



Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement



Stage en instrumentation

Scientifique

Rapport de stage de fin d'études

Du 2 avril au 20 juin 2012

DUT Mesures Physiques, IUT d'Annecy

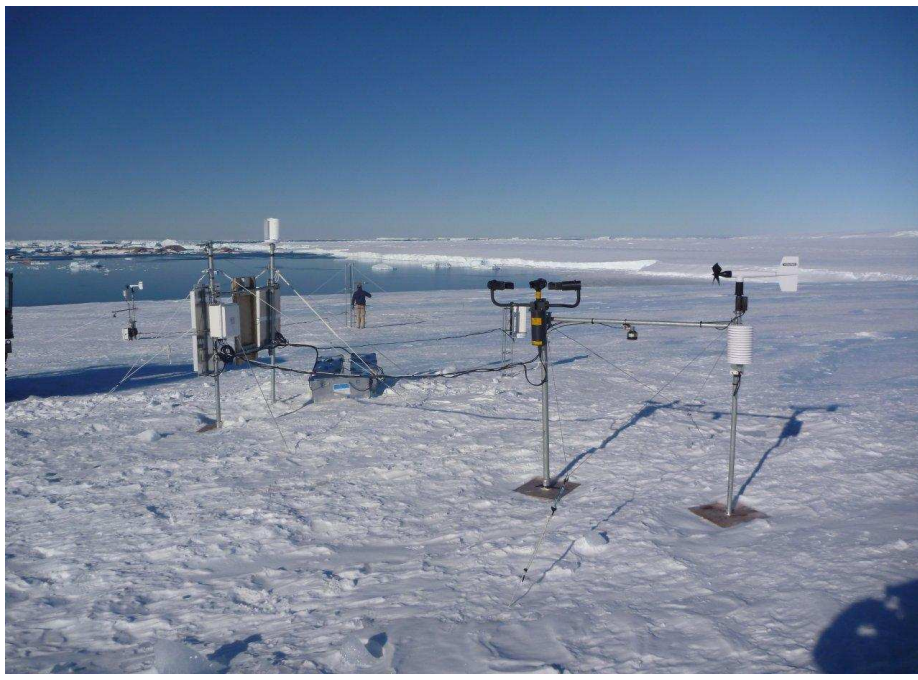
Lieu du stage : LGGE Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement

Stagiaire: Firmin Fontaine

Directeur de stage : Christophe Genthon

Tuteur du stage : Luc Piard

Tuteur IUT : Myriam Cheysnau-Deweirdt



Station météorologique, D3, Terre Adélie

MPH
Mesures Physiques

IUT
Annecy

Mes remerciements s'adressent en premier lieu à Christophe Genthon qui m'a permis de réaliser ce stage au sein du LGGE. Il m'a fait découvrir les activités du laboratoire et leurs enjeux.

Je tiens à remercier Luc Piard qui m'a encadré durant toute la durée du stage. Ses connaissances et son expérience ont été très bénéfiques pour l'avancement de nos projets mais aussi d'un point de vu personnel.

De manière plus générale, j'exprime ma gratitude à l'égard de l'ensemble des personnes travaillant au LGGE pour leur disponibilité et les connaissances qu'ils m'ont fait partager.

Enfin, je suis reconnaissant envers l'équipe pédagogique du département Mesures Physiques pour leur implication dans notre formation. Plus particulièrement je remercie mon tuteur IUT Myriam Chesneau-Deweirdt pour sa visite au laboratoire.

SOMMAIRE

Introduction.....	5
1. Le contexte du stage	6
1.1 Le LGGE	6
2.2 Le thème de recherche.....	7
2.3 Les problèmes rencontrés et les objectifs	8
2. Prise en main du matériel et premiers tests sur capteurs. ...	11
2.1 Les moyens de mesure et le matériel	11
2.2 Etude de thermohygromètres	13
2.3 Etude d'une fourche optique	15
3. Réalisation d'un banc de test pour anémomètre.....	18
3.1 Etablissement du cahier des charges	18
3.2 Choix des composants et conception de la soufflerie.....	19
3.3 Calibration et validation de la soufflerie.....	22
4. Etude d'un anémomètre	25
4.1 Problématique des roulements et recherches de solutions	25
4.2 Etude en régime permanent d'un anémomètre 05103 en chambre froide.....	27
4.3 Etude en régime transitoire d'un anémomètre 05103 en chambre froide.....	30
5. Conclusion.....	31
5.1 Conclusion technique et perspectives.....	31
5.2 Bilan général.....	32
Table des annexes.	33

Introduction

L'étude du climat actuel est composée d'une part de la modélisation climatique et d'autre part de la collecte de données météorologiques en différentes régions du globe.

Dans le cadre de ses recherches scientifiques, le LGGE est amené à réaliser des campagnes de mesures en Antarctique. Ce continent est un terrain d'expérimentations peu fréquent. La compréhension du climat de cette région est en effet indispensable pour comprendre le changement climatique à l'échelle mondiale.

Le LGGE met en place et entretient plusieurs sites de mesures météorologiques. Les conditions climatiques extrêmes (température, vent) font subir aux capteurs de fortes contraintes qui altèrent leur fonctionnement.

L'objectif de ce stage est de tester ces capteurs en essayant de reproduire les conditions climatiques de l'Antarctique et de comprendre ce qui limite leurs mesures.

La première partie de ce rapport est destinée à expliquer le contexte du stage par une présentation du LGGE et de son activité. Les objectifs à atteindre sont également définis dans cette partie.

Dans un second temps sont présentées la prise en main des moyens de mesures et l'étude de deux types de capteurs, une fourche optique et un thermo-hygromètre.

La réalisation d'une soufflerie et sa calibration compose une troisième partie.

La quatrième partie présente l'étude d'un anémomètre.

Une synthèse technique sur chaque point abordé ainsi qu'un bilan d'ensemble sur le stage permettent de conclure ce rapport.

1. Le contexte du stage

Cette partie a pour but de définir le contexte du stage par une description de l'environnement de travail, des problématiques rencontrées par le laboratoire et enfin par la présentation des objectifs du stage.

1.1 Le LGGE

Le Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement (LGGE) a été créé en 1958 par Louis Lliboutry. Situé dans le domaine universitaire à St Martin d'Hères, il est placé sous la tutelle du CNRS et de l'UJF.

Le LGGE consacre ses recherches à l'étude du climat et à la composition de l'atmosphère. Ces études portent sur le passé et le présent par l'interprétation des accumulations de neige et de glace. Mais l'évolution future de ces paramètres climatiques est également envisagée à l'aide de procédés de modélisation. L'institut réalise également des recherches sur les caractéristiques physiques de matériaux comme la neige et la glace mais aussi sur leurs interactions avec l'atmosphère. Ses domaines d'activité sont regroupés en quatre thèmes scientifiques :

- Passé, Présent, Projection (CLIPS)
- Chimie Atmosphérique, Neige, Glace (CHANG)
- Dynamique de l'Écoulement et physique de la Déformation du matériau Glace (EDGE)
- Cryosphère, Hydrosphère et Climat de montagne (CHyC)

La compréhension de problèmes scientifiques et de sociétés comme l'évolution du climat, la pollution à différentes échelles et les risques glaciaires est rendue possible par les différentes recherches réalisées par les membres du laboratoire.

La centaine de personnes (chercheurs, enseignants-chercheurs, doctorants, ingénieurs, techniciens, stagiaires) réalise des études sur le site de St Martin d'Hères. Les expérimentations s'étendent également dans les régions polaires Antarctique et Arctique et dans des régions montagneuses comme les Alpes, la cordillère des Andes ou l'Himalaya. En plus de la recherche, c'est la volonté d'enseignement et de diffusion du savoir qui définit le LGGE.

2.2 Le thème de recherche

Ce stage s'inscrit dans le thème de recherche Climat : Passé, Présent, Projection (CLIPS).

L'étude du climat passé, présent et de son évolution future est un thème majeur de recherches au sein du LGGE. L'analyse de carottes de glace et de relevés météorologiques spécifiques associée à la modélisation climatique permet de comprendre le mécanisme du système climatique.

Les activités actuelles de cette équipe de recherche peuvent se classer en trois axes majeurs.

Le premier est l'étude de la physique de la neige, c'est-à-dire ses transitions de l'état de précipitation à la formation des couches de neige compacte puis de glace.

Un autre domaine auquel s'intéresse une partie de l'équipe CLIPS est le climat. Les études portent sur le forçage et les rétroactions qui modifient le climat ainsi que les cycles biogéochimiques.

Enfin, les études portant sur le climat polaire, les processus atmosphériques et ces bilans de surfaces composent le troisième axe de recherches et c'est dans ce contexte que les problématiques étant à l'origine du stage sont rencontrées.

Les résultats des actions menées par cette équipe de recherches vont contribuer au rapport du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) prévu pour 2013.

2.3 Les problèmes rencontrés et les objectifs



Figure 1 : Carte représentant l'Antarctique, la zone rouge correspond au territoire français

L'Antarctique est situé au pôle Sud et est entouré de l'océan Austral. Ce continent est recouvert à 98% de glace d'où son nom « d'Inlandsis » et son altitude moyenne de 2,3km est la plus élevée du globe.

Plusieurs paramètres font que l'Antarctique est le continent le plus froid de la planète. L'ensoleillement faible, l'altitude, l'isolement des courants marins et la réflexion de la glace en sont les principaux.

Le LGGE travaille principalement sur deux sites : Dôme C et Dumont d'Urville situé sur la côte.

Le plateau Antarctique où se de Dôme C est caractérisé par des températures extrêmement basses, en moyenne -20°C à 2000m et -55°C à 3500m d'altitude. En saison hivernale les températures tombent fréquemment en dessous de -60°C / -70°C dans les terres.

Les stations météorologiques subissent ces basses températures et doivent donc être adaptées au froid. La moyenne de vitesse du vent sur le plateau est modérée (de 10 à 20km/h) et il y a relativement peu de précipitations.

Pour la base de Dumont d'Urville et ses environs, les températures sont plus clémentes (-10°C de moyenne annuelle) en raison de la proximité de l'océan qui tempère un peu le climat polaire. Mais pour ce qui est du vent, il peut atteindre une moyenne de 30 à 70 km/h sur l'année, ce qui est très élevé. La base côtière de Dumont d'Urville a enregistré une vitesse de vent de 320km/h. Le phénomène de vent catabatique est à l'origine de ces valeurs. La masse d'air froid descendant du plateau continental vers les côtes accélère avec les différences de pressions et de températures pour atteindre des vitesses élevées.

Ces conditions climatiques extrêmes rendent difficile le fonctionnement des stations météorologiques. Les différents capteurs subissent de fortes contraintes qui altèrent leurs mesures.



Figure 2 : Anémomètre endommagé, Dôme C, Antarctique

Objet du stage :

Comme expliqué précédemment, le fonctionnement des capteurs météorologiques est rendu difficile par les conditions climatiques.

Le travail porte sur 3 types de capteurs :

- Une fourche optique → nouveau capteur à tester avant une utilisation sur le terrain.
- Un thermo-hygromètre → problème de formation de givre sur le capteur.
- Un anémomètre → problème de blocage de l'axe de rotation à basse température.

L'objectif de ce stage est donc, de **tester ces capteurs en essayant de retrouver les mêmes conditions que sur le terrain, dans le but de voir s'ils fonctionnent et sinon, quels facteurs limitent leurs mesures.**

Pour retrouver ces conditions, l'utilisation d'une chambre froide est nécessaire. De plus, l'étude de l'anémomètre qui représente le sujet principal du stage nécessite la réalisation d'une soufflerie pouvant créer un flux d'air dans la chambre froide.

Le travail de recherche et de conception de ce banc de test est donc une part importante dans le travail réalisé durant le stage.

2. Prise en main du matériel et premiers tests sur capteurs.

Dans cette partie sont présentés le matériel utilisé pour réaliser les expérimentations durant le stage ainsi que l'étude d'une fourche optique et d'un thermo-hygromètre.

2.1 Les moyens de mesure et le matériel

Centrale d'acquisition et logiciel de programmation :

Une centrale d'acquisition CR1000 de Campbell Scientific[®] est utilisée pour collecter les données des capteurs pour les différentes expérimentations.

Cette centrale dédiée à la mesure météorologique est assez robuste et est alimentée en 12V par une batterie, elle permet de faire des mesures précises.

Elle possède différents types d'entrées : unipolaires, différentielles ou encore d'impulsion pour réaliser un comptage.

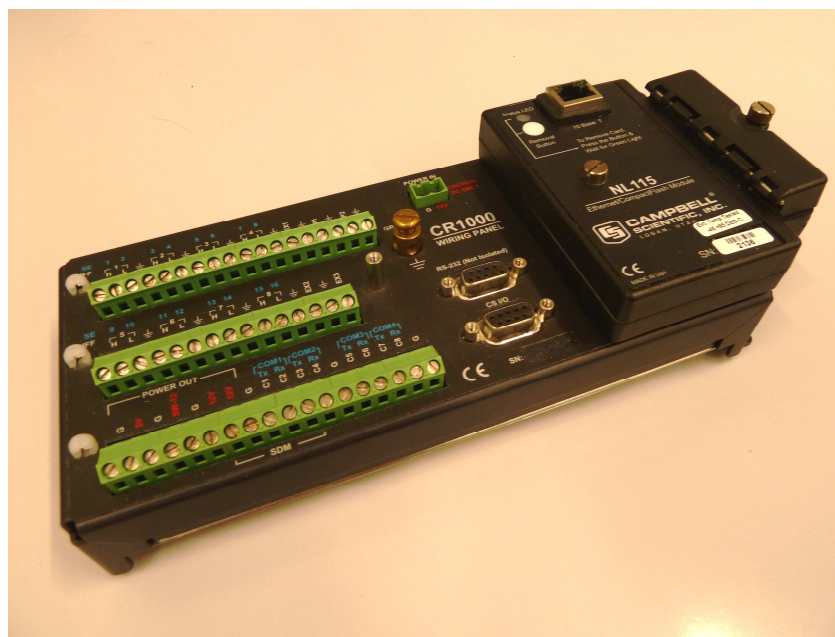


Figure 3 : centrale d'acquisition CR1000 de Campbell Sc

Le logiciel CRBasic permet de créer des programmes d'acquisitions, utilisant un langage qui s'apparente au langage C, destinés à commander les mesures effectuées par la centrale.

Ainsi on peut choisir par exemple les variables à mesurer, l'intervalle de mesure ou encore les corrections à effectuer sur la mesure (coefficient et offset propre à chaque capteur).

La communication avec l'ordinateur s'effectue par liaisons RS232 et les données sont récupérées sous formes de fichiers de données exploitables ensuite sur un tableur de type Excel ou Opencalc.

La chambre froide :

La plupart des expérimentations de ce stage nécessitent d'être réalisées à basse température. Une enceinte climatique SECASI[®] est donc utilisée, elle permet de travailler dans une plage de température allant de 140°C à -70°C.

La gestion de la température de la chambre froide se fait à l'aide du logiciel Sirpac2000[®]. Il permet de réaliser des programmes constitués de segments.

En déterminant la température de début et de fin du segment, sa durée ou encore le gradient de température, on commande les variations de température que l'on souhaite appliquer aux capteurs placés dans l'enceinte.



Figure 4 : chambre froide SECASI ST 340

2.2 Etude de thermohygromètres

Les mesures d'humidité et de température dans les stations météorologiques placées en Antarctique sont effectuées par des thermohygromètres VAISALA[®] (capteur de température et d'humidité relative HR).

Le problème rencontré avec les thermohygromètres déjà utilisés est la formation d'une couche de givre sur la tête de mesure lors de variations de température. Ce givre a pour conséquence une saturation de la valeur d'humidité relative mesurée.

VAISALA[®] propose depuis cette année un nouveau capteur avec une sonde de mesure d'humidité chauffée. L'objectif du chauffage est d'éviter le phénomène de condensation sur la tête de mesure.



Figure 5 ; HMP155 chauffé avec sonde de température externe.

L'étude de ce capteur a pour but dans un premier temps de prendre en main la centrale d'acquisition et le langage de programmation, mais l'objectif du test est d'évaluer dans quelle mesure ce capteur peut résoudre le problème de dépôt de givre.

Le hmp155 chauffé est donc testé en chambre froide avec un autre thermohygromètre non chauffé pour pouvoir comparer les mesures respectives des deux capteurs. Le programme d'acquisition envoyé à la centrale pour ce test est joint en annexe A (pages 34/35).

La programmation de la chambre froide est constituée de deux descentes et remontées en température. Les gradients de vitesse sont plus forts dans la deuxième partie du test pour voir s'il y a une éventuelle différence du temps de réponse des

capteurs. Les paliers de températures constantes sont destinés à permettre aux capteurs d'être en équilibre thermique.

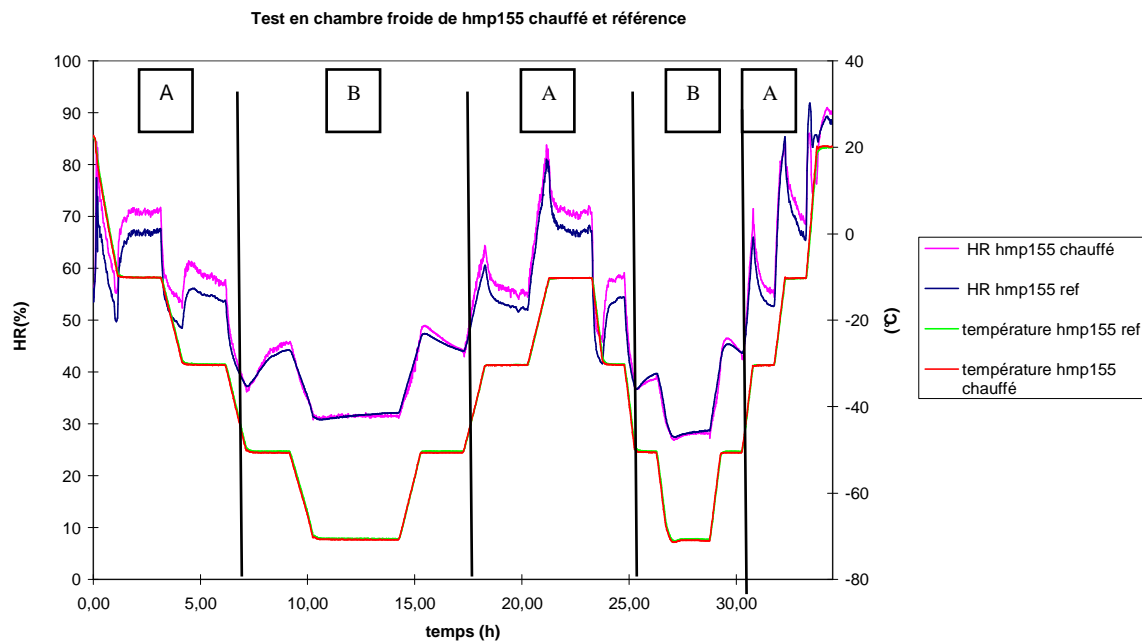


Figure 6 : Résultat du test en chambre froide de l'hmp155 chauffé

La réponse en température est en accord avec les mesures données par le capteur hmp155 de référence. L'écart entre ces deux paramètres est inférieur à 0,5°C.

Pour la réponse en humidité, on peut distinguer deux régimes de fonctionnement représentés par les zones A et B.

- Pour les zones A, correspondant à une température comprise entre 20°C et – 30°C, on remarque que la différence des valeurs d'humidité mesurées par les capteurs est significative (environ 4 %).
- Pour les zones B, correspondant à une température comprise entre -30°C et – 70°C, la différence des valeurs d'humidité mesurées est beaucoup moins importante. Elle est comprise dans la précision de ± 1 % HR des capteurs.

Cependant ce test est limité dans le sens où il ne nous permet pas de comprendre ces différences. Il faudrait réaliser cette étude dans une chambre froide ayant une commande en humidité relative pour voir l'intérêt du capteur chauffé.

2.3 Etude d'une fourche optique

Dans l'étude du bilan de surface d'un site, plusieurs paramètres sont à prendre en compte : la fonte de la neige, les précipitations et les déplacements de neige.

Pour quantifier ces deux derniers paramètres le LGGE utilise des capteurs de déplacement comme les disdromètres optiques. Ces capteurs météorologiques permettent de compter le nombre de particules qui passent et leurs tailles. On peut donc récupérer des informations sur leur quantité et leur type (neige, grêle, pluie...). Ces capteurs fournissent des données intéressantes mais ils sont coûteux et difficiles à mettre en œuvre sur le terrain.

C'est pourquoi une étude est menée sur un capteur industriel du fabricant Wenglor[®] moins gourmand en énergie et moins onéreux. Il est constitué d'une diode laser émettrice et d'un récepteur. Lorsque le faisceau laser entre l'émetteur et le récepteur est coupé, la sortie commute. On mesure donc un changement de niveau de tension, qui s'interprète comme le passage d'une particule de neige par exemple. L'objectif de l'étude est de savoir si ce capteur est capable de fonctionner à basse température (-70°C).

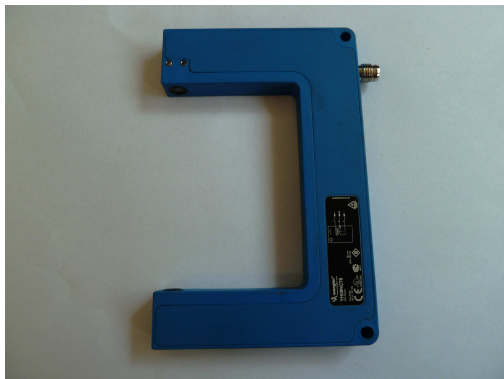


Figure 7 : fourche optique Wenglor



Figure 8 : disdromètre optique, Dôme C.

Pour simuler le passage de particules de neige dans le faisceau un petit moteur mettant en rotation un fil est utilisé (voir figure 8). De cette manière on peut commander le nombre d'obturations du faisceau en faisant varier la tension d'alimentation du moteur.

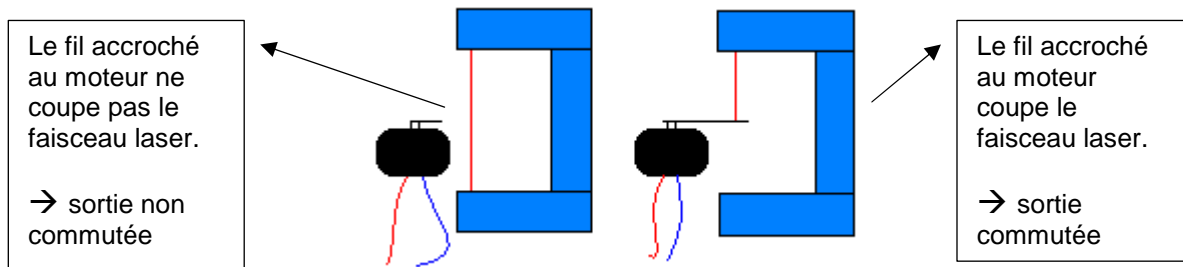


Figure 9 : schéma de fonctionnement du capteur

Le programme d'acquisition de la centrale correspondant aux tests suivants est joint en annexe B (page 36). L'ensemble du montage est inséré dans la chambre froide et est soumis à une descente puis une remontée en température.

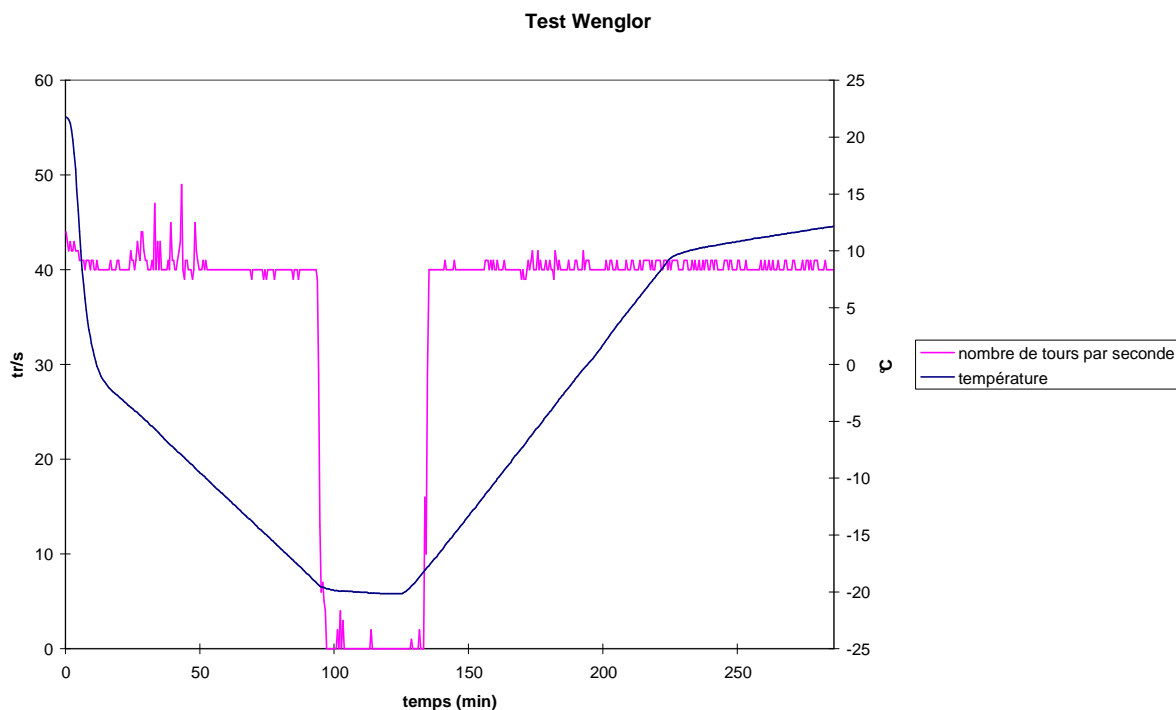


Figure 10 : Test de la fourche optique Wenglor en chambre froide

Cette étude montre qu'à partir de -19°C le capteur ne compte plus le passage du fil. Le comptage reprend dès qu'on remonte au dessus de -18°C .

Le capteur est constitué de plusieurs matériaux (plastiques, métaux...), il est donc possible que les écarts de dilatation thermique entre les matériaux causent un défaut d'alignement du faisceau laser et donc un arrêt de la mesure.

L'idée est donc de renforcer la structure du capteur par une cage métallique pour essayer d'éviter ce problème. Un test est donc réalisé avec le montage présenté sur la figure suivante.

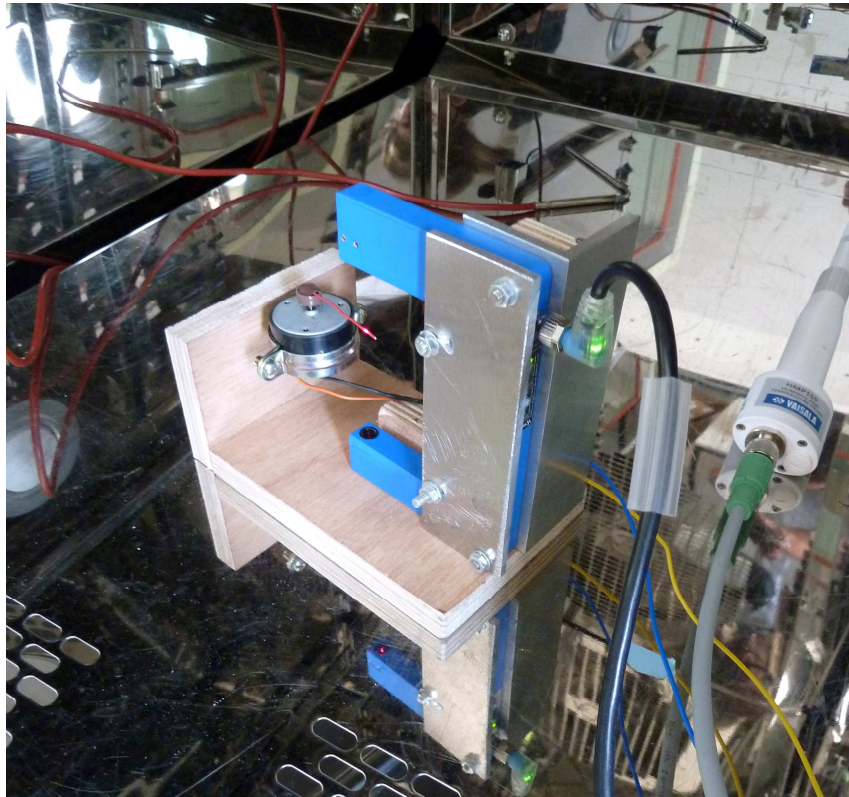


Figure 11 : Montage de la fourche optique avec structure renforcée

Malgré les modifications apportées au capteur, le résultat du test est similaire à celui réalisé précédemment (voir annexe C page 37).

Le défaut d'alignement dû à la dilatation thermique ne semble donc pas être la source du dysfonctionnement du capteur.

La dérive en température de l'électronique est probablement à l'origine du problème et des tests plus précis à ce niveau seraient nécessaires.

Une discussion est en cours avec le fabricant pour voir s'il pourrait fournir une version simplifiée du capteur pour l'adapter aux mesures que l'on cherche à lui faire faire.

3. Réalisation d'un banc de test pour anémomètre.

3.1 Etablissement du cahier des charges

Pour simuler un écoulement d'air dans la chambre froide, l'objectif est de réaliser une petite soufflerie pouvant s'intégrer dans l'enceinte frigorifique et contenir les anémomètres à tester.

Dimensions :

La taille de la soufflerie doit être adaptée aux dimensions de la chambre froide et à celles des anémomètres.

- largeur maximale de 40cm (largeur chambre froide 55cm)
- longueur maximale de 60cm (longueur chambre froide 75cm)
- hauteur maximale de 60cm (longueur chambre froide 75cm)
- largeur minimale du conduit de 20cm (hélice de l'anémomètre de 18cm de diamètre).

Flux d'air :

On se fixe pour objectif de vitesse de vent dans la soufflerie une valeur de 10m/s qui correspond à la moyenne annuelle mesurée sur la côte.

De plus pour ne pas fausser la mesure de vent, il faut que l'écoulement dans le conduit soit le moins turbulent possible.

Résistance au froid :

La température est également une contrainte pour la soufflerie qui devra fonctionner jusqu'à -70°C (température minimale à laquelle on veut tester l'anémomètre).

Vitesse de vent référence et commande du flux d'air :

Une des autres fonctions nécessaire est d'avoir une valeur de vent de référence dans le conduit de circulation d'air permettant d'interpréter les variations de vitesses des anémomètres par rapport à la valeur réelle.

La soufflerie doit également être munie d'une commande pour contrôler la vitesse du vent dans le conduit (contrôle de la vitesse de rotation du ventilateur).

Il est donc préférable que le ventilateur soit alimenté en basse tension.

3.2 Choix des composants et conception de la soufflerie

Choix de l'anémomètre de référence :

Le but des expérimentations étant de comprendre et quantifier l'influence de la température et de la vitesse du vent sur la réponse de l'anémomètre, il est nécessaire d'avoir une valeur de vitesse de vent de référence.

Le problème est que dans la plage de température de notre étude, 20°C à -70 °C, très peu de capteurs sont capables de donner une valeur fiable.

Notre budget étant restreint, la commande d'anémomètres de type fil chaud ou tube de Pitot pouvant fonctionner dans notre plage de température est impossible.

Pour contourner ce problème, l'idée est d'utiliser le signal de sortie tachymétrique du ventilateur de la soufflerie. De cette manière, on peut récupérer la vitesse de rotation du ventilateur et avoir une information sur le débit d'air dans la soufflerie.

Choix du ventilateur :

Les contraintes apportées par le cahier des charges ont permis d'affiner la recherche et le choix sur le ventilateur. La section prévue de la soufflerie est d'environ 400cm² (le diamètre des pales de l'anémomètre étant de 180mm). Connaissant cette section on peut calculer le débit minimum du ventilateur afin d'atteindre une vitesse de vent dans la soufflerie proche de 10 m/s.

D'après la formule reliant le débit et la vitesse :

$$Q = V \times S$$

Avec : $V = \text{vitesse en m/h}$ $Q = \text{débit en m}^3/\text{h}$ $S = \text{surface en m}^2$

On trouve un débit $Q = 36\,000 \times 0,04 = 1440 \text{ m}^3/\text{h}$.

Nous avons donc choisi le ventilateur « S-force axial » du fabricant ebm-papst®.

Voici ses principales caractéristiques: (documentation détaillée en annexe M page 47)

- diamètre de 200mm
- débit maximal de 1220 m³/h
- alimentation en 48 Vcc
- sortie tachymétrique (6 impulsions par tour)
- commande de vitesse en 0-5 V pour une vitesse allant de 800 à 6500 tr/min

Le schéma de câblage de la soufflerie est détaillé en annexe E page 39.

Conception de la soufflerie

La première solution envisagée a été de réaliser une soufflerie en circuit fermé avec des tubes souples reliant la partie « création du flux d'air par le ventilateur » à la partie « mesure avec l'anémomètre ».

Mais pour des raisons d'encombrement et notamment des problèmes de rayons de courbures des gaines, nous avons écarté cette méthode.

La configuration choisie est donc une enceinte rectangulaire avec d'un coté le ventilateur et de l'autre une ouverture laissant entrer le flux d'air.

La soufflerie a été réalisée sur un logiciel de conception assistée par ordinateur, SolidWorks®. Des modélisations à l'échelle, de la soufflerie et des anémomètres, ont permis de se rendre compte des encombrements et de décider au mieux des dimensions du banc de test.

Pour avoir des mesures représentatives il faut également que le flux soit le plus laminaire possible. Le ventilateur est donc placé de telle sorte qu'il travaille en aspiration, ce qui occasionne moins de turbulences.

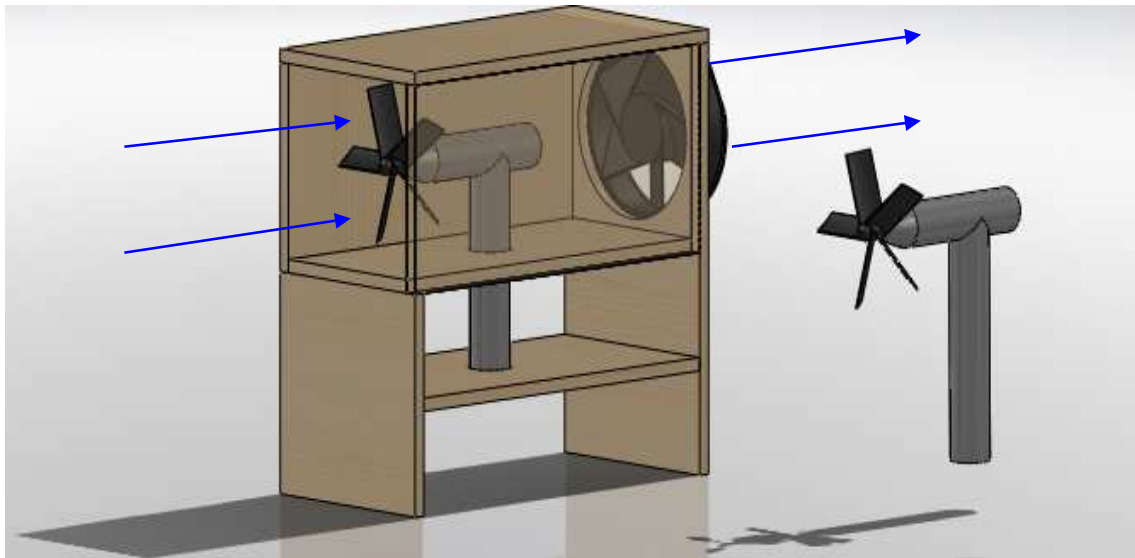


Figure 12 : Vue 3D de la soufflerie et de l'anémomètre Young 05103

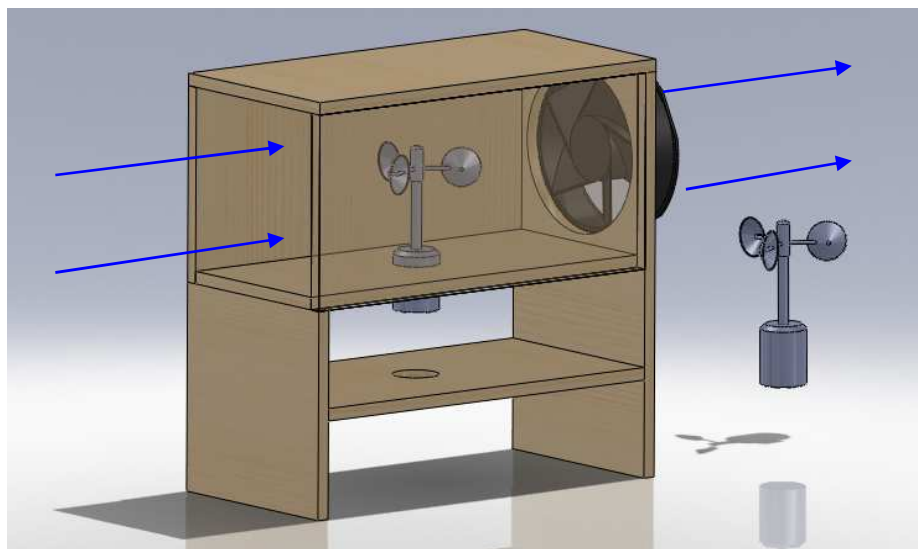


Figure 13 : Vue 3D de la soufflerie et de l'anémomètre Vector A100L2

Sens
d'écoulement
d'air dans la
soufflerie
→

Ces modèles 3D ont ensuite permis d'établir précisément les dimensions de la soufflerie et l'épaisseur de ses parois. Une mise en plan de l'assemblage de ces panneaux est jointe en annexe D (page 38). Ce document a servi à commander les sections de bois nécessaires à la fabrication de la soufflerie.

Un système pour régler la hauteur des anémomètres est intégré sur la structure en bois. La partie supérieure de la soufflerie est démontable afin de pouvoir interchanger facilement les anémomètres.

3.3 Calibration et validation de la soufflerie

Cette expérimentation vise à établir la relation entre la vitesse de rotation du ventilateur et la vitesse de vent mesurée par l'anémomètre à température ambiante. On sait que le débit fourni par le ventilateur est directement lié à la vitesse de rotation du rotor. Or $V_{\text{vent}} = \text{débit} / \text{section}$, notre section étant constante on peut prévoir que la vitesse de vent va être proportionnelle à la vitesse de rotation du ventilateur. La connaissance de cette relation pourra nous permettre d'avoir une référence de vitesse de vent dans nos essais en chambre froide.

Protocole de la calibration :

Un anémomètre 05103 de « Young » est placé dans la soufflerie et va nous servir de capteur de référence (illustration en annexe J page 44). Ce capteur neuf est calibré et accompagné d'un certificat d'étalonnage à température ambiante réalisé par le constructeur.

Nous utilisons la commande 0-5 V du ventilateur pour faire varier la vitesse de rotation du ventilateur de 900 à 6500 tr/min. Cette valeur est récupérée sur une entrée de comptage de la centrale d'acquisition CR1000. Dans un même temps, l'anémomètre réalise une mesure de vitesse de vent que l'on collecte sur la deuxième entrée de comptage. Un programme d'acquisition permettant à la centrale de faire ces mesures est présenté en annexe F (page 40), il est utilisé pour tous les tests avec l'anémomètre Young 05103.

On trace donc un graphique avec la vitesse de vent mesurée par l'anémomètre 05103 en fonction de la vitesse de rotation du ventilateur.

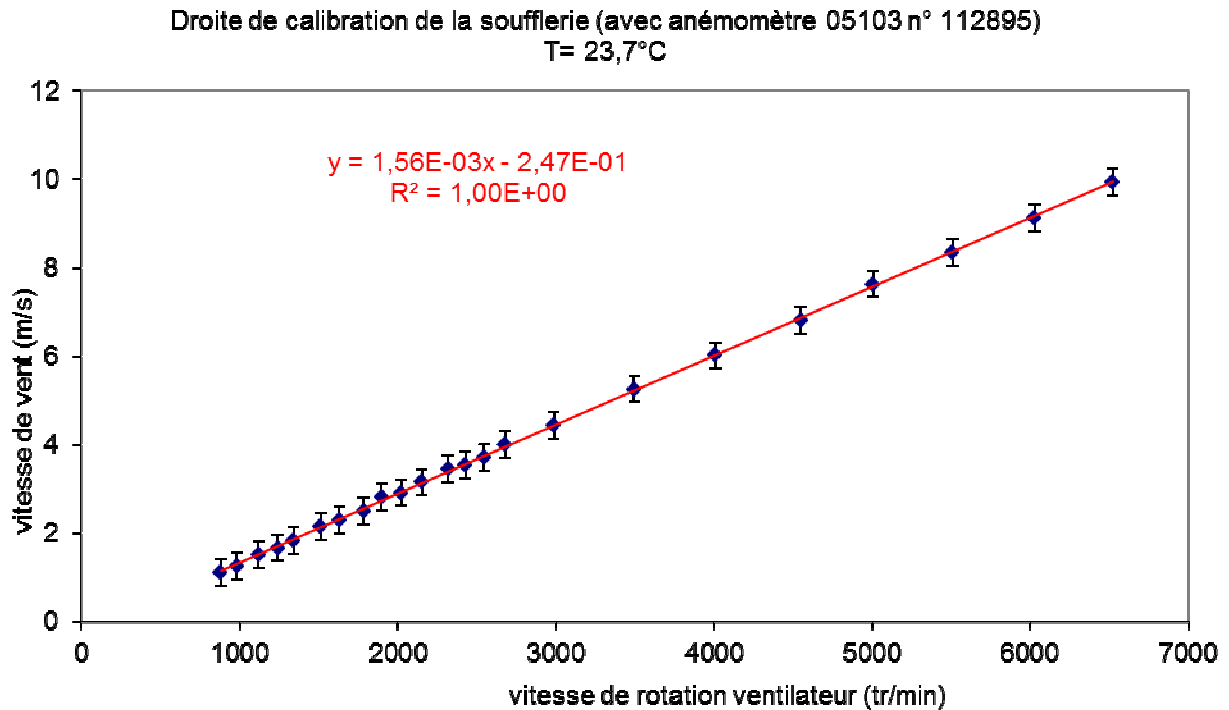


Figure 14 : courbe de calibration de la soufflerie avec un anémomètre Young 05103.

On a: $V_{\text{vent}} = 0,00156x V_{\text{rotation}} - 0,247 \quad \text{m.s}^{-1}$

Avec: $a = 0,00156 \pm 0,00001 \quad \text{m.min.tr}^{-1}.\text{s}^{-1}$

$b = -0,247 \pm 0,032 \quad \text{m.s}^{-1}$

On remarque que la courbe de la vitesse du vent en fonction de la vitesse de rotation du ventilateur est bien linéaire. La régression linéaire confirme cette observation avec un $R^2=1,00$. Les incertitudes $u(a)$ et $u(b)$ sont calculées avec la fonction Droitereg du tableur. Les barres d'erreurs correspondent à la précision de $\pm 0,3 \text{ m.s}^{-1}$ donnée par le constructeur et la droite passe bien à l'intérieur de chacun de ces intervalles

On peut expliquer la présence d'une ordonnée à l'origine car à très faible vitesse de rotation du ventilateur le flux d'air n'est pas assez élevé pour mettre en mouvement l'axe de l'anémomètre.

La soufflerie va être amenée à tester différents anémomètres. Il est donc important de savoir si le volume et la forme de l'anémomètre modifient la circulation d'air dans la soufflerie.

Pour ce faire, nous avons utilisé un autre anémomètre fonctionnant sur le principe des coupelles qui est également étalonné à température ambiante pour tracer une deuxième courbe de calibration (illustration en annexes K page 45 et L page 46).

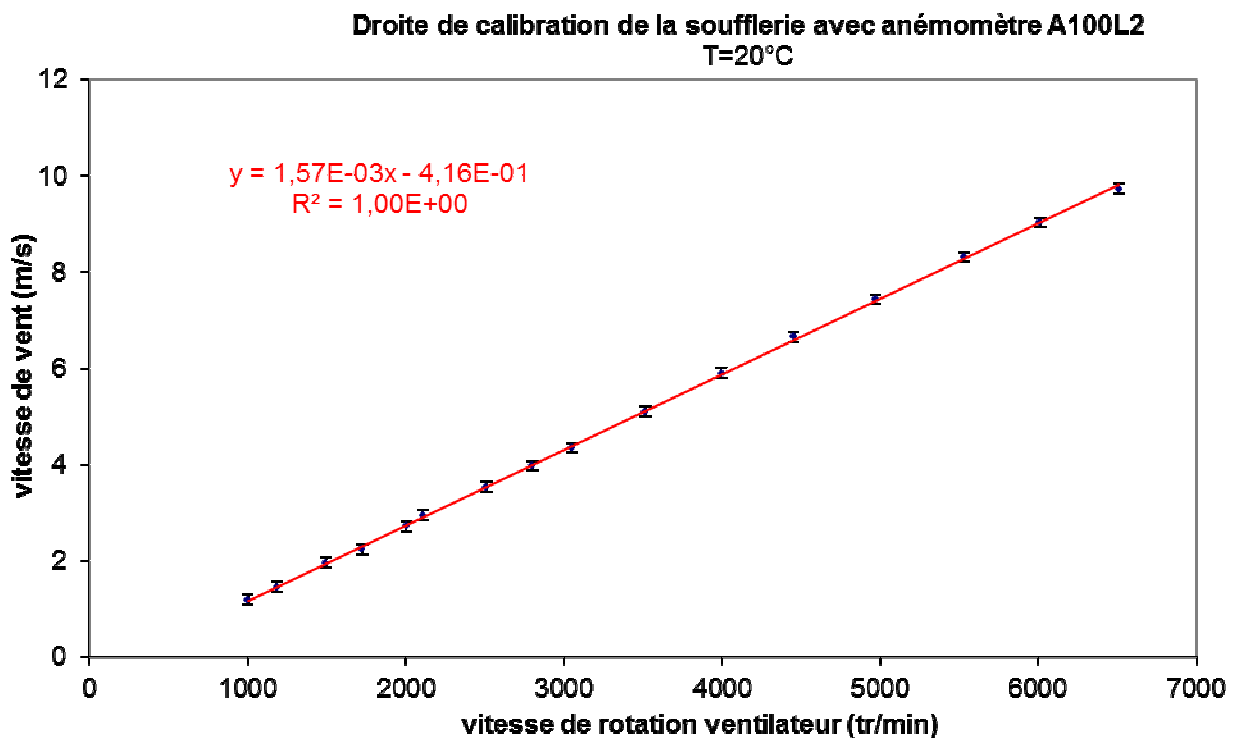


Figure 15 : courbe de calibration de la soufflerie avec un anémomètre A100L2

On retrouve le même type de droite que pour la calibration avec l'anémomètre 05103. L'écart sur la pente est inférieur à 1%, et comme pour le test précédent on voit que la courbe passe dans chacun des intervalles de $\pm 0,1$ m/s qui correspondent à la précision de l'A100L2.

La forme et le volume de l'anémomètre dans la chambre froide semblent donc ne pas avoir une influence sur la valeur de vitesse de vent dans le conduit et la calibration de la soufflerie est validée.

4. Etude d'un anémomètre

4.1 Problématique des roulements et recherches de solutions

L'anémomètre étudié est un anémomètre à hélice de la marque Young. Il peut donner une information sur la vitesse et sur la direction du vent.

L'étude se focalise sur cette deuxième information.



Figure 16 : anémomètre Young 05103



Figure 17 : tête du capteur et roulement à bille

Une étude effectuée en 2010 ainsi que des observations de terrain semblent montrer qu'à basse température (à partir de -50°C) l'anémomètre connaît des problèmes de mesures voir une détérioration très rapide de ses roulements à billes et de son axe. L'augmentation de la viscosité (de la graisse qui lubrifie les roulements) due à la baisse de température est probablement un des principaux paramètres qui est à l'origine du problème.

Pour le moment, une des méthodes utilisées est de dégraisser les roulements pour éviter qu'ils se figent. Cette méthode est en effet efficace à court terme car le problème de gel est évité mais sans lubrification, la durée de vie d'un roulement en métal est beaucoup moins importante.

Une partie du travail du stage a donc été de rechercher une alternative au lubrifiant initial et au dégraissage simple des roulements.

De nombreuses graisses synthétiques ont une plage de fonctionnement qui pourrait correspondre à notre étude cependant leur viscosité n'est pas linéaire sur notre domaine de température allant de 20 à -70°C .

Leur utilisation permettrait d'éviter le blocage de l'axe mais fausserait la valeur de vent mesurée. Les études de 2010 portaient sur ce sujet mais aucun lubrifiant ne c'est montré assez satisfaisant pour remplacer la graisse d'origine.

Une solution envisageable si le changement de graisse n'est pas validé est de remplacer les roulements actuels en métal par des roulements fonctionnant sans lubrification. Parmi ces roulements il existe des roulements fabriqués à base de céramique ou encore de polymère haute densité. Ces matériaux offrent peu de frottements et sont très résistants ce qui permet une utilisation des roulements sans lubrification. L'inconvénient majeur de cette méthode est que les roulements n'ont pas une dimension standard. Il faudrait donc faire les pièces sur mesure ce qui représente un coût élevé.

4.2 Etude en régime permanent d'un anémomètre 05103 en chambre froide.

Dans un premier temps nous avons cherché à retrouver le problème de blocage de l'anémomètre présent dans les précédentes études. Pour cela nous lui avons fait subir une descente en température à -70°C suivie d'un palier de 3h pour que l'anémomètre soit en équilibre thermique, puis une remontée à température ambiante. La vitesse de vent dans la soufflerie a été fixée à une valeur constante de $1,5\text{m/s}$.

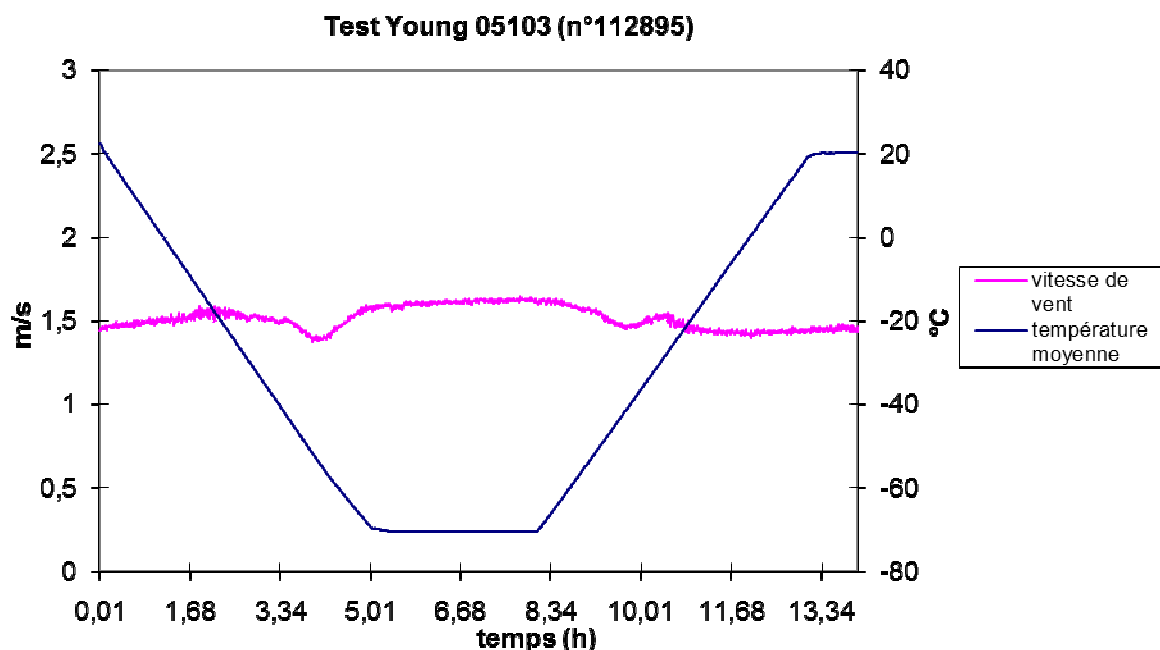


Figure 18 : test d'un anémomètre Young 05103 en chambre froide

Comme le montre le graphique ci-dessus, les tests de l'anémomètre en chambre froide ne mettent pas en évidence l'arrêt des pales.

On voit que la vitesse de vent reste dans une plage assez constante de $1,5\text{m/s}$ (vitesse programmée en début d'essai). On peut observer deux variations de la vitesse pendant la descente et la montée en température. Ces phénomènes s'expliquent par le fait que l'anémomètre subit des contraintes mécaniques (déformations, frottements) dues aux différences de dilatation thermique entre les matériaux (plastique et alliage par exemple). Plus la variation de température est forte plus ces différences de vitesses sont visibles. Cependant on voit qu'après stabilisation de la température, l'anémomètre retrouve un fonctionnement normal.

Pour confirmer cette observation, une courbe de vitesse de vent en fonction de la vitesse du ventilateur est tracée pour des températures allant de 20°C à -70°C par paliers de 10°C. De cette manière on peut voir si la relation entre ces deux paramètres reste identique avec le changement de température ou si il y a une influence.

Ces tests sont réalisés de la même manière que pour la calibration à température ambiante de la soufflerie (voir paragraphe 3.3) sauf que la soufflerie est placée ici dans la chambre froide. Pour prendre en compte cette différence confinement de la soufflerie et ventilation de la chambre froide) une courbe de calibration à température ambiante est nécessaire. L'ensemble des courbes correspondant à chaque palier de température est joint en annexe G, H et I (pages 41, 42 et 43).

Pour mieux interpréter une éventuelle évolution de la réponse de l'anémomètre en fonction de la température, un graphique des coefficients directeurs des courbes est tracé en fonction de la température.

Répartition des coefficients directeurs des droites de calibration en fonction de la température

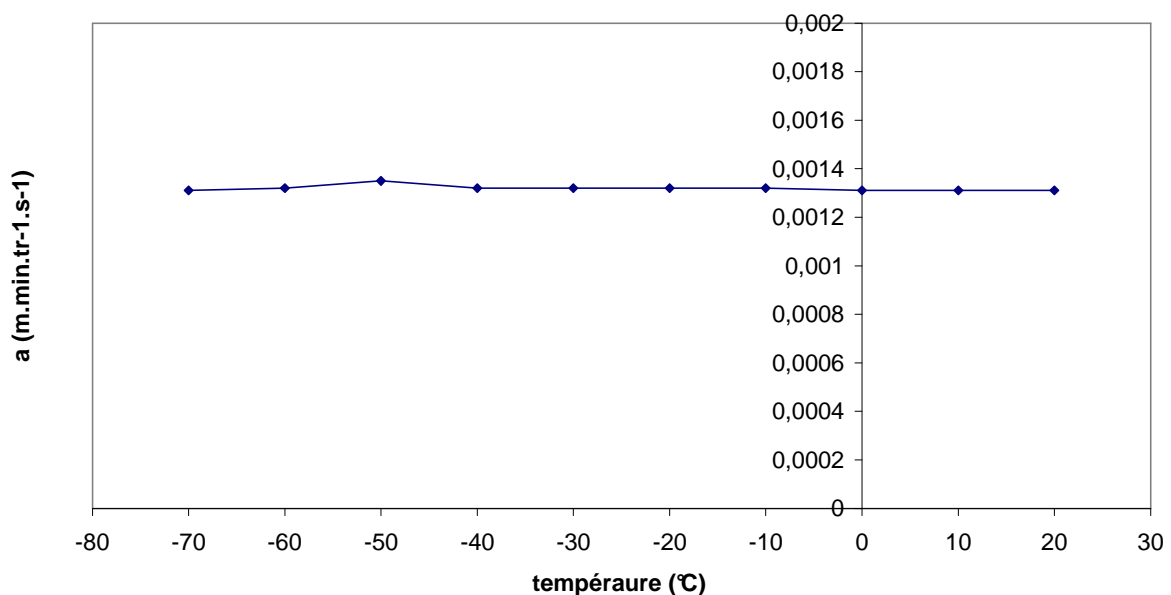


Figure 19 : évolution des pentes des droites de calibrations en fonction de la température.

On voit sur ce graphique que les coefficients directeurs sont constants et donc que la relation entre vitesse de rotation du ventilateur et vitesse de vent mesurée par l'anémomètre est constante.

4.3 Etude en régime transitoire d'un anémomètre 05103 en chambre froide

Il faut maintenant savoir si le capteur est capable de redémarrer après un blocage mécanique de l'hélice à basse température. Nous avons donc empêché la rotation de l'hélice pendant la descente en température de l'enceinte. Puis après avoir fixé une vitesse de vent théorique nous avons enlevé le blocage mécanique de l'hélice.

**Test Young 05103 (n° 112895): test de redémarrage pour une vitesse de vent théorique dans la soufflerie de 1,3m/s
déblocage t = 0 min**

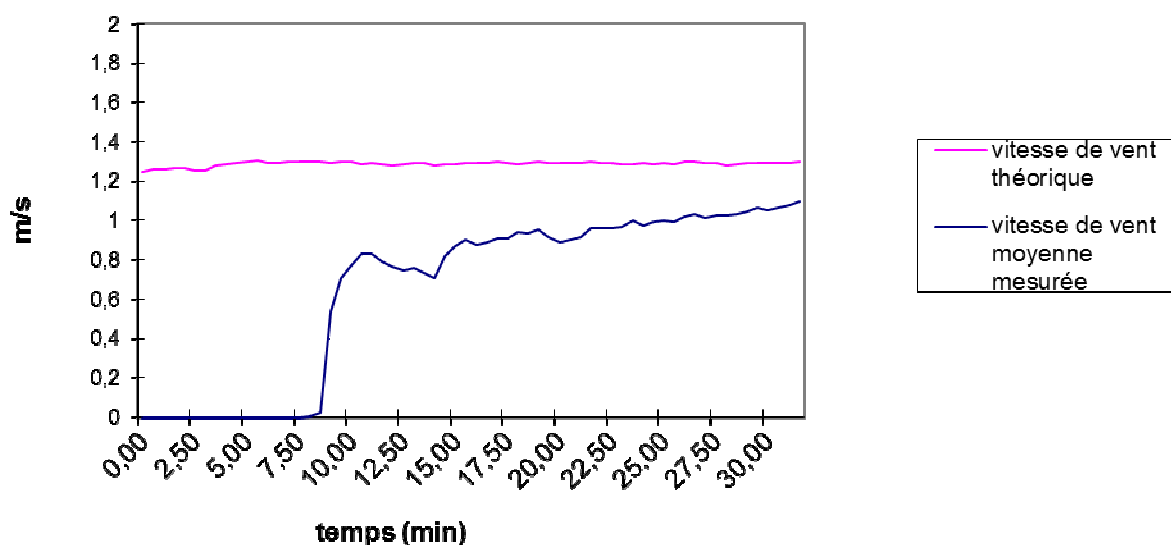


Figure 20 : test de redémarrage Young 05103 à 1,3 m/s

L'anémomètre ne redémarre pas immédiatement, à 3 minutes l'hélice met une quinzaine de secondes pour faire un tour. Le signal de vitesse de vent redevient mesurable à partir de 8 minutes pour revenir à une valeur de 1,1 m/s. Cette valeur est un peu inférieure à la vitesse théorique mais est comprise dans l'intervalle d'erreur de $\pm 0,3$ m/s du fabricant.

On peut se demander comment ce temps de démarrage évolue avec la vitesse de vent appliquée.

Test Young 05103 (n° 112895): test de redemarrage pour une vitesse de vent théorique dans la soufflerie de 4,3m/s
déblocage à t = 0 min

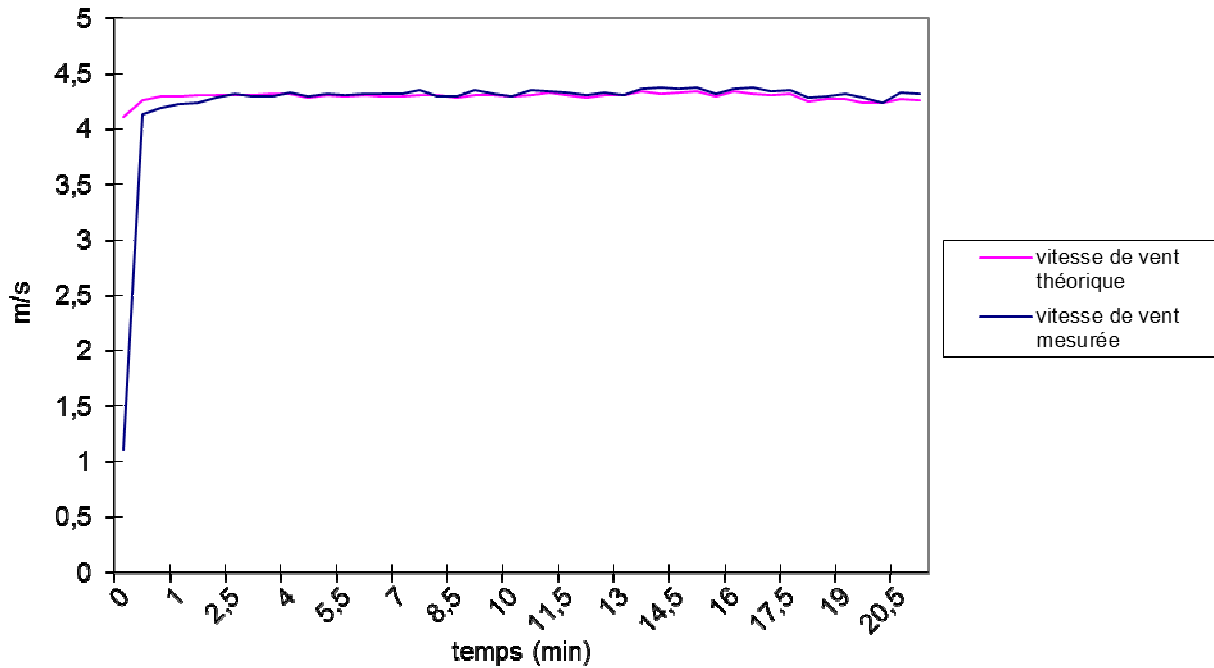


Figure 11 : test de redémarrage Young 05103 à 4,3 m/s

On voit qu'avec un flux d'air plus élevé, l'hélice de l'anémomètre se met à tourner en quelques secondes et la vitesse donnée par le capteur atteint rapidement la valeur théorique de 4,3 m/s.

Les tests réalisés sur l'anémomètre 05103 de Young ne mettent pas en évidence les mêmes résultats que l'étude menée en 2010. Son fonctionnement en régime permanent ne semble pas être influencé par la variation de température. L'étude du redémarrage de l'anémomètre montre qu'il est capable de redémarrer même à une vitesse de vent modérée. Il faudrait poursuivre ce type de test pour connaître la vitesse minimale de redémarrage à une température donnée.

5. Conclusion

5.1 Conclusion technique et perspectives

Les tests réalisés sur le thermo-hygromètre hmp155 chauffé ne permettent pas de mettre en évidence l'avantage qu'il représente par rapport aux capteurs de même type mais non chauffés. Il faudrait réaliser des tests dans une enceinte climatique ayant un contrôle en humidité relative pour comprendre les différences entre ces deux modèles de capteur.

La fourche optique Wenglor, elle, ne semble pas fonctionner à des températures inférieures à -20°C. De nouveaux tests sont à prévoir afin de comprendre le dysfonctionnement qui est probablement dû à la dérive en température de l'électronique.

Pour la soufflerie, le cahier des charges a été respecté et les tests ont pu être effectués. Le laboratoire dispose aujourd'hui d'un banc de test calibré avec un protocole défini pour réaliser des tests sur des anémomètres.

Les tests de l'anémomètre 05103 de Young ne sont pas en accord avec les tests des études précédentes. Il semble que l'anémomètre Young 05103 se comporte bien à basse température. Une demande est en cours pour savoir s'il y a une modification de sa fabrication par le constructeur.

Cependant le problème de blocage du capteur est probablement influencé par d'autres paramètres comme la formation de givre sur les pales et sur la structure. Des capteurs de vent fonctionnant avec des coupelles et munis d'un système de chauffage pourraient mieux réagir aux contraintes de températures et de dépôt de givre que les anémomètres à hélice. Des tests en chambre froide seraient à réaliser pour déterminer quel anémomètre est le plus adapté.

5.2 Bilan général

D'un point de vue plus général, cette expérience m'a permis de découvrir le domaine de la recherche et ses enjeux. J'ai maintenant un peu plus de connaissances sur l'Antarctique, et sur les études qui y sont menées.

Ce stage m'a fait évoluer dans ma perception de l'activité d'instrumentation. J'ai compris l'importance d'avoir des bases dans tous les domaines de la physique pour comprendre le fonctionnement des différents capteurs et les phénomènes qu'ils mesurent. La nécessité de pouvoir communiquer en anglais est également un point qui m'a marqué, notamment dans le cadre de demandes d'informations sur des composants ou plus simplement pour lire une documentation technique.

Enfin je peux dire que le travail réalisé durant le stage et l'échange avec les personnes travaillant au LGGE me confortent dans mon choix de poursuite d'études et mon projet professionnel.

Table des annexes.

<u>Annexe A : Programme d'acquisition pour test hmp155 chauffé</u>	pages 34/35
<u>Annexe B : Programme d'acquisition fourche optique Wenglor</u>	page 36
<u>Annexe C : Test Wenglor avec structure renforcée</u>	page 37
<u>Annexe D : Mise en plan de la soufflerie</u>	page 38
<u>Annexe E : Schéma de câblage de la soufflerie</u>	page 39
<u>Annexe F: Programme d'acquisition pour test anémomètre 05103</u>	page 40
<u>Annexe G: Courbes de calibrations de -70 à -50°C</u>	page 41
<u>Annexe H: Courbes de calibrations de -40 à -20°C</u>	page 42
<u>Annexe I: Courbes de calibrations de -10 à 20°C</u>	page 43
<u>Annexe J: Anémomètre 05103 dans la soufflerie</u>	page 44
<u>Annexe K: Anémomètre A100L2 dans la soufflerie</u>	page 45
<u>Annexe L: Test d' un anémomètre A100L2 en chambre froide</u>	page 46
<u>Annexe M : Documentation technique du ventilateur « S-force »</u>	page 47

Annexe A : Programme d'acquisition pour test hmp155 chauffé

'CR1000

'Created by Short Cut (2.5)

'Declare Variables and Units

Public Batt_Volt

Public AirTC1

Public RH1

Public AirTC2

Public RH2

Public AirTC3

Public RH3

Units Batt_Volt=Volts

Units AirTC1=Deg C

Units RH1=%

'Define Data Tables

DataTable(Table1,True,-1)

 DataInterval(0,1,Min,10)

 Average (1,AirTC1,FP2,False)

 Average (1,RH1,FP2,False)

 Average (1,AirTC2,FP2,False)

 Average (1,RH2,FP2,False)

 Average (1,AirTC3,FP2,False)

 Average (1,RH3,FP2,False)

EndTable

DataTable(Table2,True,-1)

 DataInterval(0,1440,Min,10)

 Minimum(1,Batt_Volt,FP2,False,False)

EndTable

'Main Program

BeginProg

 Scan(5,Sec,1,0)

 'Default Datalogger Battery Voltage measurement Batt_Volt:

 Battery(Batt_Volt)

 'HMP45C (6-wire) Temperature & Relative Humidity Sensor measurements

AirTC and RH:

```
VoltDiff (AirTC1,1,mv5000,2,True ,0,250,0.028,-80)
VoltDiff (RH1,1,mv5000,1,True ,0,250,0.02,0)
```

```
VoltDiff (AirTC2,1,mv5000,3,True ,0,250,0.14,-80)
VoltDiff (RH2,1,mv5000,4,True ,0,250,0.1,0)
```

```
VoltDiff (AirTC3,1,mv5000,5,True ,0,250,0.14,-80)
VoltDiff (RH3,1,mv5000,6,True ,0,250,0.1,0)
```

```
If RH1>100 AND RH1<108 Then RH1=100
If RH2>100 AND RH2<108 Then RH2=100
If RH3>100 AND RH3<108 Then RH3=100
```

```
'Call Data Tables and Store Data
```

```
CallTable(Table1)
CallTable(Table2)
```

```
NextScan
EndProg
```

Annexe B : Programme d'acquisition fourche optique Wenglor

```
'CR1000
'Created by Short Cut (2.5)

'Declare Variables and Units
Public Batt_Volt
Public Comptage
Public Tension
Public AirTC1

Units Batt_Volt=Volts
Units AirTC1= degre C
Units Tension=volt

'Define Data Tables
DataTable(Table1,True,-1)
    DataInterval(0,30,Sec,10)
    Sample(1,Comptage,FP2)
    Sample(1,Tension,FP2)
    Average (1,Comptage,FP2,False)
    Average (1,Tension,FP2,False)
    Totalize (1,Comptage,FP2,False)
    Average (1,AirTC1,FP2,False)
EndTable

DataTable(Table2,True,-1)
    DataInterval(0,1440,Min,10)
    Minimum(1,Batt_Volt,FP2,False,False)
EndTable

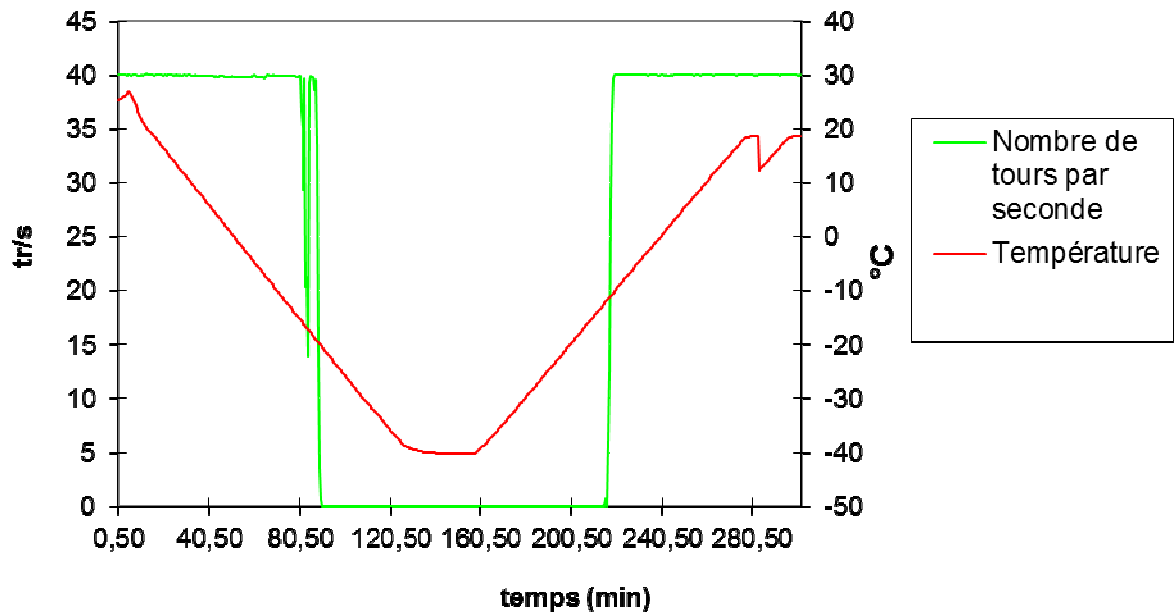
'Main Program
BeginProg
    Scan(1,Sec,1,0)
        'Default Datalogger Battery Voltage measurement Batt_Volt:
        Battery(Batt_Volt)
        'mesure Vrotation et tension alimenation ventilateur et Wspeed 0503
        PulseCount(Comptage,1,1,0,0,1,0)
        VoltSe (Tension,1,mv5000,1,1,0,250,1,0)
        VoltDiff (AirTC1,1,mv5000,2,True ,0,250,0.14,-80)

        'Call Data Tables and Store Data
        CallTable(Table1)
        CallTable(Table2)

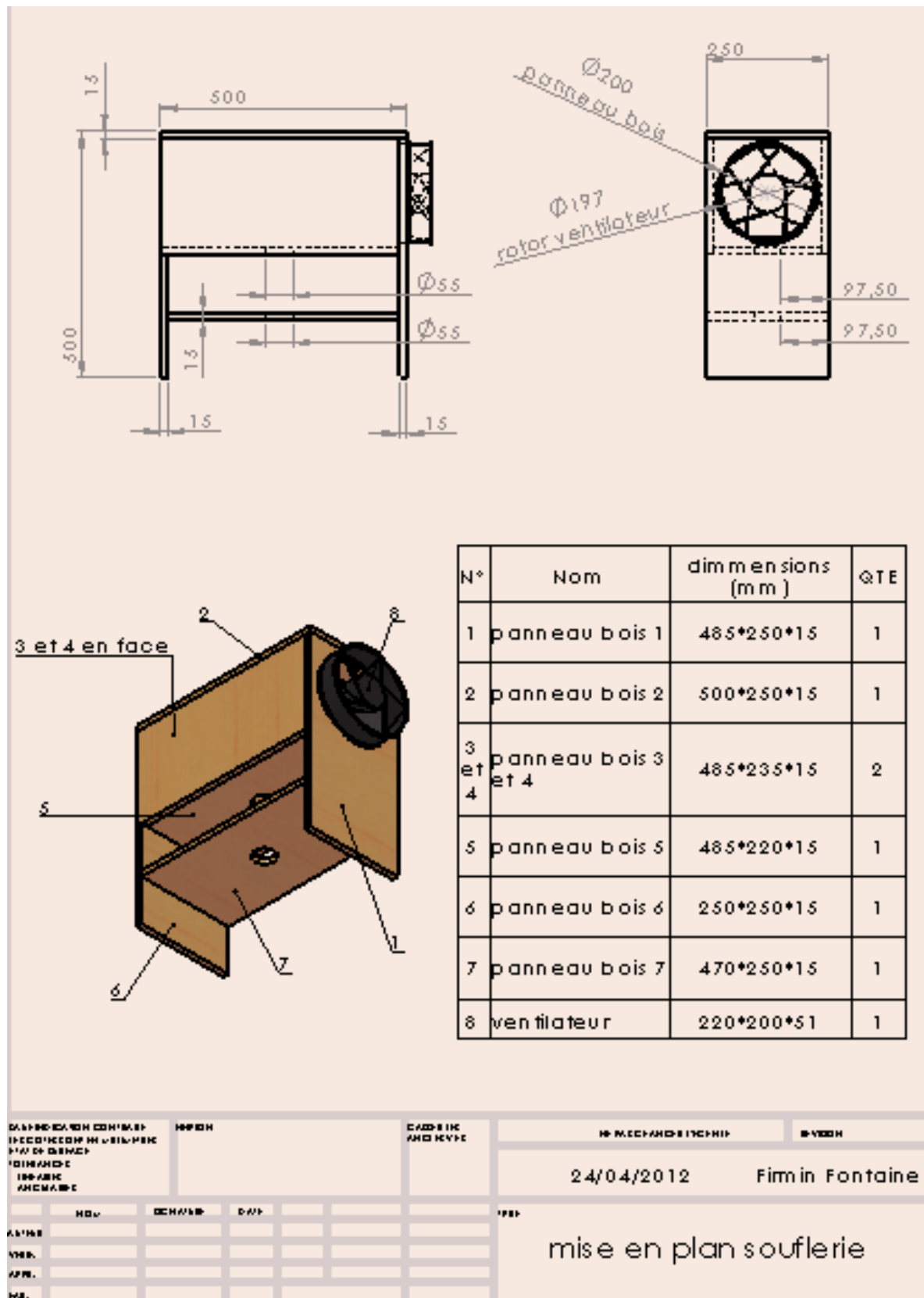
    NextSc
```

Annexe C : Test Wenglor avec structure renforcée

Test Wenglor (structure renforcée)

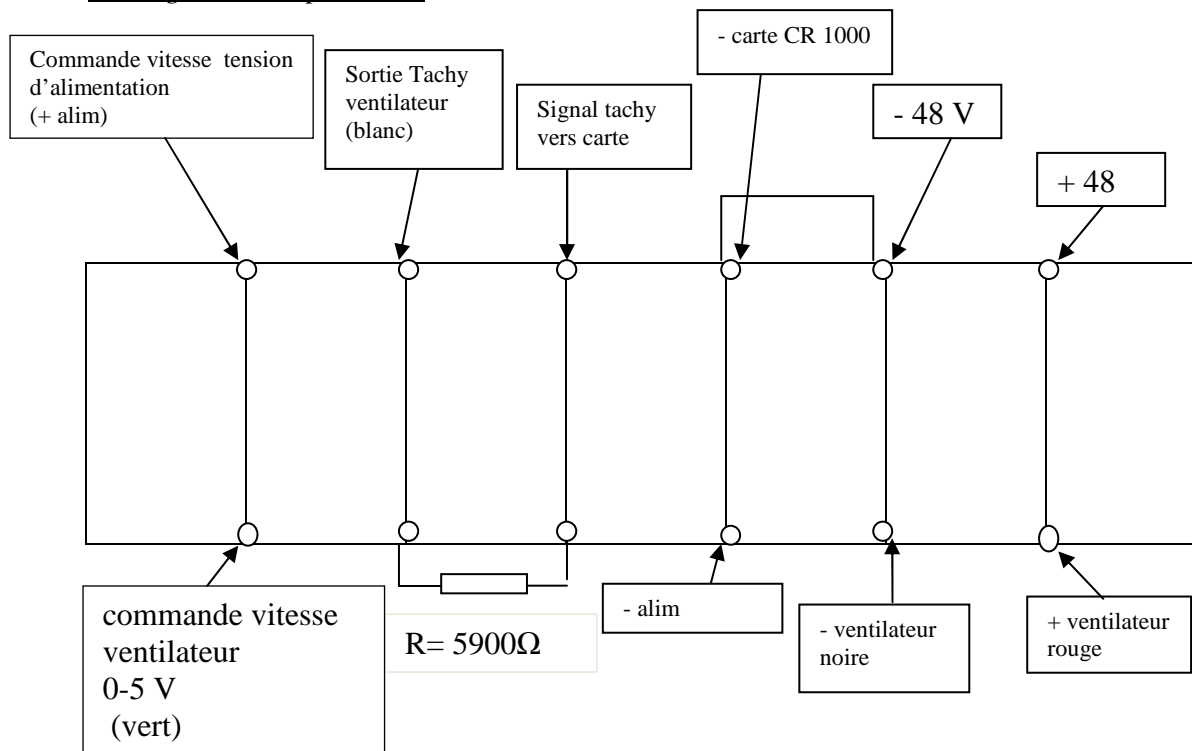


Annexe D : Mise en plan de la soufflerie



Annexe E : Schéma de câblage de la soufflerie

Câblage des composants :



Câblage sur la CR1000 (en communication IP)

Contrôle de la tension de commande de vitesse du ventilateur

Entrée unipolaire 1 : H > valeur de tension de l'alim

Capteur hmp155 3

Entrée différentielle 2 :
H > tension sortie AirTC (blanc)
L > tension référence (vert)

Anémomètre YOUNG 05103

Entrée pulse 2
P2 > signal tachy de l'anémomètre (rouge)
Masse > fil noir

Ventilateur

Entrée pulse 1 P1 > signal tachy du ventilateur (jaune)

Annexe F: Programme d'acquisition pour test anémomètre 05103

```
'CR1000
'Created by Short Cut (2.5)

'Declare Variables and Units
Public Batt_Volt
Public Vrota
Public Tension
Public WS_ms
Public AirT

Units AirT= degre
Units Batt_Volt=Volts
Units Vrota=trmin
Units Tension=volt
Units WS_ms=meterssecond

'Define Data Tables
DataTable(Table1,True,-1)
    DataInterval(0,30,Sec,10)
    Sample(1,Vrota,FP2)
    Sample(1,Tension,FP2)
    Sample(1,WS_ms,FP2)
    Average (1,Tension,FP2,False)
    Average (1,Vrota,FP2,False)
    Average (1,WS_ms,FP2,False)
    Totalize (1,Vrota,IEEE4,False)
    Totalize (1,WS_ms,FP2,False)
    Average (1,AirT,FP2,False)
EndTable

DataTable(Table2,True,-1)
    DataInterval(0,1440,Min,10)
    Minimum(1,Batt_Volt,FP2,False,False)
EndTable

'Main Program
BeginProg
    Scan(1,Sec,1,0)
        'Default Datalogger Battery Voltage measurement Batt_Volt
        Battery(Batt_Volt)
        'mesure Vrotation et tension alimention ventilateur et Wspeed 0503
        PulseCount(Vrota,1,1,0,0,10,0)
        VoltSe (Tension,1,mV5000,1,1,0,250,1.0,0)
        PulseCount(WS_ms,1,2,1,1,0.098,0)
        VoltDiff (AirT,1,mv5000,2,True,0,250,0.14,-80)

        'Call Data Tables and Store Data
        CallTable(Table1)
        CallTable(Table2)

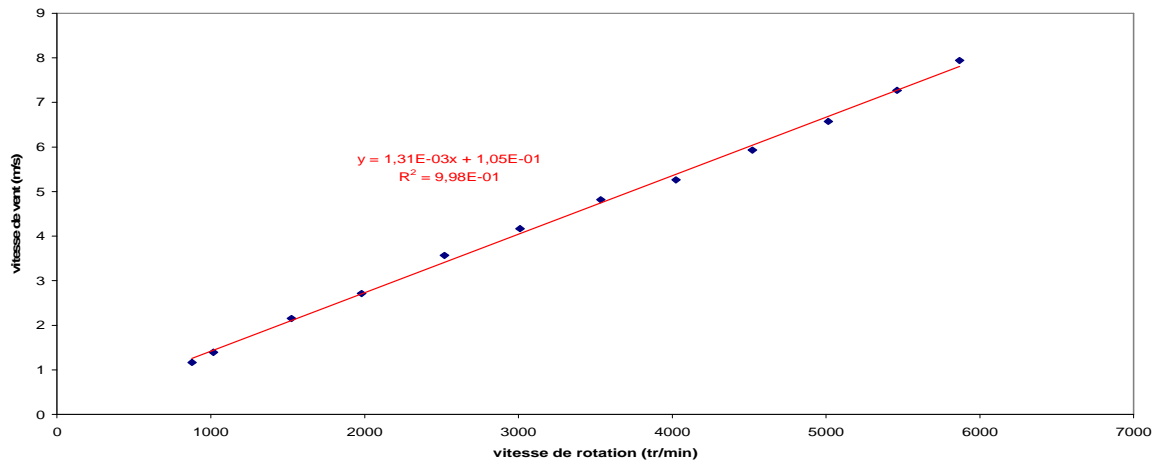
    NextScan

EndProg
```

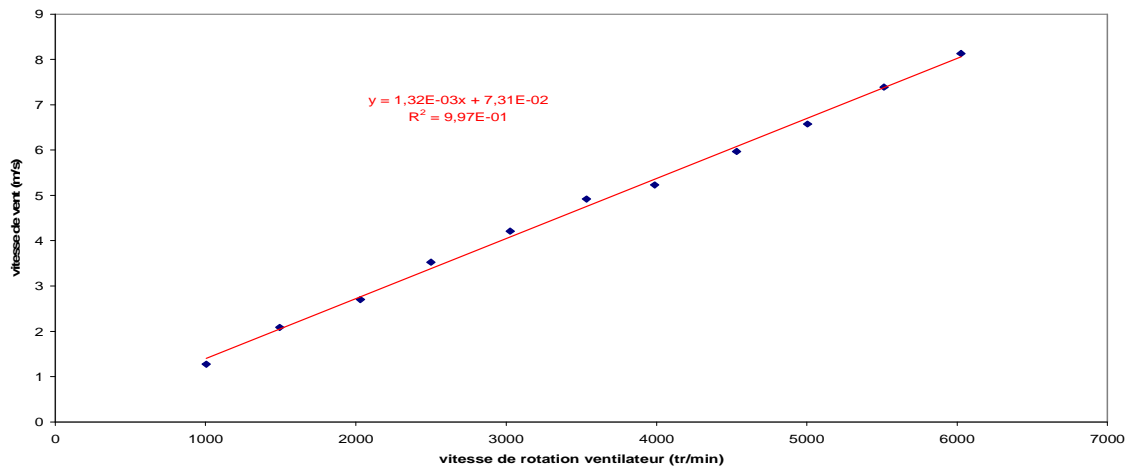

Annexe G: Courbes de calibrations de -70 à -50°C

Droite de calibration à t = -70°C

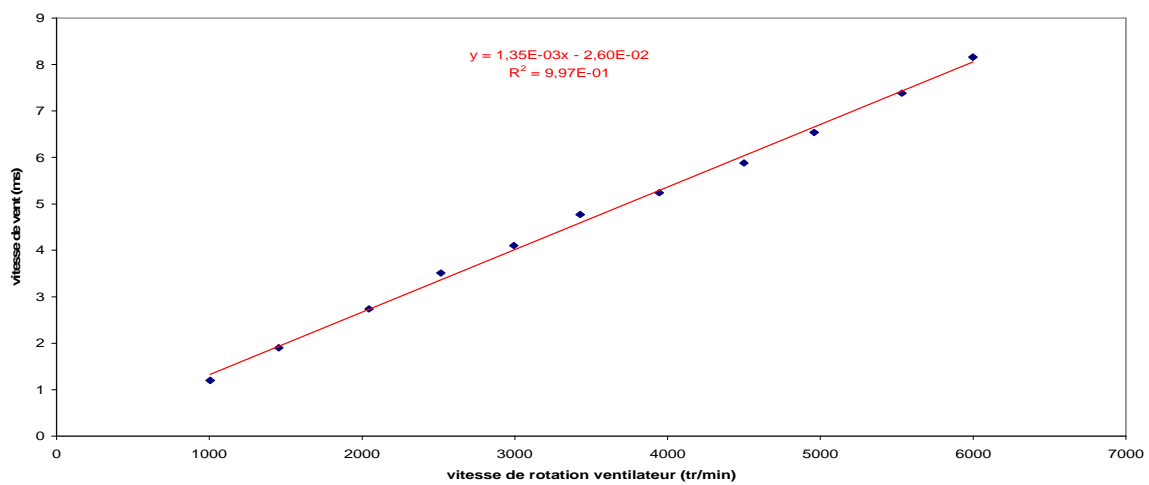
(valeur moyenne par intervalles de 20 secondes)



Droite de calibration à t = -60°C (valeur moyenne p par intervalle de 20 secondes)

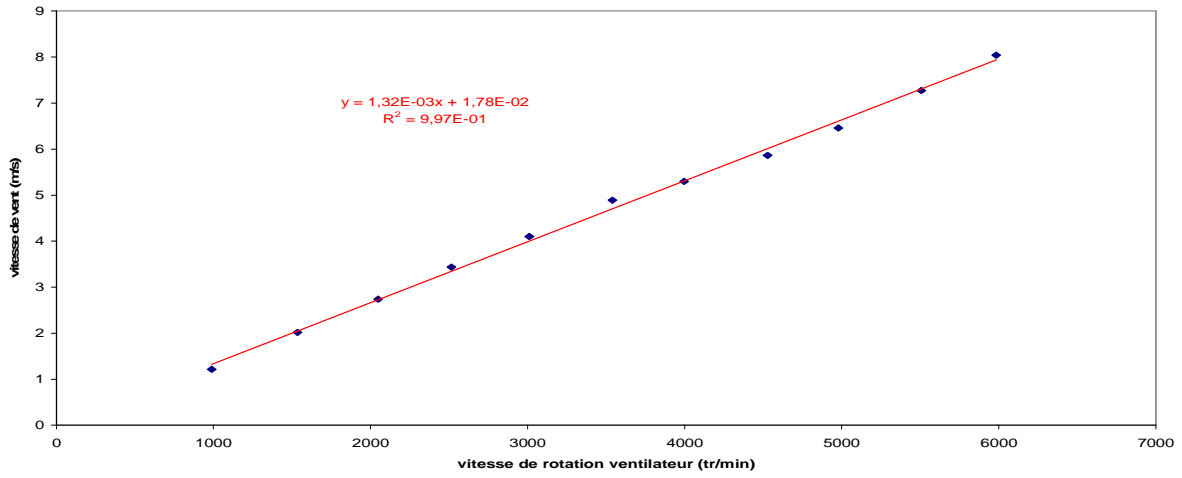


Droite de calibration à t = -50°C (valeur moyenne par intervalle de 20 secondes)

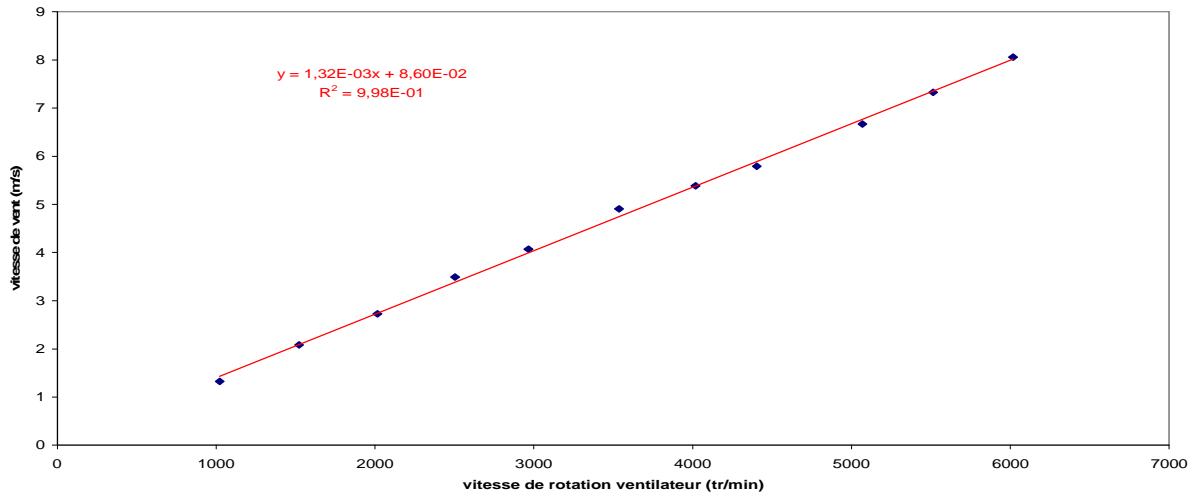


Annexe H: Courbes de calibrations de -40 à -20°C

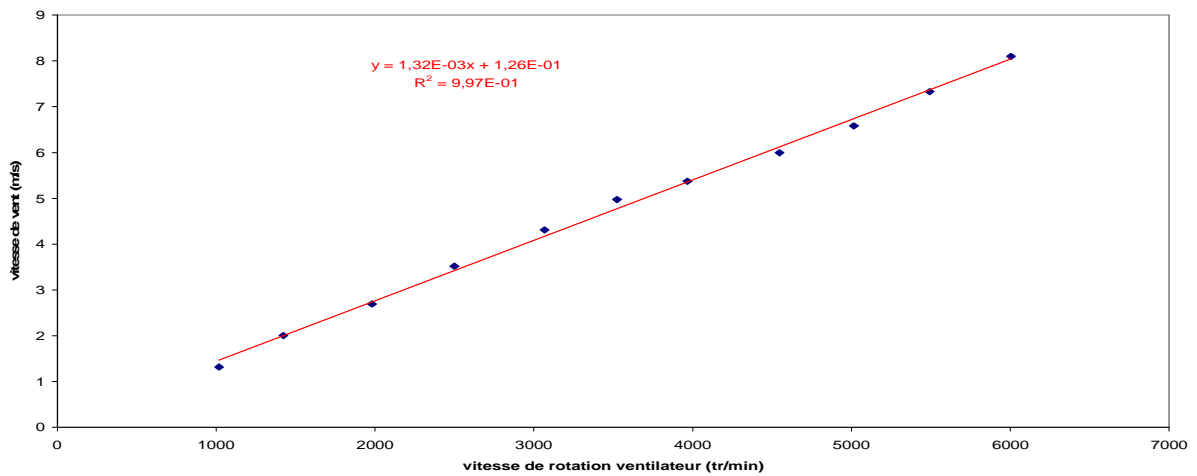
Droite de calibration à t = - 40°C (valeur moyenne par intervalle de 20 secondes)



Droite de calibration à t = - 30°C (valeur moyenne par intervalle de 20 secondes)

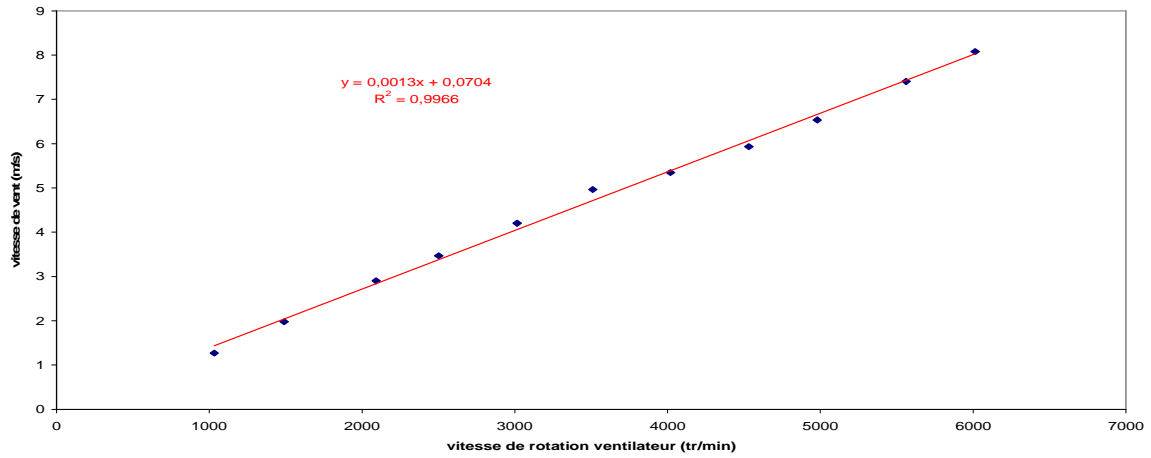


Droite de calibration à t = - 20°C (valeur moyenne par intervalle de 20 secondes)

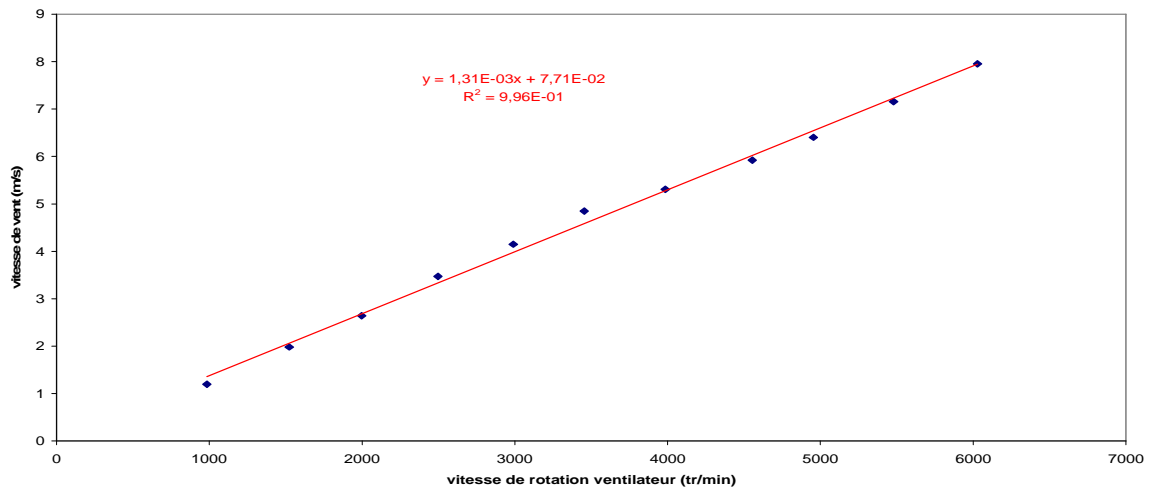


Annexe I : Courbes de calibrations de -10°C à 20°C

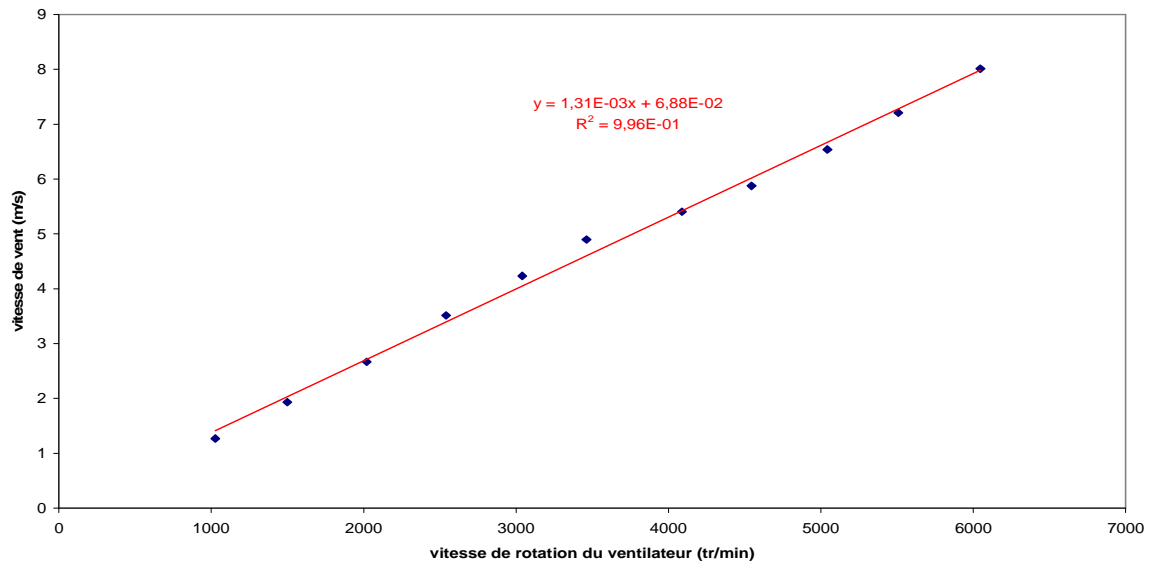
Droite de calibration à t = -10°C (valeur moyenne par intervalle de 20 secondes)



Droite de calibration à t = 10°C (valeur moyenne par intervalle de 20 secondes)



Droite de calibration à t = 20°C (valeur moyenne par intervalle de 20 secondes)



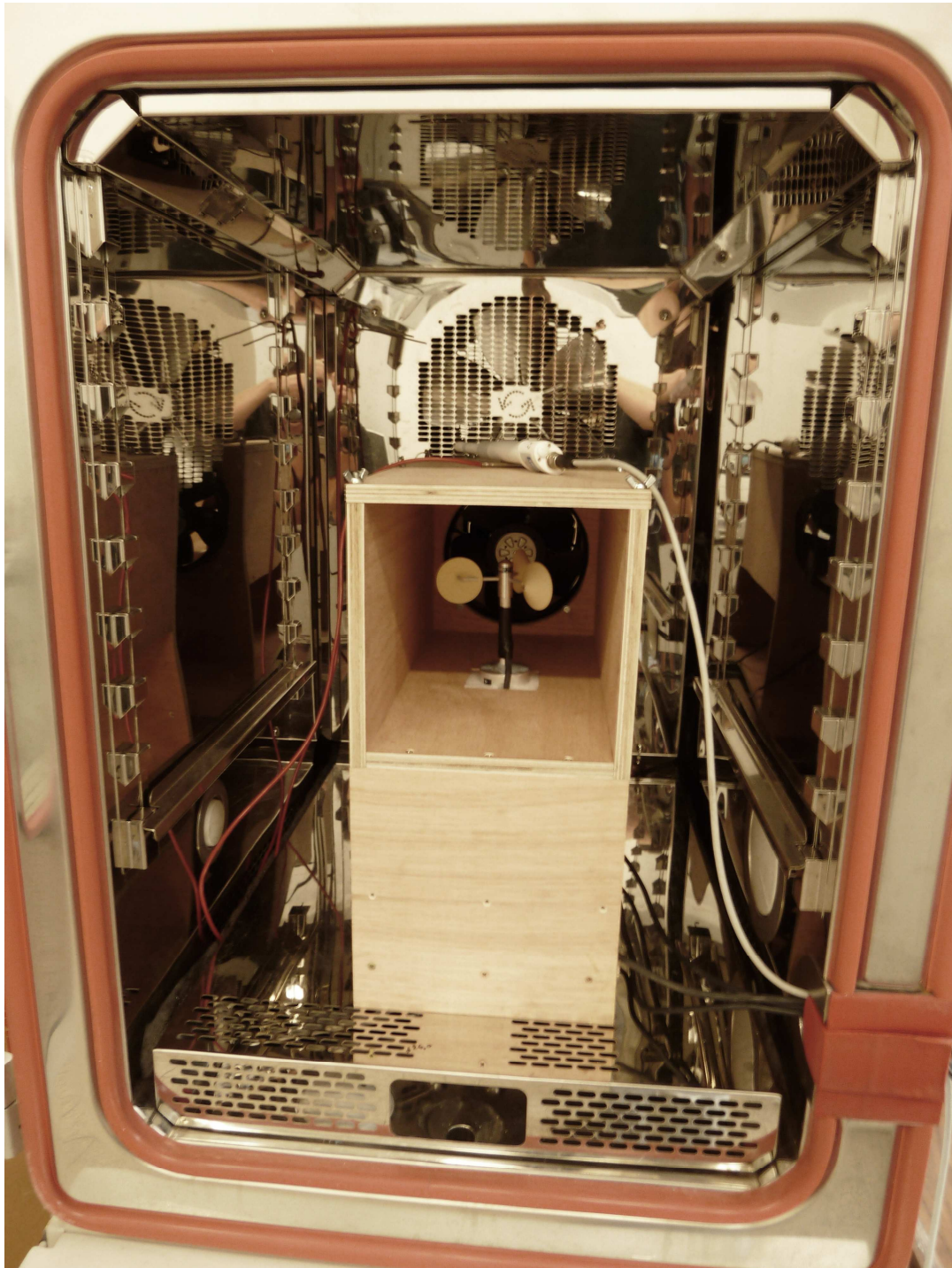
Annexe J: Anémomètre 05103 dans la soufflerie



Annexe K: Anémomètre A100L2 dans la soufflerie



Annexe L: Test d' un anémomètre A100L2 en chambre froide



Annexe M: Documentation technique du ventilateur "S-force"

max. 1220 m³/h

DC axial fans

Series 2200 FTD 220 x 200 x 51 mm



Highlights:

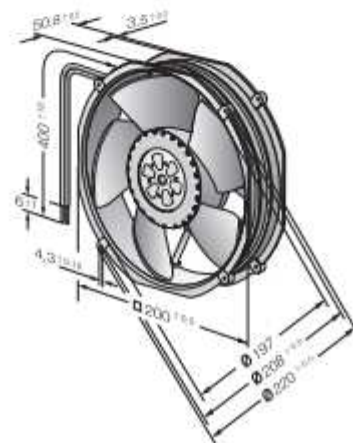
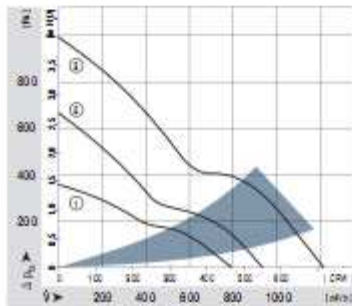
- High-performance 200 mm fan with compact overall height.
- Low operating noise level at high back pressure.
- 3-phase fan drive high degree of running smoothness and high efficiency.
- Standard with speed signal and PWM (P) or 0-10VDC / PWM (O) speed control.

General characteristics:

- Material: aluminium housing, fibreglass-reinforced PA Impeller; housing with grounding lug for screw M4 x 8.
- Electronic commutation fully integrated.
- Protected against reverse polarity and locking.
- Connection via single strands AWG 20, UL 1007 / AWG 22, UL 1061, bared and tin-plated.
- Air exhaust over struts. Direction of rotation counter-clockwise, seen on rotor.
- Mass: 1000 g.

Nominal data	Air flow		Nominal voltage		Sound pressure level		Sound power level	Solder: sleeve bearings Ball bearings	Power input	Nominal speed	Temperature range	Service life L ₁₀ (80 °C) dram-paket Standard	Service life L ₅₀ (100 °C) dram-paket Standard	Life expectancy L ₁₀ Δ (80 °C)	Curve	Specials
	m ³ /h	CFM	VDC	VDC	dB(A)	Bel(A)										
NEW 2214 F/2TDHO	790	464.7	24	16..30	62	7.1	■	35.0	4250	-25..+75	90 000 / 42 500	180 000	1	/2		
NEW 2214 F/2TDHO	940	552.9	24	16..36	66	7.4	■	35.0	5000	-25..+70	85 000 / 42 500	170 000	2	/2		
NEW 2218 F/2TDHO	790	464.7	48	36..57	62	7.1	■	48.0	4250	-25..+75	90 000 / 42 500	180 000	1	/2		
NEW 2218 F/2TDHO	940	552.9	48	36..72	66	7.4	■	48.0	5000	-25..+70	85 000 / 42 500	170 000	2	/2		
NEW 2218 F/2TDHAP	1220	717.8	48	36..72	72	8.2	■	103.0	6500	-20..+65	70 000 / 40 000	140 000	3	/2		

Speed control range from 1000 RPM up to maximum nominal speed. Stationary at 0 % PWM / 0 V,
Type O: stationary at sensor break; Type P: maximum speed at sensor break.



Dans le cadre de ses recherches scientifiques le Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement (LGGE) met en place des stations météorologiques en Antarctique.

Ce continent est régi par des conditions climatiques particulières, froid extrême, vent fort. De ce fait les capteurs utilisés pour mesurer ces paramètres subissent de fortes contraintes qui altèrent leur fonctionnement et l'objectif de ce stage est de tester ces capteurs en chambre froide pour être dans des conditions proches de la réalité.

La mise en fonctionnement et le test de deux capteurs, un thermo-hygromètre et une fourche optique, est la première partie du travail réalisé pendant le stage.

Une soufflerie a également été conçue pour simuler un flux d'air dans une chambre froide. Ce banc de test permet d'étudier la réponse d'anémomètres et de la comparer à une valeur de référence.

L'étude d'un anémomètre à hélice est réalisée dans cette soufflerie pour comprendre les problèmes qu'il rencontre à partir de -40°C et tenter d'améliorer la mesure du vent en Antarctique.

Mots clés: *instrumentation, capteurs météorologiques, soufflerie, Antarctique*