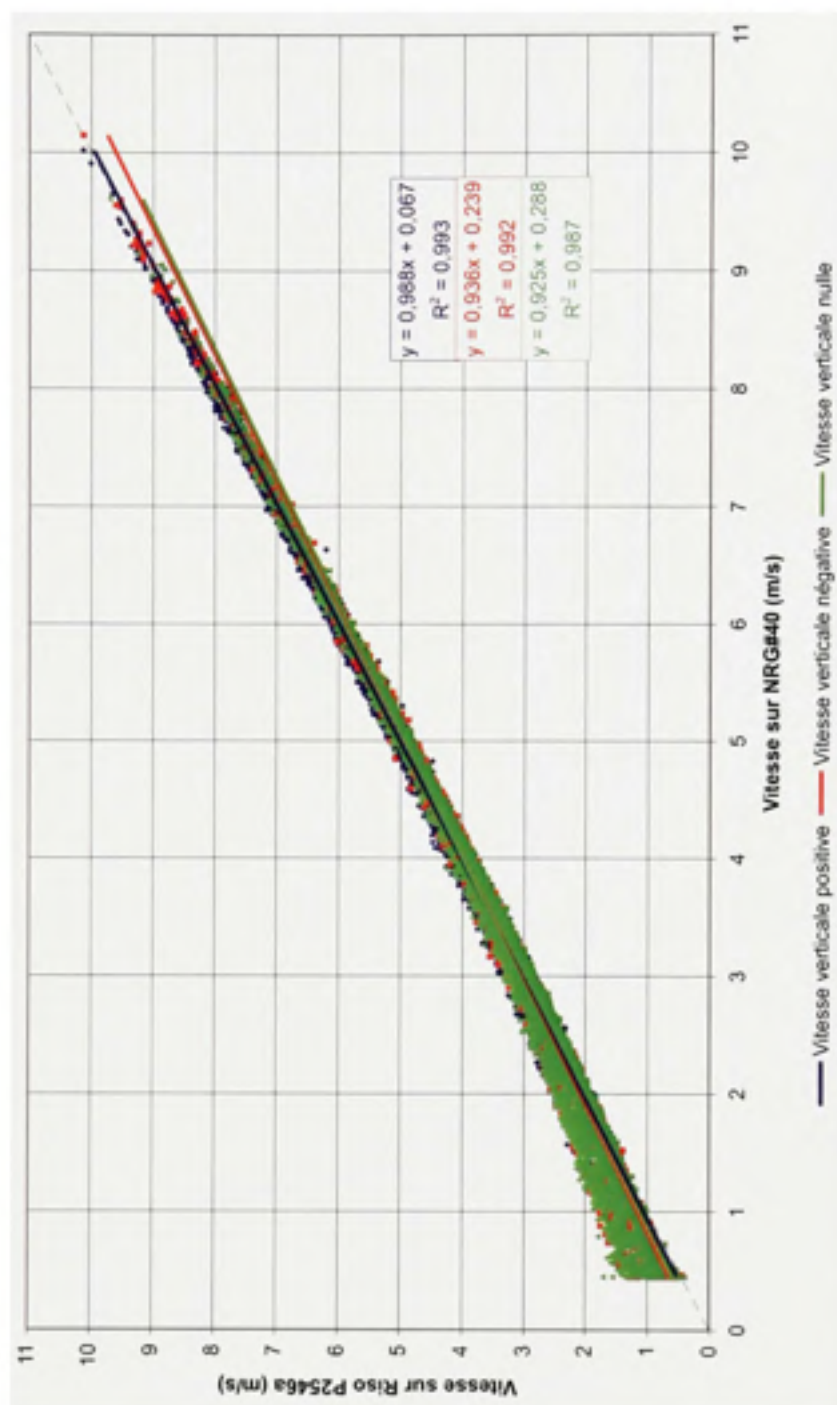
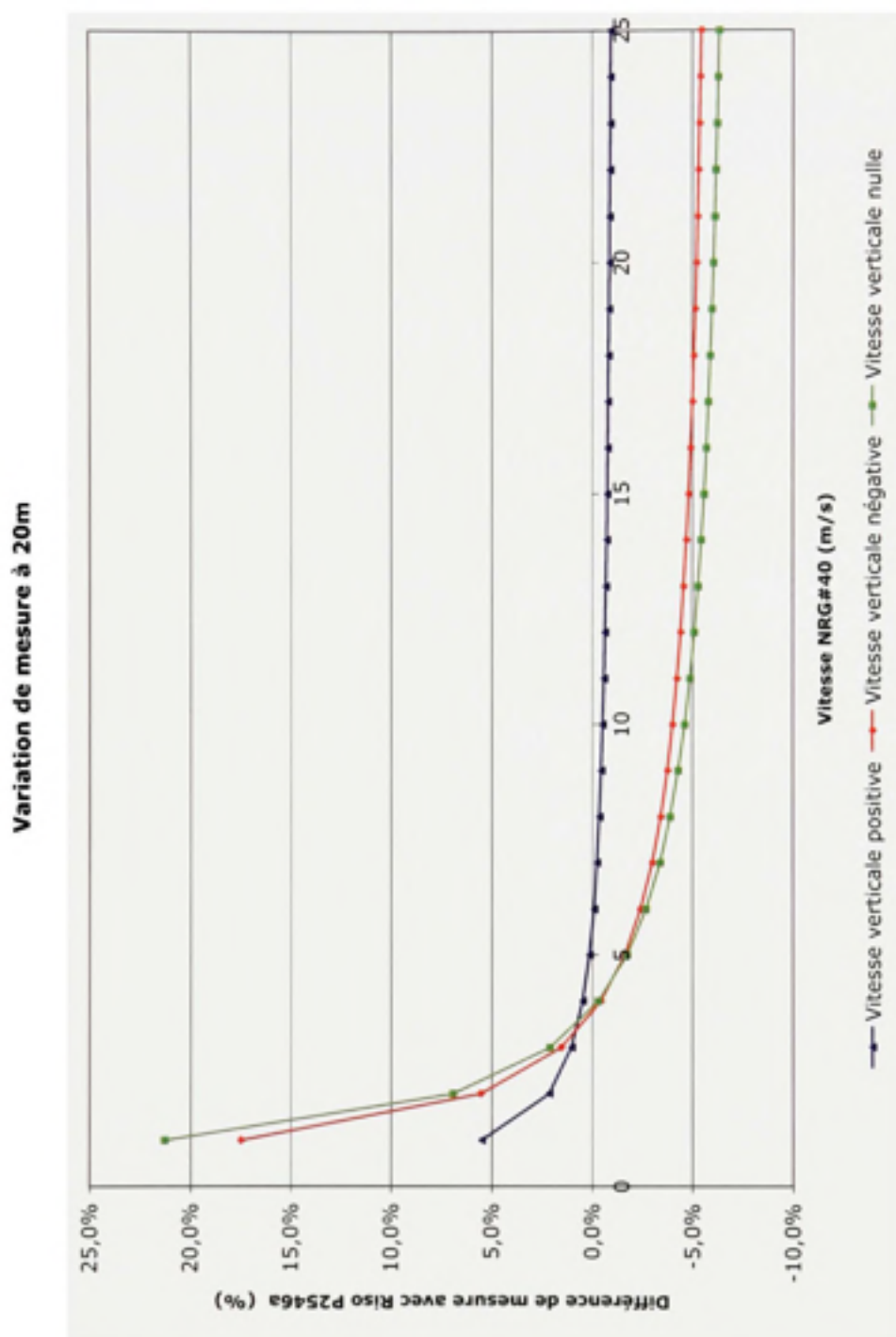


Figure I.17 Lecture des anémomètres NRG#40 (20m) et Riso P2546a en fonction de la vitesse verticale



**Figure I.18** *Variation de lecture des anémomètres NRG#40 (20m) et Risø P2546a en fonction de la vitesse verticale*

### **I.2.2 Mesures avec les anémomètres redondants à 18m**

La figure 66 présente les régressions obtenues entre les anémomètres NRG#40 et RMY-5103. Alors que la figure 67 présente la différence de mesure entre les deux instruments, si l'on considère ces régressions.

Comparaison entre les anémomètres NRG#40 et RMY-5103 à 18m en fonction de la composante verticale de la vitesse (Enregistreur NRG)

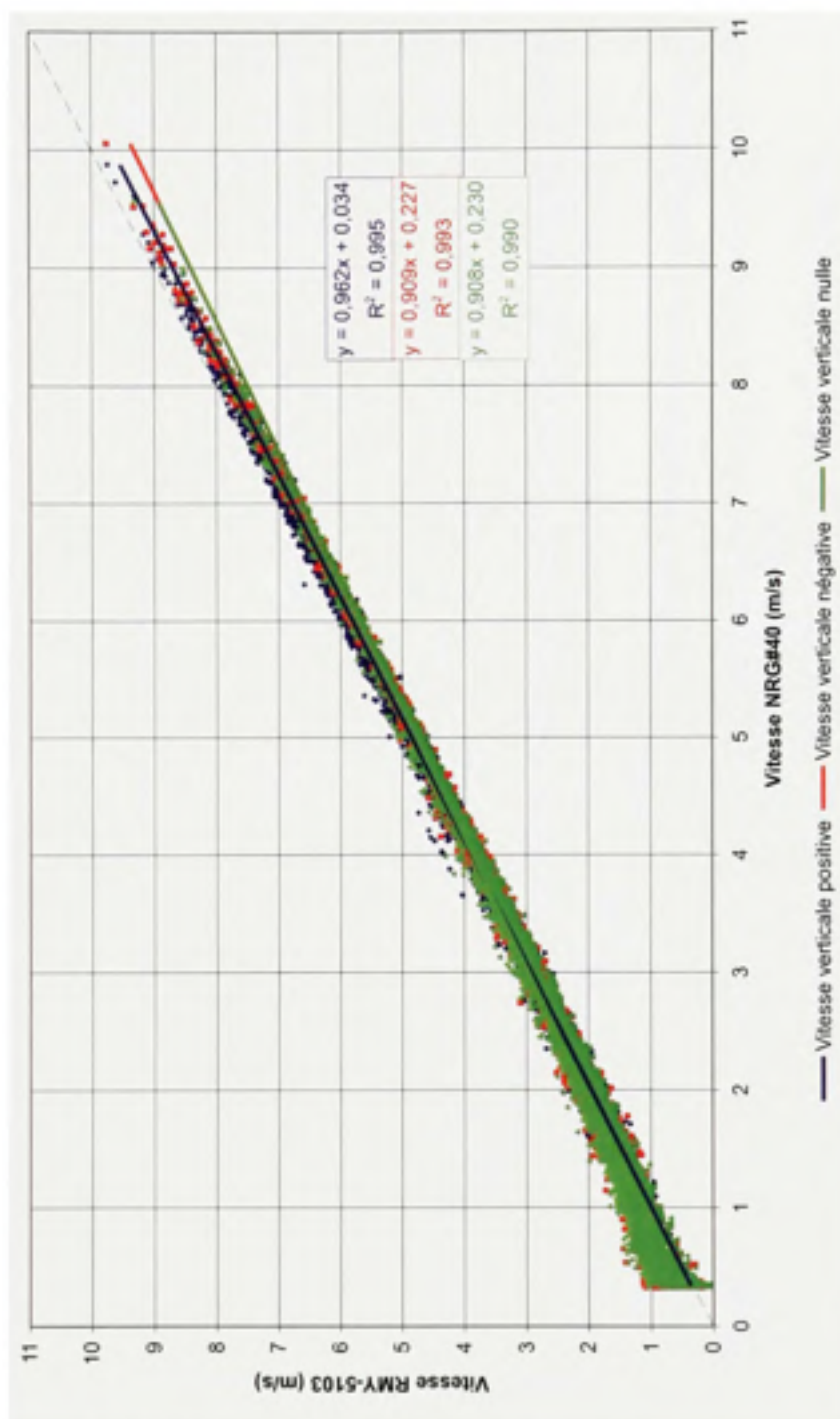
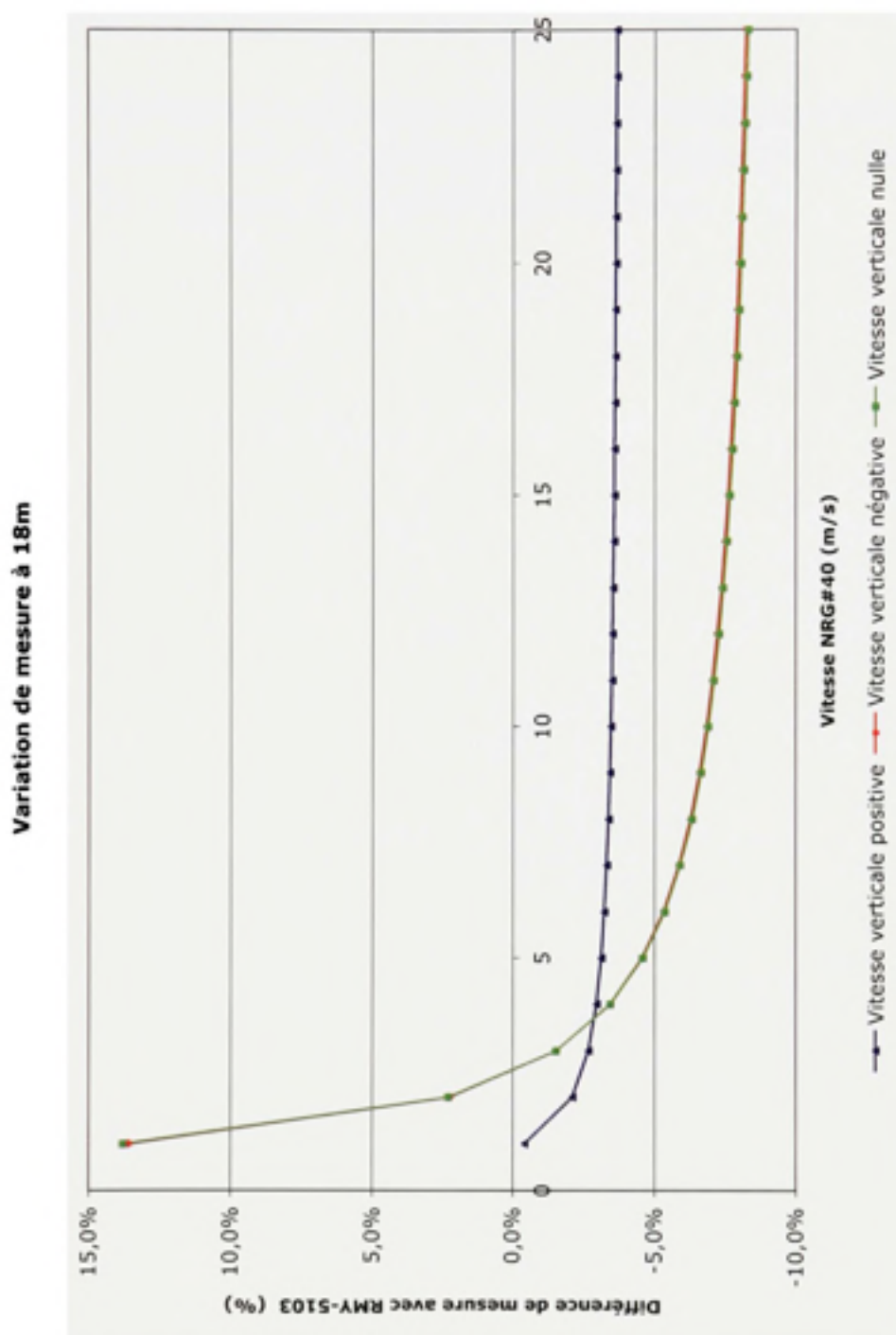


Figure I.19 Lecture des anémomètres NRG#40 (18m) et RMY-5103 en fonction de la vitesse verticale





**Figure I.20** *Variation de lecture des anémomètres NRG#40 (18m) et RMY-5103 en fonction de la vitesse verticale*

### **I.2.3 Mesures avec l'anémomètre NRG#40 à 20m**

Les figures 68 à 70 présentent les régressions obtenues, entre les différents enregistreurs, pour l'anémomètre NRG#40 à 20m. Alors que les figures 71 à 73 présentent les différences de mesure entre les divers appareils, si l'on considère ces régressions.

Comparaison entre les lectures de l'anémomètre NRG#40(20m) sur les enregistreurs NRG et Omega en fonction de la composante verticale de la vitesse

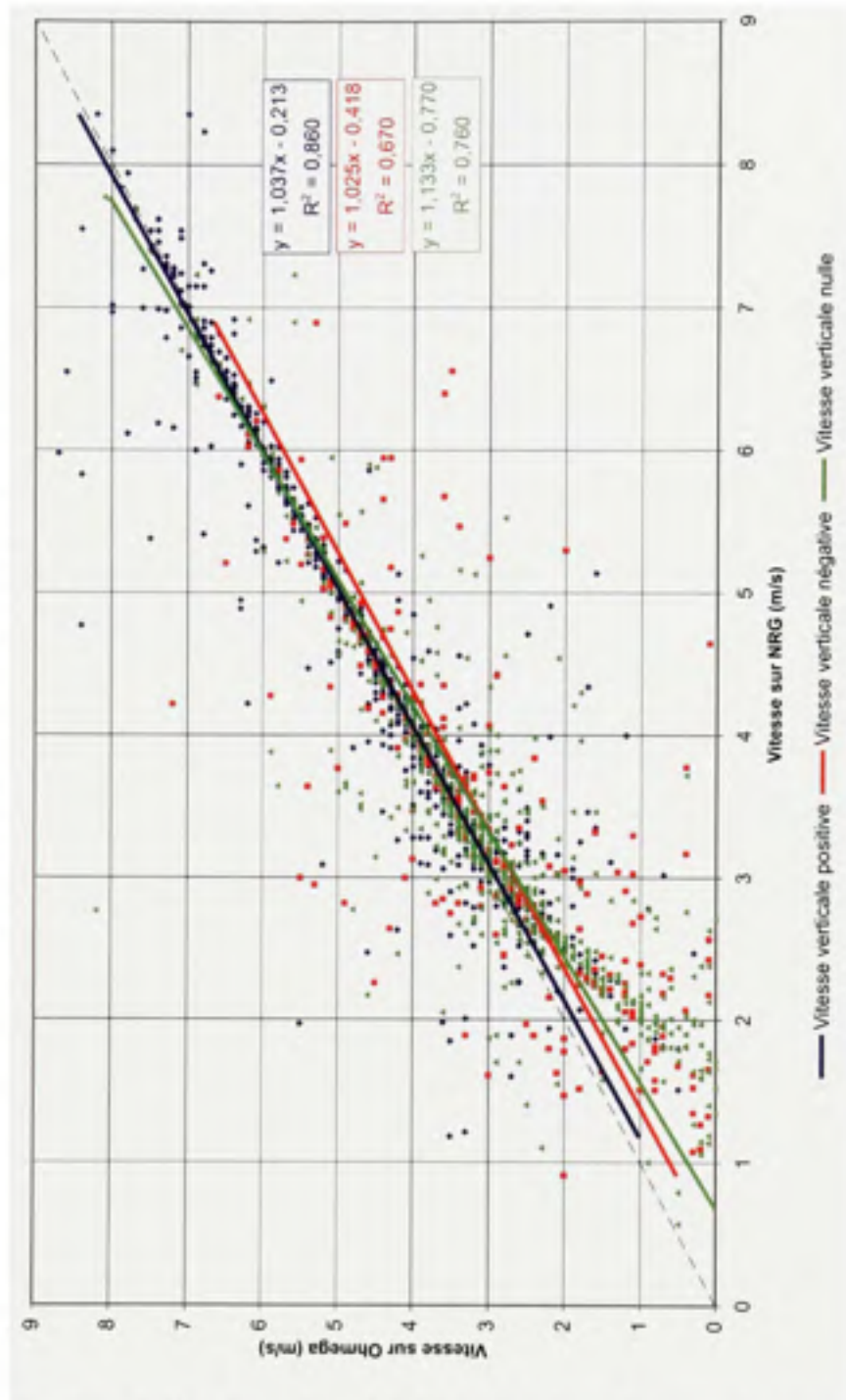


Figure I.21 Lecture de l'anémomètre NRG#40 (20m) sur les enregistreurs NRG et Omega en fonction de la vitesse verticale

Comparaison entre les lectures de l'anémomètre NRG#40(20m) sur les enregistreurs NRG et SecondWind en fonction de la composante verticale de la vitesse

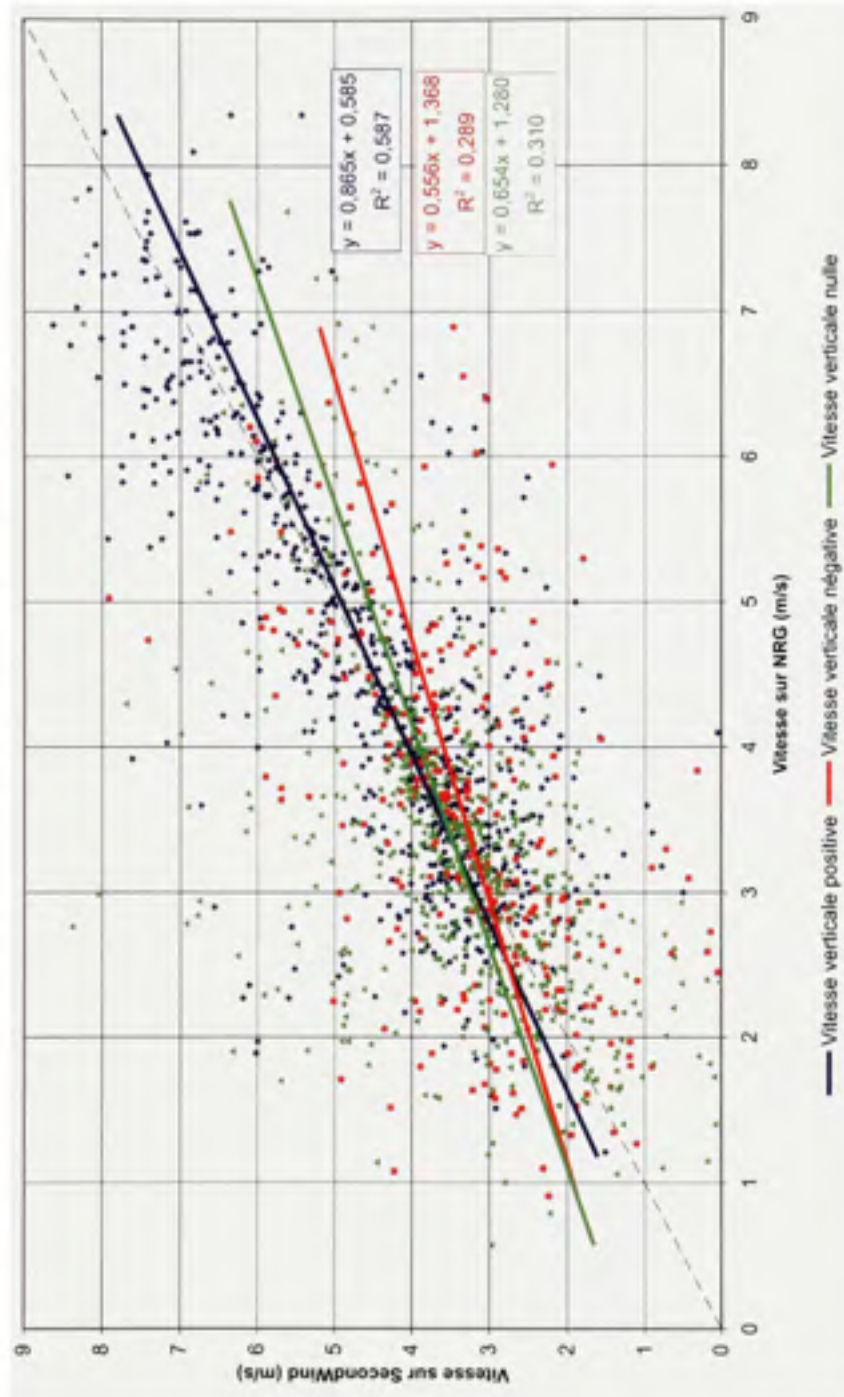


Figure I.22 Lecture de l'anémomètre NRG#40 (20m) sur les enregistreurs NRG et SecondWind en fonction de la vitesse verticale

Comparaison entre les lecture de l'anémomètre NRG#40(20m) sur les enregistreurs Ohmega et SecondWind en fonction de la composante verticale de la vitesse

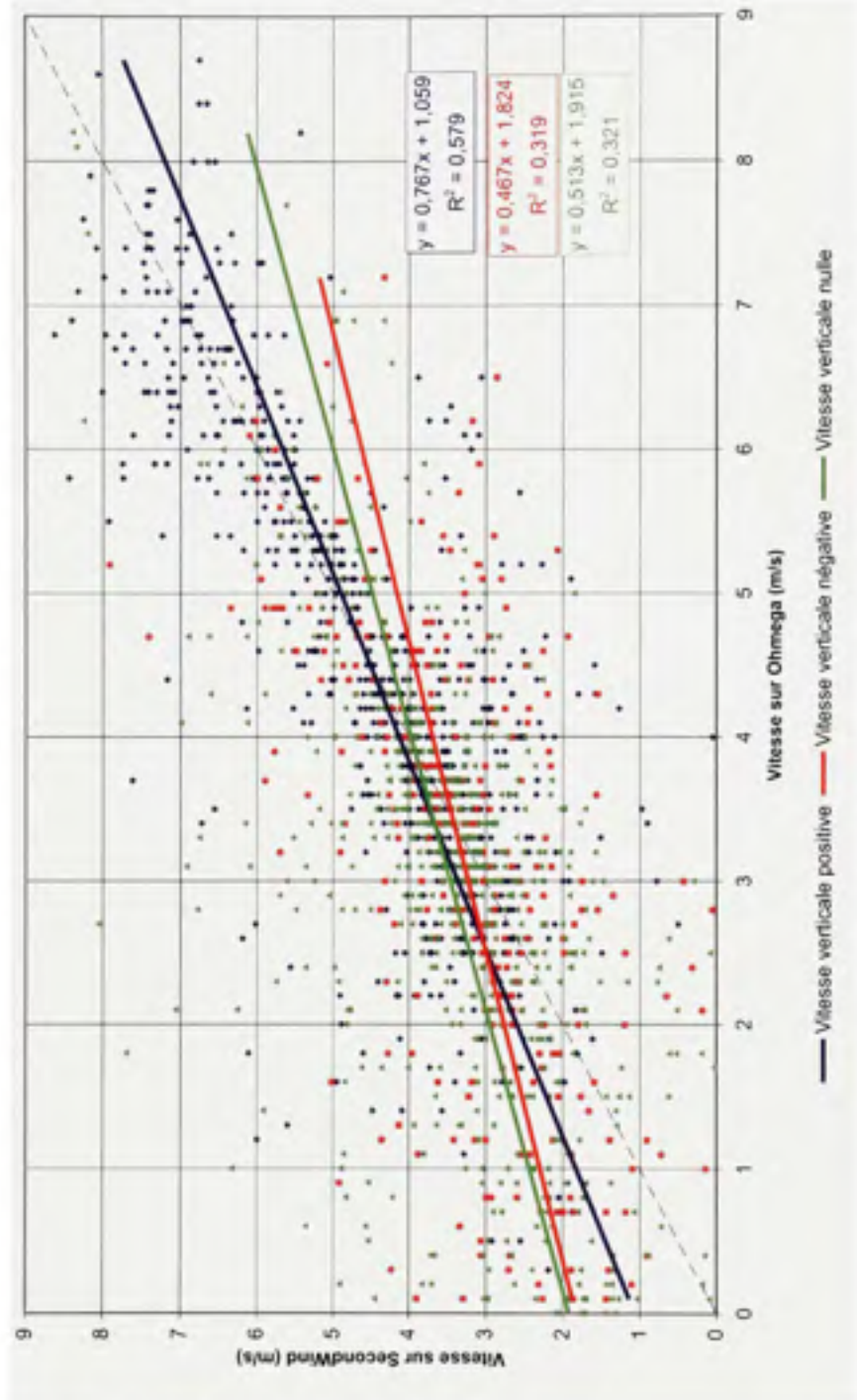


Figure I.23 Lecture de l'anémomètre NRG#40 (20m) sur les enregistreurs Ohmega et SecondWind en fonction de la vitesse verticale



Variation de mesure sur les enregistreurs NRG et Ohmega avec l'anémomètre NRG#40 (20m)

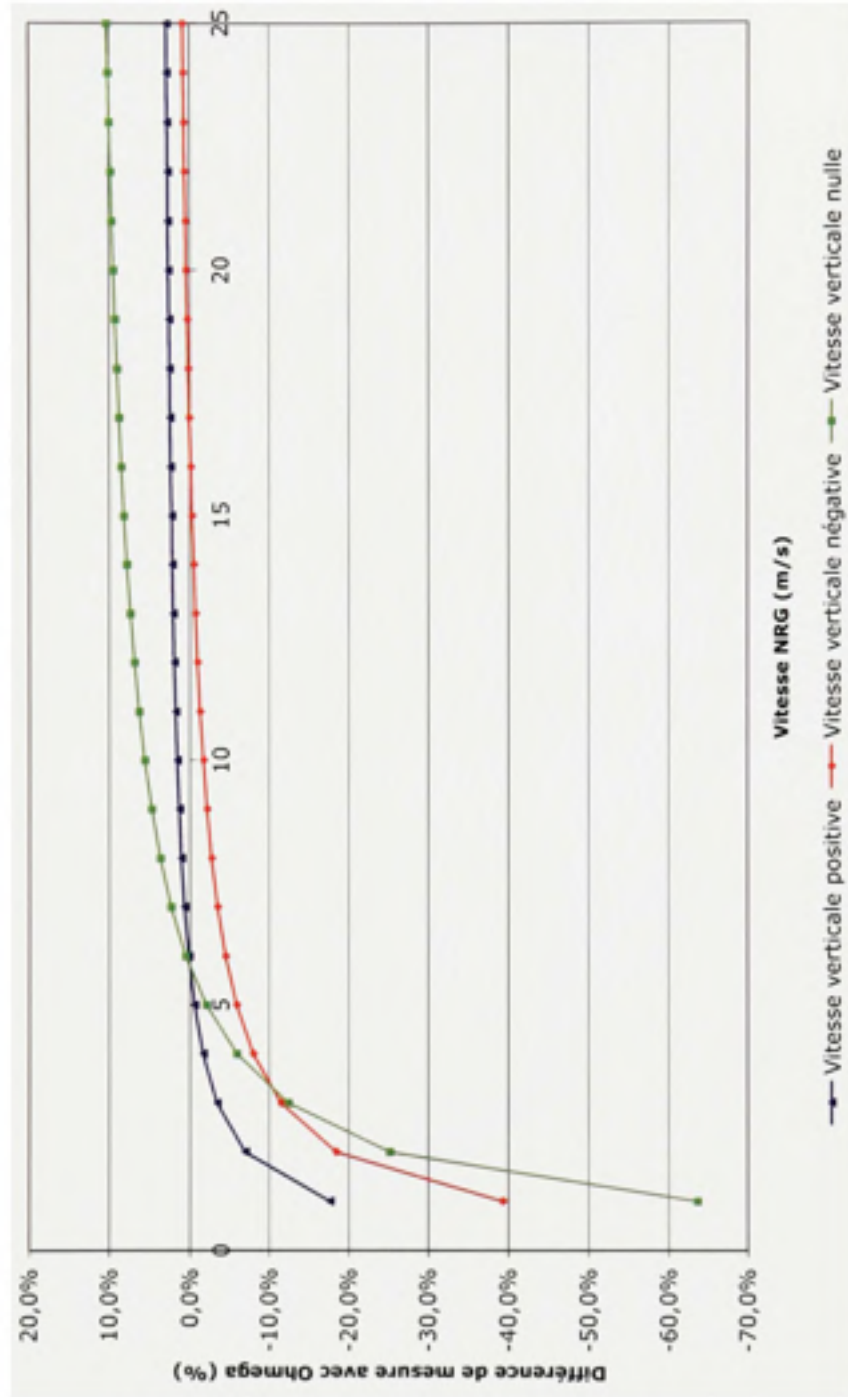


Figure I.24 Variation de lecture de l'anémomètre NRG#40 (20m) sur les enregistreurs NRG et Ohmega en fonction de la vitesse verticale



Variation de mesure sur les enregistreurs NRG et SecondWind avec l'anémomètre NRG#40 (20m)

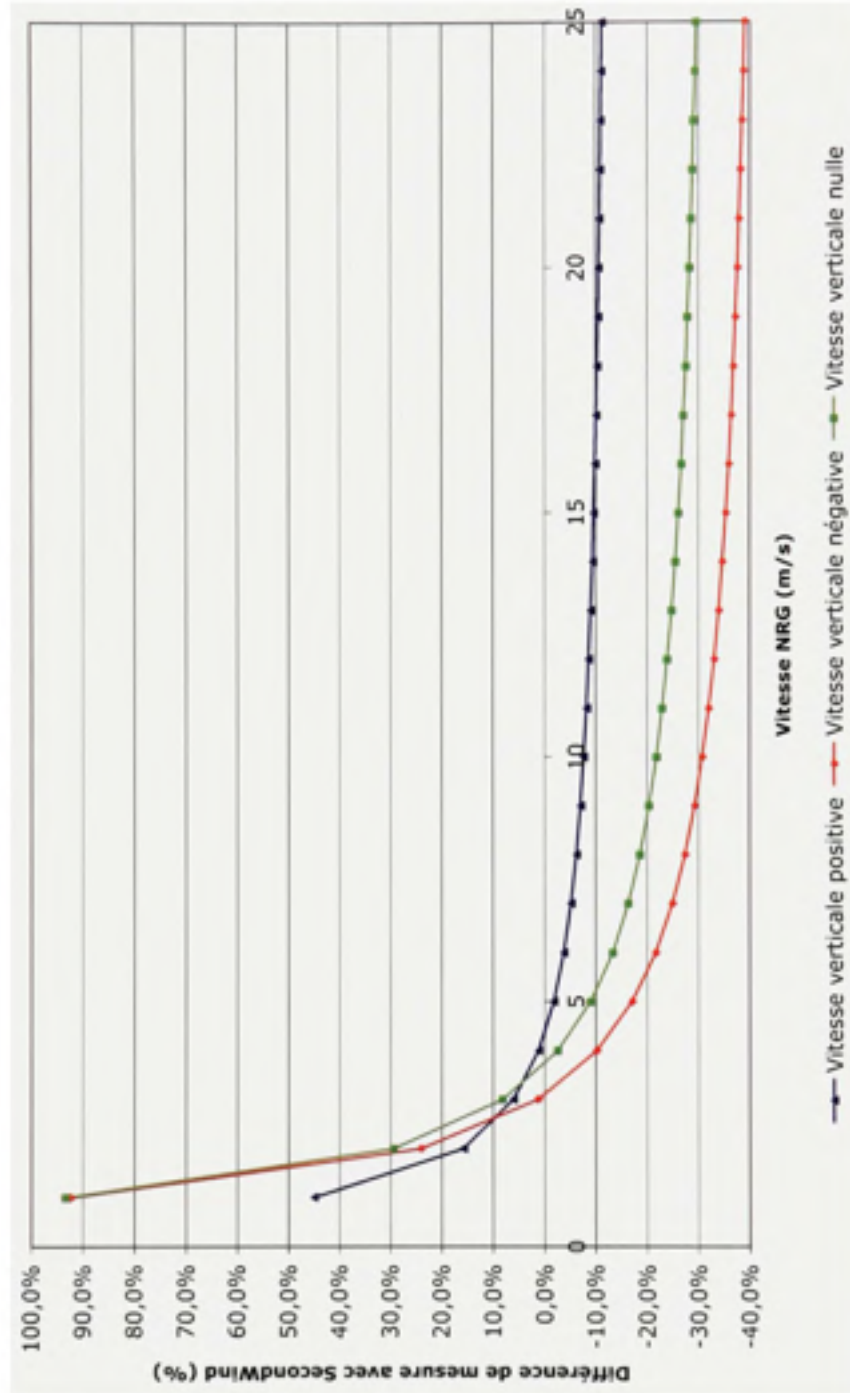


Figure I.25 Variation de lecture de l'anémomètre NRG#40 (20m) sur les enregistreurs NRG et SecondWind en fonction de la vitesse verticale

Variation de mesure sur les enregistreurs Omega et SecondWind avec l'anémomètre NRG#40 (20m)

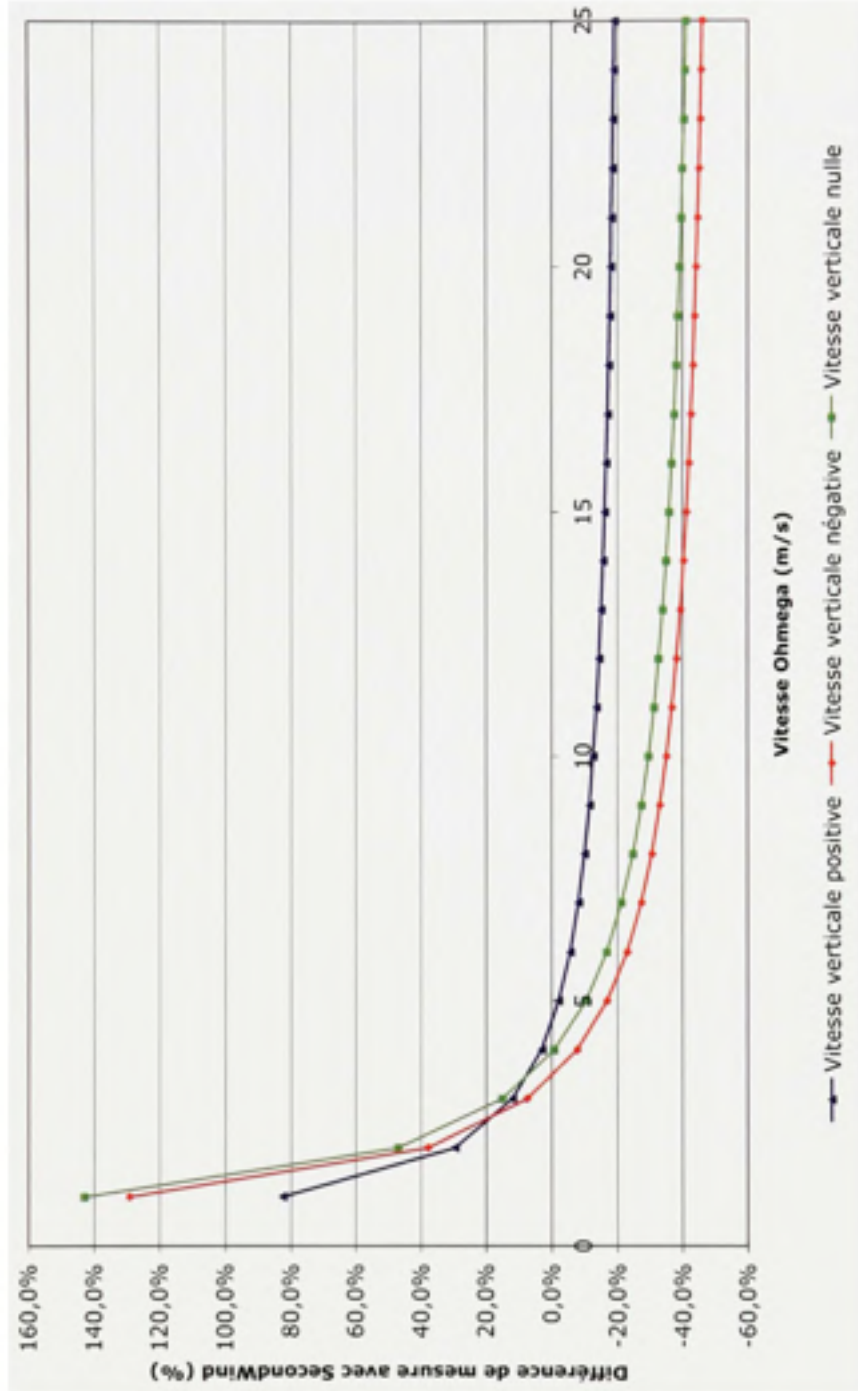


Figure I.26 Variation de lecture de l'anémomètre NRG#40 (20m) sur les enregistreurs Omega et SecondWind en fonction de la vitesse verticale

#### **I.2.4 Mesures avec l'anémomètre NRG#40 à 18m**

Les figures 74 à 76 présentent les régressions obtenues, entre les différents enregistreurs, pour l'anémomètre NRG#40 à 18m. Alors que les figures 77 à 79 présentent les différences de mesure entre les divers appareils, si l'on considère ces régressions.

Comparaison entre les lectures de l'anémomètre NRG#40(18m) sur les enregistreurs NRG et Omega en fonction de la vitesse

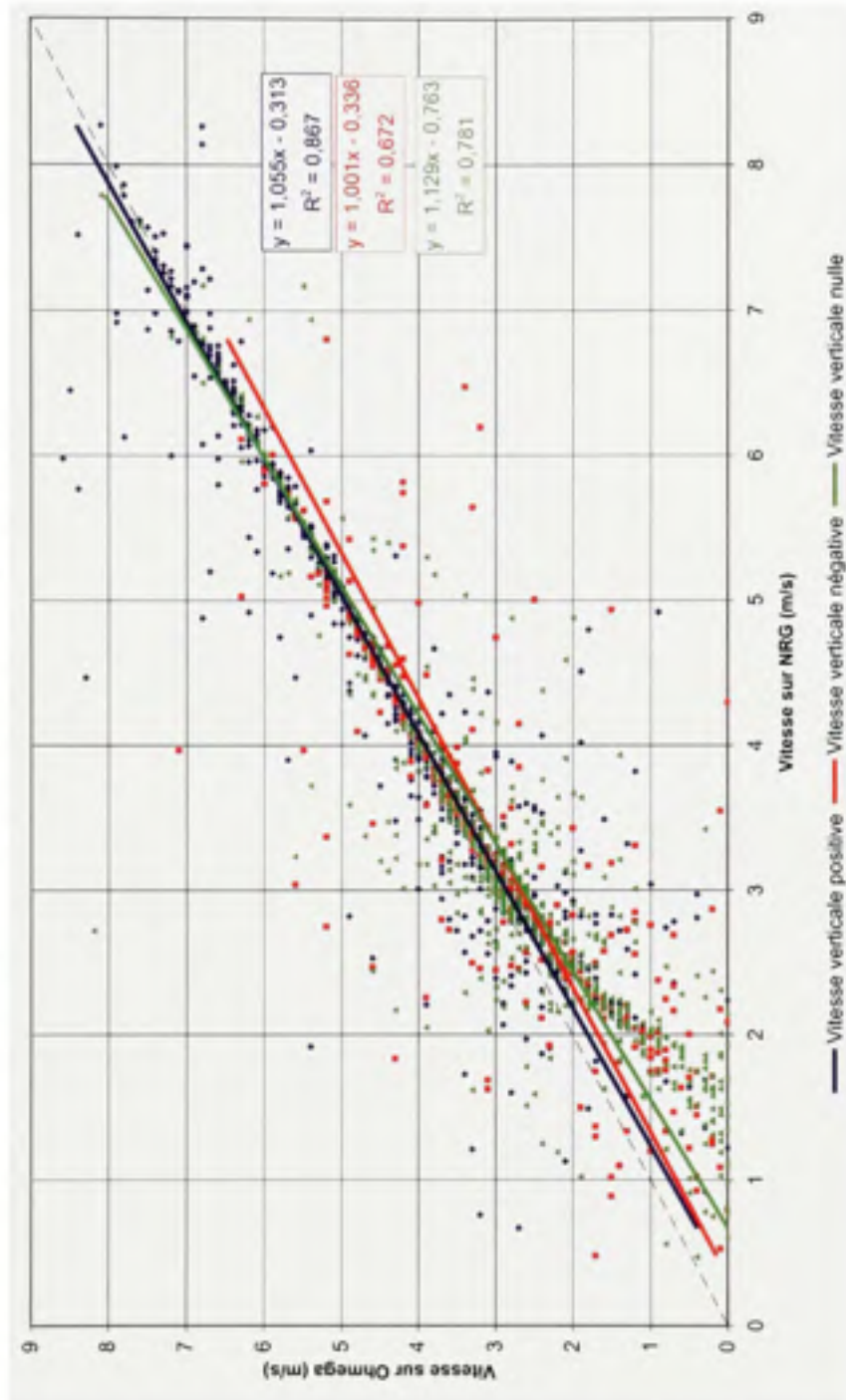


Figure I.27 Lecture de l'anémomètre NRG#40 (18m) sur les enregistreurs NRG et Omega en fonction de la vitesse verticale

Comparison entre les lectures de l'anémomètre NRG#40(18m) sur les enregistreurs NRG et SecondWind en fonction de la composante verticale de la vitesse

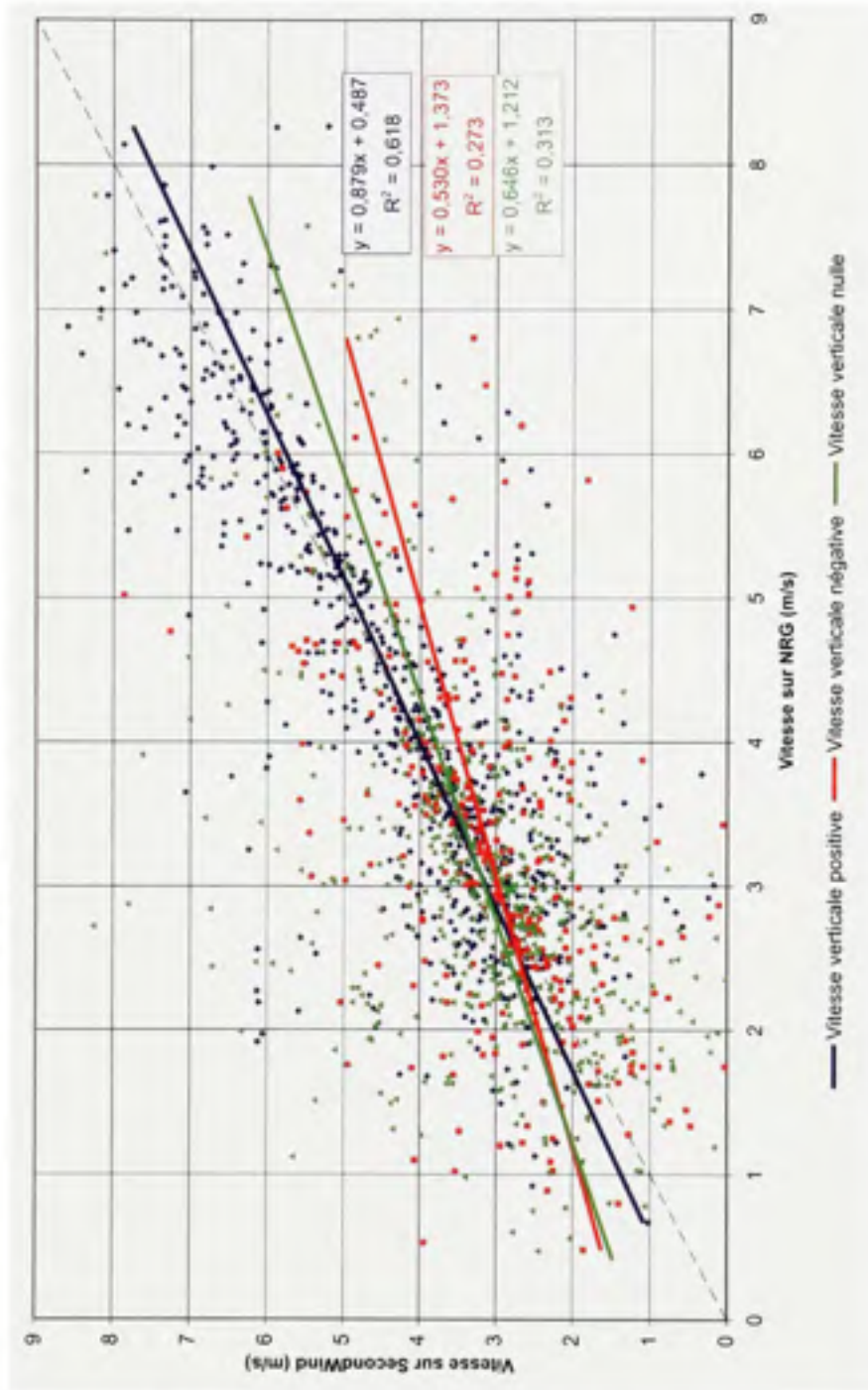


Figure I.28 Lecture de l'anémomètre NRG#40 (18m) sur les enregistreurs NRG et SecondWind en fonction de la vitesse verticale



Comparaison entre les lectures de l'anémomètre NRG#40(18m) sur les enregistreurs Ohmega et SecondWind en fonction de la composante verticale de la vitesse

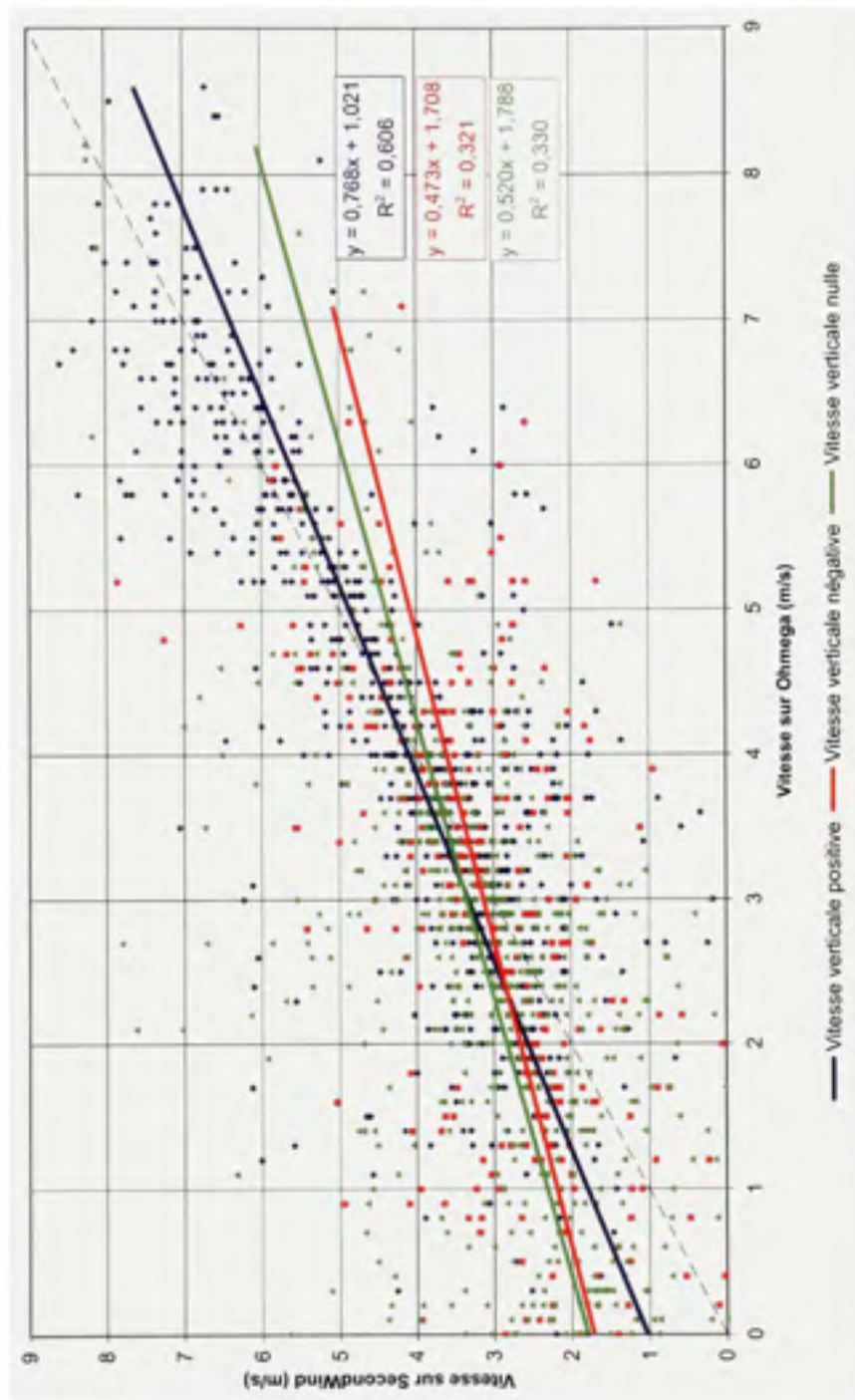


Figure I.29 Lecture de l'anémomètre NRG#40 (18m) sur les enregistreurs Ohmega et SecondWind en fonction de la vitesse verticale

Variation de mesure sur les enregistreurs NRG et Ohmega avec l'anémomètre NRG#40 (18m)

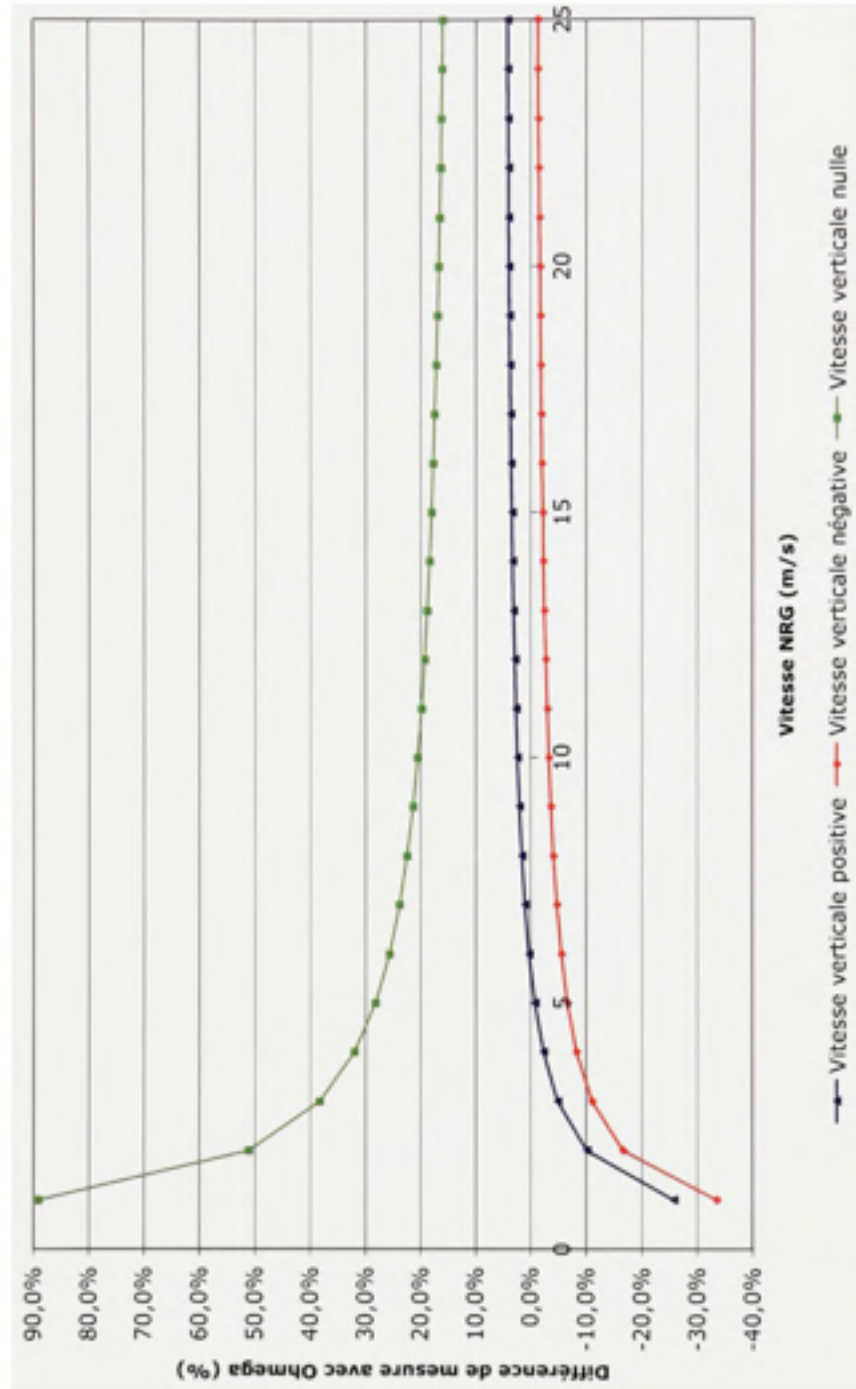


Figure I.30 Variation de lecture de l'anémomètre NRG#40 (18m) sur les enregistreurs NRG et Ohmega en fonction de la vitesse verticale

Variation de mesure sur les enregistreurs NRG et SecondWind avec l'anémomètre NRG#40 (18m)

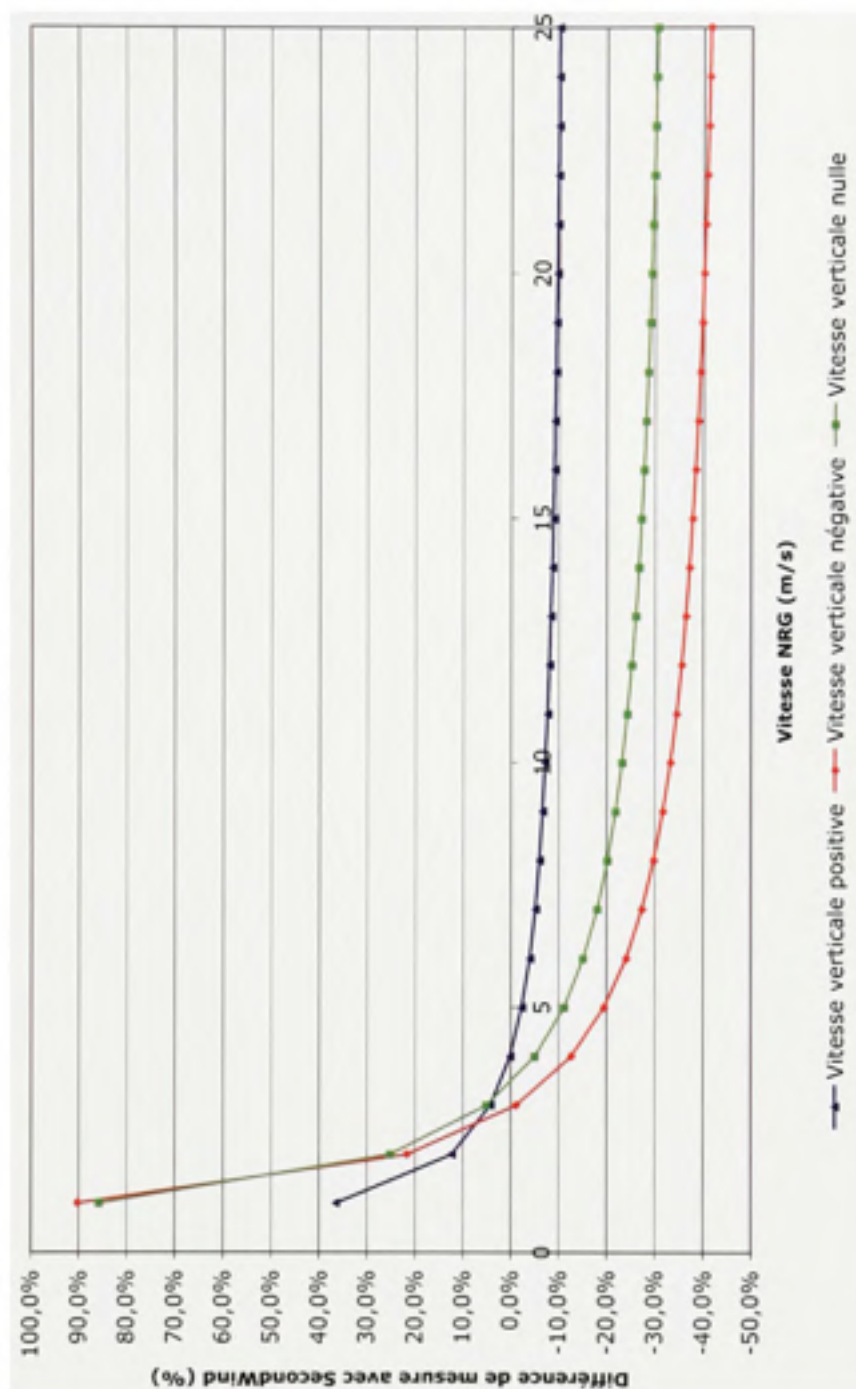


Figure I.31 Variation de lecture de l'anémomètre NRG#40 (18m) sur les enregistreurs NRG et SecondWind en fonction de la vitesse verticale

Variation de mesure sur les enregistreurs Omega et SecondWind avec l'anémomètre NRG#40 (18m)

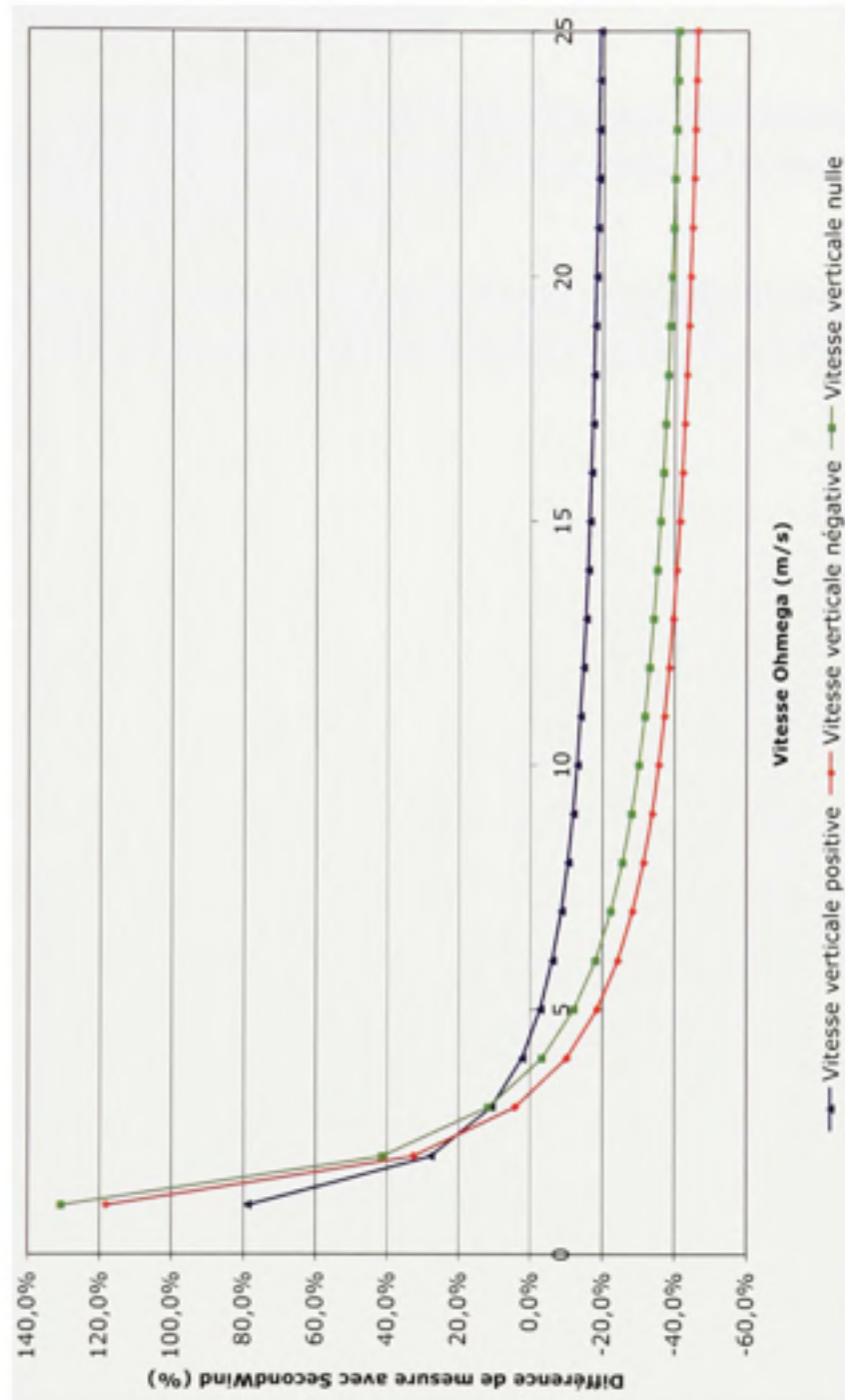


Figure I.32 Variation de lecture de l'anémomètre NRG#40 (18m) sur les enregistreurs Omega et SecondWind en fonction de la vitesse verticale

### **I.3 Équations de calibration des anémomètres**

Les figures qui suivent illustrent les droites d'étalonnage obtenues pour les anémomètres utilisés dans le cadre du projet. Les figures présentent les points de mesure, la régression obtenue ainsi que les bornes d'incertitude de la calibration.

Dans le cas de l'anémomètre chauffant NRG IcefreeIII, deux calibrations sont présentées. La première a été effectuée sans la mise en marche du système de chauffage et la seconde avec le chauffage activé.



## I.3.1 Risø P2546a

## Étalonnage de l'anémomètre Risø P3546a

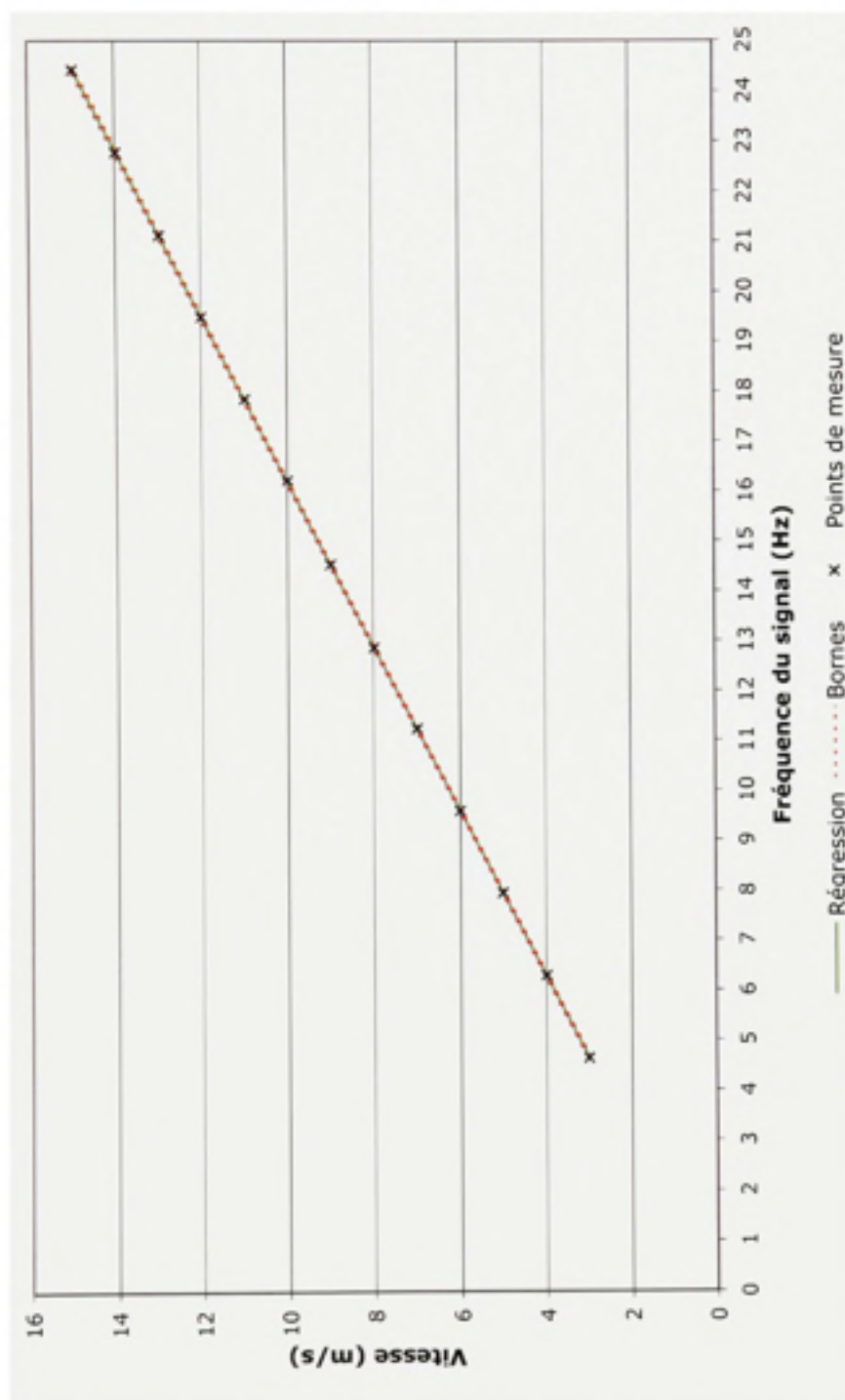


Figure I.33 Calibration de l'anémomètre Risø P2546a

## I.3.2 NRG#40

## Étalonnage de l'anémomètre NRG#40

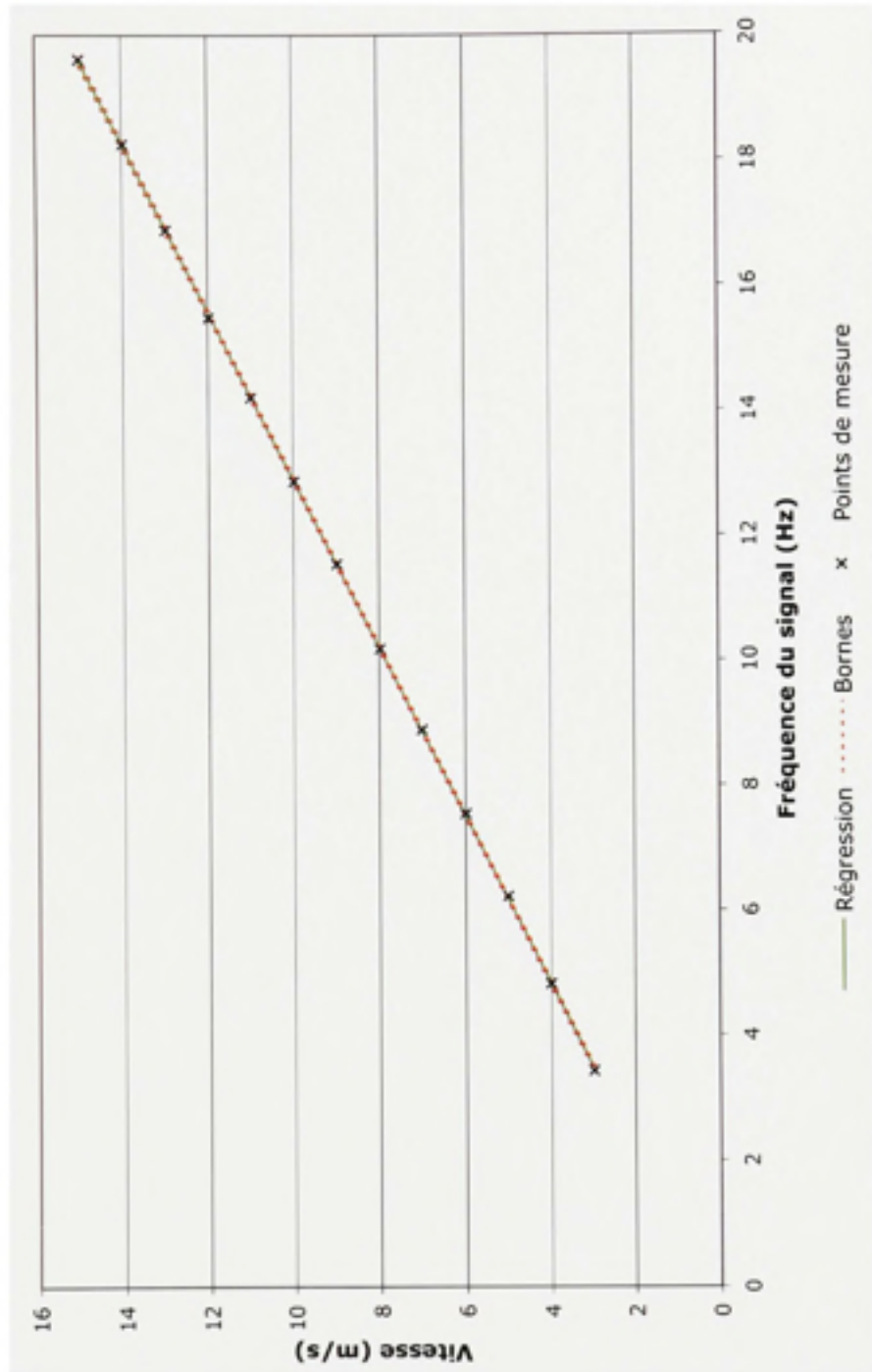


Figure I.34 Calibration de l'anémomètre NRG#40

## I.3.3 NRG IcefreeIII

## Étalonnage de l'anémomètre NRG Icefree III (chauffé)

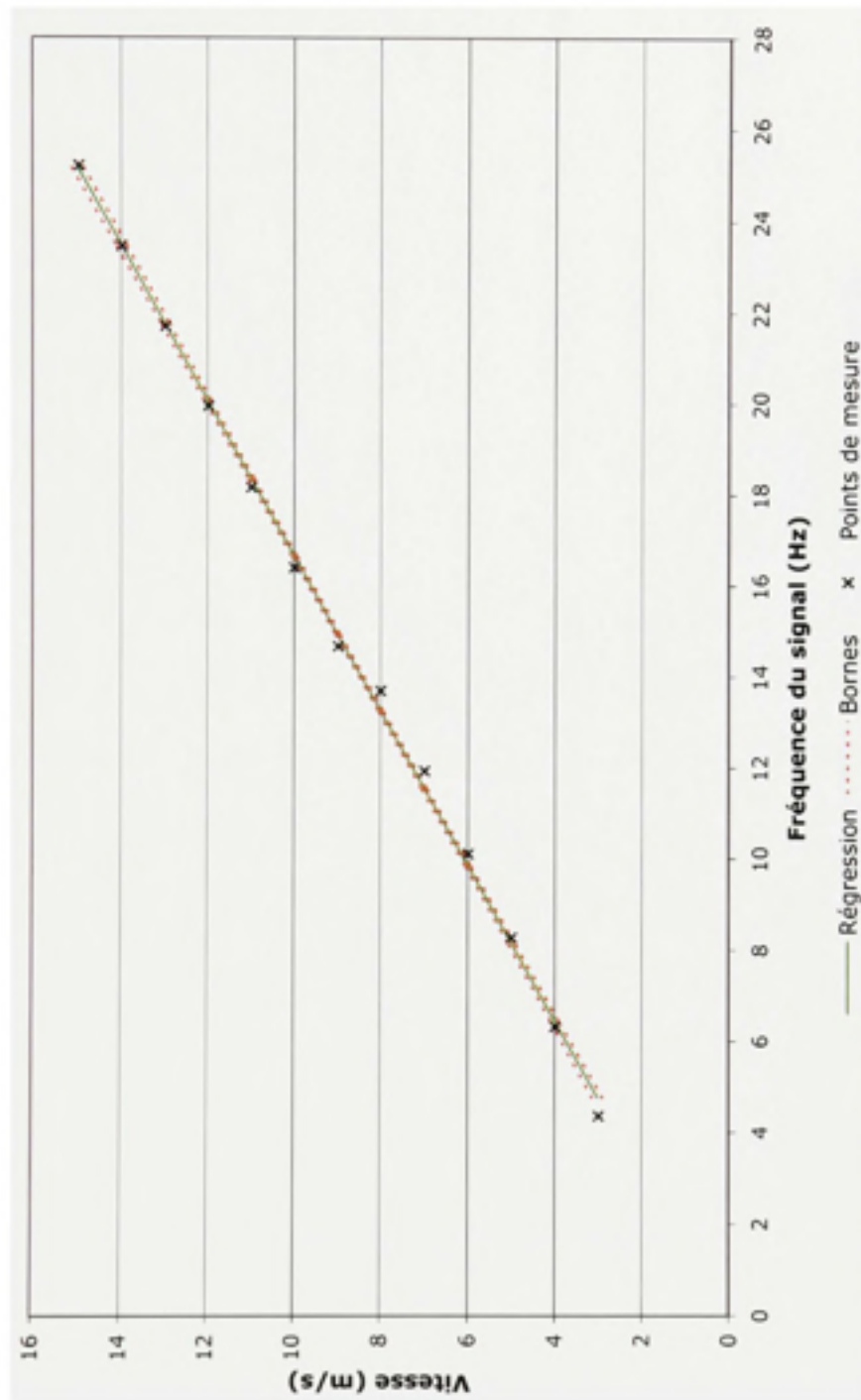


Figure I.35 Calibration de l'anémomètre NRG IcefreeIII (avec chauffage)

### Étalonnage de l'anémomètre NRG Icefree III (pas chauffé)

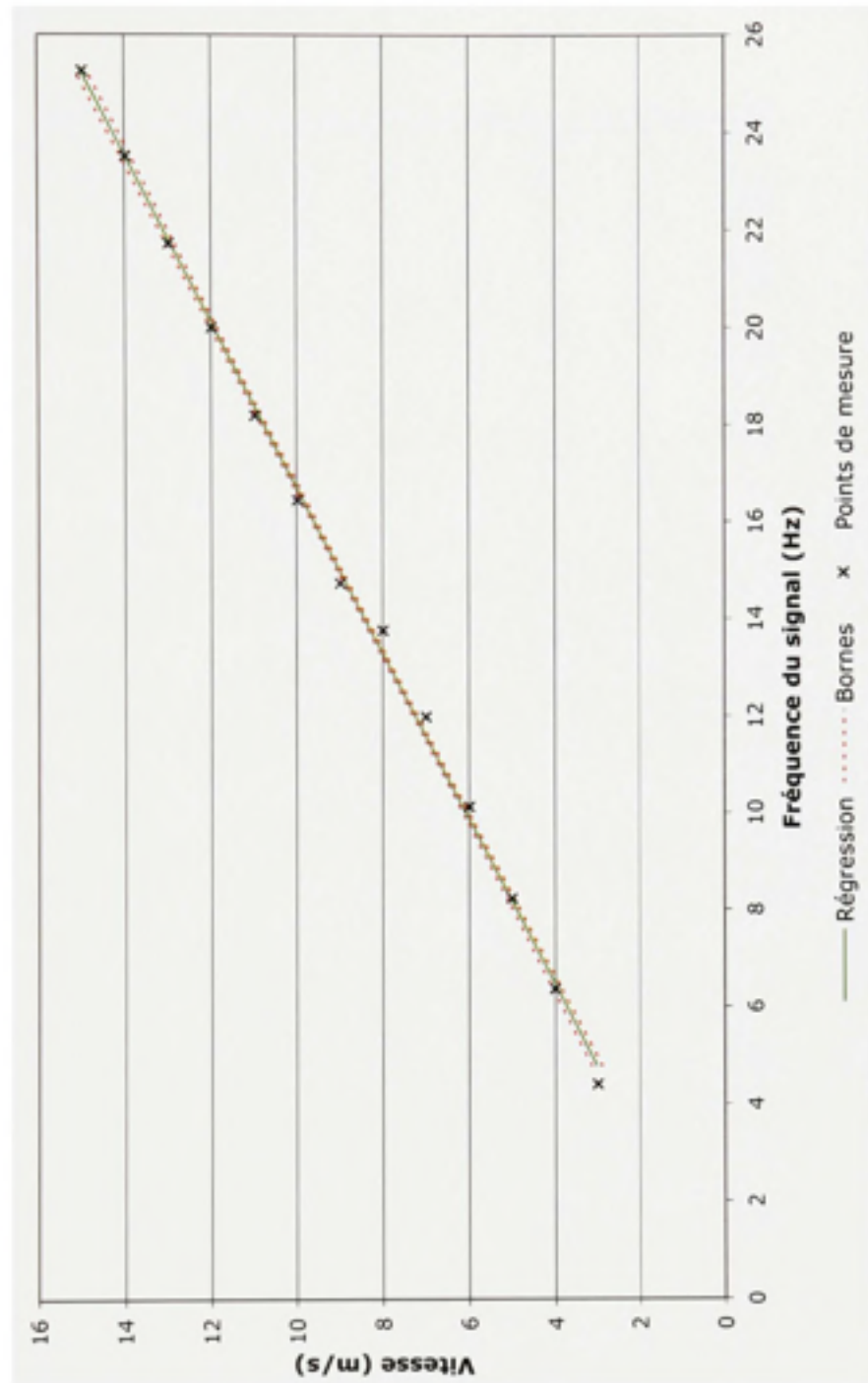


Figure L36 Calibration de l'anémomètre NRG IcefreeIII (sans chauffage)

## I.3.4 RMY-5103

## Étalonnage de l'anémomètre RMY-5103

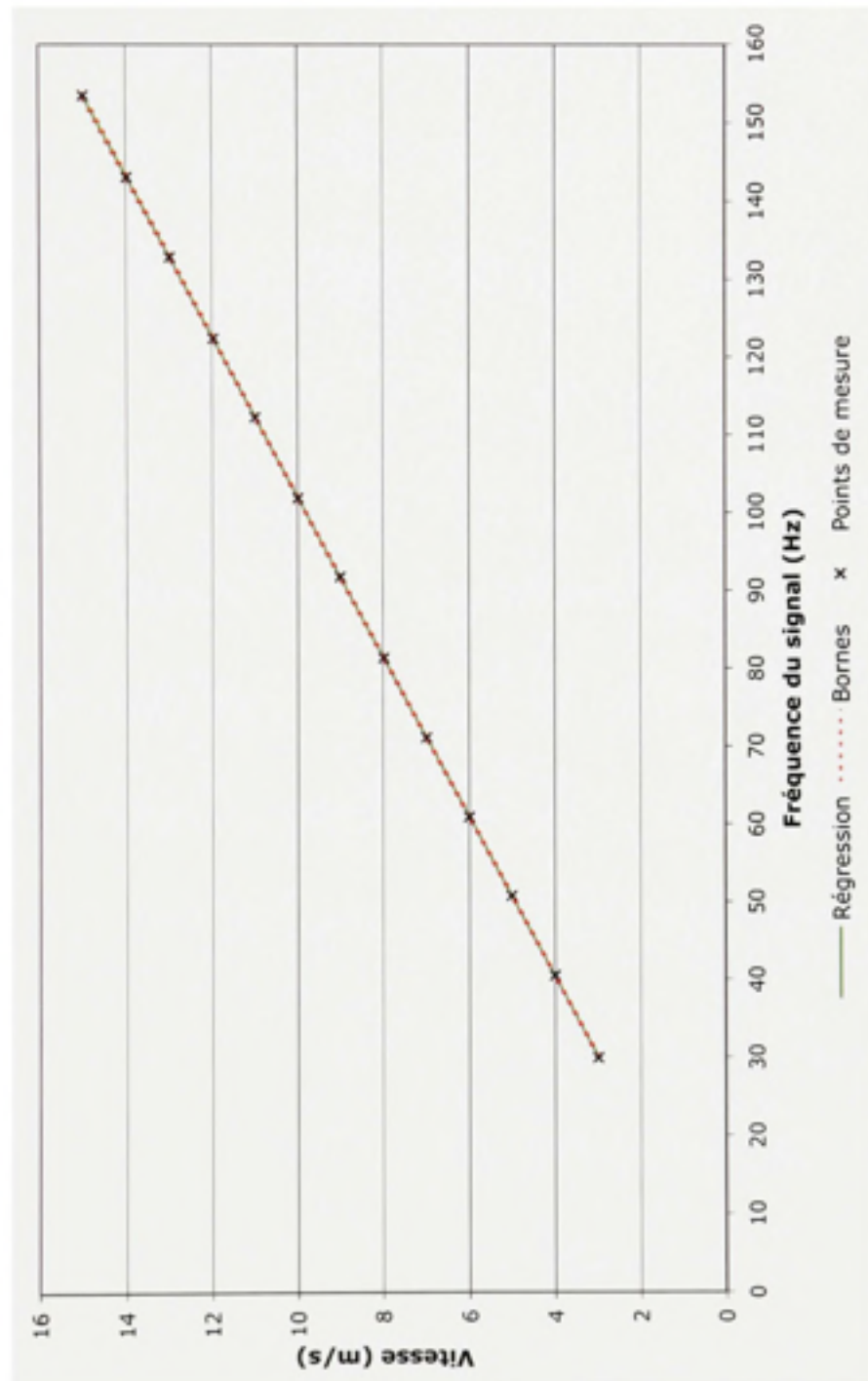


Figure I.37 Calibration de l'anémomètre RMY-5103



L3.5 RMY-5305

Étalonnage de l'anémomètre RMY-5305

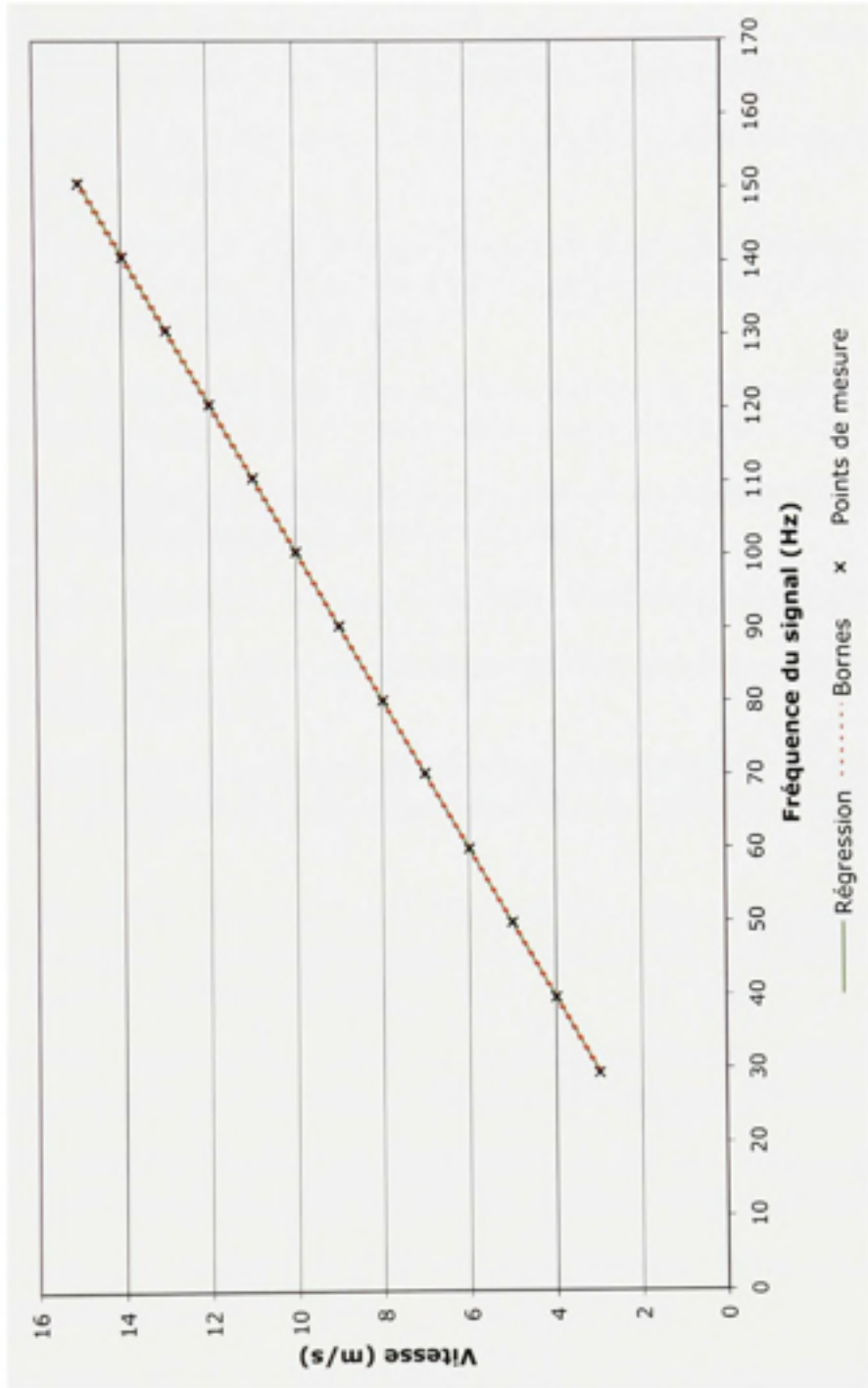


Figure I.38 Calibration de l'anémomètre RMY-5305

## BIBLIOGRAPHIE

- AWS Scientific Inc. 1997 (April). *Wind Resource Assessment Handbook : Fundamentals for Conducting a Successful Monitoring Program*. Rapport Technique. NREL.
- Bendat, J. S., et Piersol, A. G. 2000. *Random Data : Analysis and Measurement Procedures*. Third edn. Wiley Inter-Science.
- Bjerregaard, E., et Pedersen, T. F. 2002 (January). *Requirements to Cup Anemometers Applied for Power Curve Measurements Under the Danish Approval Scheme for Wind Turbines*. Rapport Technique. Risø National Laboratory.
- Bowen, A. J., et Teunissen, H. W. 1986. Correction Factors for the Directional Response of Gill Propeller Anemometers. *Boundary-Layer Meteorology*, **37**(4), 407–413.
- Brazier, C. E. 1914. Recherches Expérimentales sur les Moulinets Anémométriques. *Annales du Bureau Central Météorologique de France*, 157–300.
- Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., et Bossanyi, E. 2001. *Wind Energy Handbook*. Wiley.
- Busch, N. E., et Kristensen, L. 1976. Cup Anemometer Overspeeding. *Journal of Applied Meteorology*, **15**(12), 1328–1332.
- Dahlberg, J.-Å., Pedersen, T. F., et Busche, P. 2006 (May). *ACCUWIND - Methods for Classification of Cup Anemometers*. Rapport Technique Risø-R-1555(EN). Risø National Laboratory.
- Desjardins, R. L., Reid, W. S., Buckley, D. J., et Fagan, W. 1986. Description and Performance Testing of a Low Friction, Twin-Propeller Anemometer with Wind Vane. *Journal of Physics E : Scientific Instruments*, **19**(8), 632–637.
- Deslauriers, M. 1999. *Problématique reliée aux essais bidimensionnels de profils d'aile en soufflerie en présence de murs séparateurs*. Mémoire de maîtrise, Université Laval.
- Eecen, P. J., et de Noord, M. 2005 (June). *Uncertainties in Cup Anemometer Calibrations : Type A and Type B Uncertainties*. Rapport Technique ECN-C-05-066. ECN Wind Energy.
- Eecen, P. J., Mouzakis, F., et Cuerva, A. 2006 (May). *ACCUWIND - Work Package 3 Final Report*. Rapport Technique ECN-C-06-047. ECN Wind Energy.
- Fichtl, G. H., et Kumar, P. 1974. The Response of a Propeller Anemometer to Turbulent Flow with the Mean Wind Vector Perpendicular to the Axis of Rotation. *Boundary-Layer Meteorology*, **6**(3-4), 363–379.
- Fortin, G., Hochart, C., Perron, J., et Ilinca, A. 2005 (Août). *Caractérisation des Conditions Météorologiques et du Givre sur le Site de l'Ancienne Mine de Noranda à Murdochville Durant la Campagne de Mesure 2004-2005*. Rapport Technique GF-05-01. LIMA.

- Fortin, G., Perron, J., et Ilinca, A. 2006 (Juin). *Caractérisation des Conditions Météorologiques et du Givre sur le Site de l'Ancienne Mine de Noranda à Murdochville Durant la Campagne de Mesure 2005-2006*. Rapport Technique GF-06-01. LIMA.
- Frandsen, S., Antoniou, I., Hansen, J. C., Kristensen, L., Madsen, H. Aa., Chaviaropoulos, B., Douvikas, D., Dahlberg, J.-Å., Derrick, A., Dunbabin, P., Hunter, R., Ruffle, R., Kanellopoulos, D., et Kapsalis, G. 2000. Redefinition Power Curve for More Accurate Performance Assessment of Wind Farms. *Wind Energy*, **3**(2), 81–111.
- Hicks, B. B. 1972. Propeller Anemometers as Sensors of Atmospheric Turbulence. *Boundary-Layer Meteorology*, **3**(2), 214–228.
- Horst, T. W. 1973. Corrections for Response Errors in a Three-Component Propeller Anemometer. *Journal of Applied Meteorology*, **12**(4), 716–725.
- Hunter, R., Pedersen, B. M., Pedersen, T. F., Klug, H., van der Borg, N., Kelley, N., et Dahlberg, J.-Å. 1999 (April). *Expert Group Study on Recommended Practices for Wind Turbine Testing and Evaluation - Volume II, Wind Speed Measurement and Use of Cup Anemometry*. Norme. IEA.
- Hunter, R., Pedersen, T. F., Dunbabin, P., Antoniou, I., Frandsen, S., Klug, H., Albers, A., et Lee, W. K. 2001 (January). *European Wind Turbine Testing Procedure Developments Part I : Measurement Method to Verify Wind Turbine Performance Characteristics*. Rapport Technique Risø-R-1209(EN). Risø National Laboratory.
- Huysing, P. N. 1993 (June). *Anemometer Test Report*. Rapport Technique ITR 633. Australian Government Bureau of Meteorology.
- IEC. 2005 (December). *Wind Turbines - Part 12-1 : Power Performance Measurements of Electricity Producing Wind Turbines*. Norme IEC 61400-12-1 Ed.1. International Electrotechnical Commission.
- International Organization for Standardization. 1993. *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. 1st edn. ISO, Geneva, Switzerland.
- Kaganov, E. I., et Yaglom, A. M. 1976. Errors in Wind-Speed Measurements by Rotation Anemometers. *Boundary-Layer Meteorology*, **10**(1), 15–34.
- Kristensen, L. 1993 (April). *The Cup Anemometer and Other Exciting Instruments*. Rapport Technique Risø-R-615(EN). Risø National Laboratory.
- Kristensen, L. 1994 (August). *Cups, Props and Vanes*. Rapport Technique Risø-R-766(EN). Risø National Laboratory.
- Kristensen, L. 1998. Cup Anemometer Behavior in Turbulent Environments. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **15**(1), 5–17.

- Kristensen, L. 1999. The Perennial Cup Anemometer. *Wind Energy*, **2**(1), 59–75.
- Kristensen, L. 2002. Can A Cup Anemometer ‘Underspeed’ ? *Boundary-Layer Meteorology*, **103**(1), 163–172.
- Kristensen, L. 2005 (February). *Fragments of the Cup Anemometer History*.
- Kristensen, L., et Hansen, O. F. 2002 (April). *Distance Constant of the Risø Cup Anemometer*. Rapport Technique Risø-R-1320(EN). Risø National Laboratory.
- Kristensen, L., Hansen, O. F., et Højstrup, J. 2003. Sampling Bias on Cup Anemometer Mean Winds. *Wind Energy*, **6**(4), 321–331.
- MacCready, P. B. 1965. Dynamic Response Characteristics of Meteorological Sensors. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **46**, 533–538.
- Manwell, J. F., McGowan, J. G., et Rogers, A. L. 2002. *Wind Energy Explained : Theory, Design and Application*. Wiley.
- Marvin, C. F. 1934. Recent Advances in Anemometry. *Monthly Weather Review*, **62**(4), 115–120.
- MEASNET. 1997 (September). *Cup Anemometer Calibration Procedure. Version 1*. Rapport Technique. Network of European Measuring Institutes.
- Papadopoulos, K. H., Stefanatos, N. C., Schmidt Paulsen, U., et Morfiadakis, E. 2001. Effects of Turbulence and Flow Inclination on the Performance of Cup Anemometers in the Field. *Boundary-Layer Meteorology*, **101**(1), 77–107.
- Patterson, J. 1926. *The Cup Anemometer*. the Royal Society of Canada. 54.
- Pedersen, T. F. 2003 (April). *Development of a Classification System for Cup Anemometers - CLASSCUP*. Rapport Technique Risø-R-1348(EN). Risø National Laboratory.
- Pedersen, T. F. 2004a (March). *Characterisation and Classification of RISØ P2546 Cup Anemometer*. Rapport Technique Risø-R-1364 (ed. 2) (EN). Risø National Laboratory.
- Pedersen, T. F. 2004b. On Wind Turbine Power Performance Measurements at Inclined Air-flow. *Wind Energy*, **7**(3), 163–176.
- Pedersen, T. F., Gjerding, S., Ingham, P., Enevoldsen, P., Hansen, J. K., et Jørgensen, H. K. 2002 (April). *Wind Turbine Power Performance Verification in Complex Terrain and Wind Farms*. Rapport Technique Risø-R-1330(EN). Risø National Laboratory.
- Pedersen, T. F., Dahlberg, J.-Å., et Busche, P. 2006 (May). *ACCUWIND - Classification of Five Cup Anemometers According to IEC61400-12-1*. Rapport Technique Risø-R-1556(EN). Risø National Laboratory.

- Pedersen, T.F., et Schmidt Paulsen, U. 1999. Classification of Operational Characteristics of Commercial Cup-Anemometers. *Pages 611–615 of James & James (ed), 1999 European Wind Energy Conference : Wind Energy for the Next Millenium*. Earthscan Publications Ltd.
- Schaffner, B. 2002. *Wind energy site assessment in harsh climatic conditions, Long term experience in Swiss Alps*. Rapport Technique. METEOTEST.
- Seguro, J. V., et Lambert, T. W. 2000. Modern Estimation of the Parameters of the Weibull Wind Speed Distribution for Wind Energy Analysis. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **85**(1), 75–84.
- Sheppard, P. A. 1940. An Improved Design of Cup Anemometer. *Journal of Scientific Instruments*, **17**(9), 218–221.
- Verkaik, J. W. 1998. Evaluation of the K-Gill Propeller Vane. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **15**(4), 901–915.
- Verkaik, J. W. 2006 (April). *On Wind and Roughness over Land*. Thèse doctorale, University of Wageningen.
- Wyngaard, J. C. 1981. Cup, Propeller, Vane, and Sonic Anemometers in Turbulence Research. *Annual Review of Fluid Mechanics*, **13**(January), 399–423.