



AER1110 – PROJET INITIAL EN GÉNIE AÉROSPATIAL

RAPPORT DE L'ÉTUDE DE CAS N° 3

Conception et réalisation du sous-système « Génération d'un flux d'air » d'une soufflerie artisanale éducative

par

Maxime Goulet-Bourdon

Philippe Gagnier

Renaud Genest

Zineb Imanssar

Sébastien Lagassé

Laurier Lambert

Jean-Philippe Roy

Équipe 02

et présenté à

M. Jean-Paul Lemarquis, ing.

et

M. Patrice Rémy, ing.

Le 8 avril 2014

à Montréal

RÉSUMÉ

La conception d'un nouveau produit est un processus comportant plusieurs étapes importantes. On commence par la définition des besoins du client et des caractéristiques du produit, pour ensuite sélectionner des solutions potentielles et, enfin, développer une solution finale adoptée par l'équipe de développement. Le rapport technique qu'est l'étude de cas n° 3 fait l'analyse détaillée de la configuration finale de la soufflerie, dans une optique de recherche précise : la génération d'un flux d'air et la mesure des caractéristiques de l'écoulement d'air.

La première étape consiste à énumérer les requis conceptuels et techniques de la soufflerie. Les hypothèses et les suppositions initiales sont établies à ce stade. Elle inclut aussi la recherche des données techniques sur les matériaux utilisés, la quincaillerie et tout ce qui est susceptible d'être utilisé pour le produit final. Les deuxième et troisième étapes forment l'analyse du concept. La deuxième étape consiste en l'analyse des efforts externes appliqués sur la soufflerie, tandis que la troisième étape consiste en l'analyse des efforts internes (résistance des matériaux). Ces calculs assurent que la solution choisie est réalisable. La dernière phase est la conception et la réalisation de la soufflerie. Le sous-système de la génération du flux d'air, ainsi que le système de mesures, sont discutés. Les conséquences des choix de conception et les répercussions sur l'ensemble de la soufflerie sont analysées. Ensuite, les pièces sont modélisées sur CATIA et les dessins d'ingénierie sont faits avec dimensions et tolérances finales. Enfin, le prototype est fabriqué et des essais sont réalisés.

En somme, pour la soufflerie, le système de génération du flux d'air consiste en un ensemble de moteur d'aéromodélisme avec contrôleur de vitesse couplé à une tuyère qui accélère l'air vers la veine d'essai. Un redresseur, qui transforme l'écoulement d'air hélicoïdal généré par l'hélice du moteur en écoulement laminaire, est fabriqué avec des panneaux de *Coroplast* et est assemblé avec la tuyère. La tuyère, quant à elle, est fabriquée avec une structure de MDF et des panneaux de *Coroplast*. Pour ce qui est du système de mesures des caractéristiques de l'écoulement d'air, un manomètre artisanal est fabriqué à l'aide d'un tube flexible transparent et d'un support en MDF. Il est fixé à la sortie de la veine d'essai. Une machine à fumée peut aussi être utilisée en option pour représenter l'écoulement d'air autour du profil d'aile dans la veine d'essai. Un tube flexible est placé devant le profil d'aile et est connecté à la machine à fumée.

MOTS-CLÉS : *Génération d'un flux d'air, conception, hypothèses, données techniques, matériaux, efforts externes et internes, dessins techniques*

ABSTRACT

Conceiving a new product is a process that contains multiple important steps. It begins with the definition of customers' needs and product characteristics, to then select a few possible solutions and, finally, to develop a solution adopted by the development team. This third case study contains a detailed analysis of the wind tunnel's final configuration, while focusing on two specific subjects: airflow generation and airflow characteristics measurement.

The first step is to list and analyze the conceptual and technical requirements for the wind tunnel. Initial hypotheses and assumptions are given at this stage of the case study. It also includes research on technical data about the materials and every other thing used in the wind tunnel. The second and third steps are the concept's analysis. The second stage consist of the analysis of the external forces applied to the structure, while the third stage contains the analysis of the internal forces in the structure's materials. The last step is the conception and the execution of the wind tunnel. The airflow generation sub-system and the airflow characteristics measurements sub-system are discussed. The consequences and repercussions of conception choices on other systems in the wind tunnel are analyzed. The parts are then modeled in CATIA and engineering drawings are made, with final dimensions and tolerances. Finally, the prototype is built and tests are done.

For our wind tunnel, the airflow generation sub-system is a set of model aircraft engine with a speed control circuit, coupled to a nozzle that accelerates the air towards the test section. A rectifier, which transforms the helical airflow generated by the propeller in a laminar airflow, is made with *Coroplast* panels and is assembled with the nozzle. The nozzle is made of a MDF structure with *Coroplast* panels. For the airflow characteristics measurement sub-system, a homemade manometer is built with a flexible, transparent tube buckled to a support made of MDF. It is fixed at the test section's exit. A smoke machine can optionally be used to represent the airflow around the airfoil in the test section. A flexible tube is fixed in front of the airfoil and is connected to the smoke machine.

KEY WORDS: *Airflow generation, conception, assumptions, technical data, materials, external/internal forces, engineering drawings*

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX	XI
LISTE DES FIGURES.....	XIII
REMERCIEMENTS.....	XV
Introduction	1
Chapitre 1 Requis conceptuels et techniques	3
1.1 Concept proposé à l'étude de cas précédente.....	3
1.2 Description du concept final	4
1.3 Hypothèses et suppositions de départ.....	7
Chapitre 2 Analyse du concept	9
2.1 Efforts Externes.....	9
2.1.1 Hypothèses initiales et justifications.....	9
2.1.2 Descriptions des charges et diagrammes de corps libres	10
2.1.3 Calculs (formules, résultats, graphiques et interprétations) :	11
2.1.4 Analyse	12
2.2 Efforts internes.....	13
2.2.1 Hypothèses initiales et justifications.....	13
2.2.2 Descriptions des charges et diagrammes de corps libres	14
2.2.3 Calculs (formules, résultats, graphiques et interprétations)	15
2.2.4 Analyse	16
Chapitre 3 Réalisation de la soufflerie.....	17
3.1 Système de génération d'un flux d'air.....	17
3.1.1 Choix de conception	17
3.1.2 Description de l'ensemble de moteur d'aéromodélisme	18
3.1.3 Calcul du dimensionnement de la tuyère et de la veine d'essai	19
3.1.4 Répercussions du choix de concept	21
3.1.5 Dessins de détail et d'assemblage	22
3.2 Système de mesure des caractéristiques de l'écoulement d'air	22
3.2.1 Choix de conception	23
3.2.2 Dimensionnement.....	23
3.2.3 Calcul de la hauteur de colonne d'eau.....	24
3.2.4 Répercussions du choix de concept	25

3.2.5	Dessins de détail et d'assemblage	26
	Références	26
Chapitre 4 Fabrication et essais.....		27
4.1	Essais sur les moteurs	27
4.2	fabrication du système de génération d'un flux d'air	28
4.2.1	Redresseur	28
4.2.2	Tuyère	28
4.2.3	Moteur.....	29
4.3	fabrication du système de mesure	30
4.3.1	Support en MDF	30
4.3.2	Tube flexible en U	30
4.3.3	Assemblage du système de mesure.....	30
4.3.4	Sensibilité du système de mesure	31
4.4	Interfaçage avec les autres sous-systèmes	32
4.4.1	Système de génération d'un flux d'air	32
4.4.2	Système de mesure	32
4.5	Essais sur la soufflerie assemblée	33
	Références	33
Chapitre 5 Tableau synthèse.....		35
Conclusion		37
ANNEXE A – FACTURE		39
ANNEXE B – TESTS SUR UN PROFIL D'AILE DE PRATIQUE ET UN CARRÉ STYROMOUSSE		41
ANNEXE C – ESSAIS SUR LE VENTILATEUR INDUSTRIEL 24 PO.....		43
ANNEXE D – ANALYSE GRAPHIQUE DE Δh		45
ANNEXE E – CALCUL DU NOMBRE DE PAILLES POUR LE REDRESSEUR		49
ANNEXE F – PROGRAMME MATLAB D'ÉTUDE DE LA VITESSE DANS LA VEINE D'ESSAI.....		51
ANNEXE G – RENCONTRE AVEC ÉRIC MORISSETTE (2014-03-20).....		53
ANNEXE H – DESSINS D'INGÉNIERIE		57
ANNEXE I – GAMMES DE FABRICATION ET D'ASSEMBLAGE.....		87

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1. Densités massiques des matériaux utilisés	7
Tableau 3.1. Pièces de l'ensemble de moteur d'aéromodélisme.....	18
Tableau 5.1. Synthèse des pièces et des assemblages de la génération d'un flux d'air.....	35

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1. Croquis de la solution proposée à l'étude de cas n° 2	3
Figure 1.2. Esquisse de la solution finale	5
Figure 2.1. Centre de masse.....	10
Figure 2.2. DCL de la tuyère	11
Figure 2.3. Croquis de la section GFA.....	12
Figure 2.4. DCLs et Croquis des forces sur le support moteur.....	14
Figure 2.5. Concentration de contraintes.....	16
Figure 3.1. Circuit de l'ensemble d'aéromodélisme	19
Figure 3.2. Vitesse de l'écoulement d'air selon la largeur de la veine d'essai	20
Figure 3.3. Croquis de concept du manomètre	22
Figure 4.1. Pièce GFA-01-01.....	28
Figure 4.2. Sous-assemblage GFA-01 final.....	28
Figure 4.4. Sous-assemblage GFA-02 final.....	29
Figure 4.3. Boulonnage des longerons GFA-02-03	29
Figure 4.6. Sous-assemblage GFA-03 final.....	30
Figure 4.5. Pièce GFA-03-01 Support moteur.....	30
Graphique D.1 – Δh en fonction de v (petites valeurs de v).....	46
Graphique D.2 – Δh en fonction de v (grandes valeurs de v).....	47

REMERCIEMENTS

De nombreuses personnes ont aidés à leur manière à la réalisation de ce projet. Il aurait été beaucoup plus difficile de le faire sans leurs conseils et support, et nous les en remercions grandement. Des remerciements sont donc de rigueur envers ces personnes :

Jean-Paul Lemarquis et Patrice Remy - Bombardier aéronautique et Pratt & Whitney Canada

Ces professeurs nous ont guidés à travers le projet, facilitant ainsi la tâche de compréhension des critères. Ils nous ont aussi permis de développer notre débrouillardise et notre capacité d'adaptation en nous plaçant dans un contexte d'entreprise reproduisant ce qui se fait dans le monde de l'ingénierie.

Éric Morissette- Conseil de développement pédagogique

Sa demande a permis l'initiation du projet, et son dévouement pour les écoles est remarquable. Ses conseils et ses clarifications nous ont été d'une aide précieuse pour la conception de la soufflerie.

Josianne Duhamel, Chantal Dugas et Chafai Miftah - École Secondaire Mgr.-Parent

La visite qu'ils nous ont permis de faire des locaux de leur école nous a permis de mieux comprendre comment se déroulerait la fabrication de la soufflerie dans différentes écoles. Les réponses qu'ils nous ont données concernant les budgets disponibles, les utilisations possibles de la soufflerie et le fonctionnement général de l'école nous ont beaucoup aidés à comprendre le contexte d'utilisation future de la soufflerie.

Dominique Mercier, Papa Diallo, M. Chemrouk - École secondaire Antoine-Brossard

La rencontre de ces enseignants nous a beaucoup aidés à comprendre les programmes de sciences et technologies de secondaire 4 et 5, et nous a permis de prendre contact avec les enseignants de Mgr.-Parent.

INTRODUCTION

Une soufflerie est un système à grande échelle servant à tester les performances aérodynamiques d'un aéronef. Cependant, il est possible de transposer une soufflerie à petite échelle pour l'enseignement des principes physiques et aérodynamiques au secondaire. Lors de l'étude de cas précédente, plusieurs solutions de soufflerie ont été imaginées pour répondre aux besoins des clients, et une solution potentielle a été proposée.

Dans la présente étude de cas, il s'agit de compléter la conception de la soufflerie, plus précisément la conception des systèmes de génération d'un flux d'air et de mesure des caractéristiques de l'écoulement d'air. Cela comporte la recherche des données techniques des composantes utilisées dans la soufflerie, les suppositions et les choix de conception, les calculs ainsi que l'analyse de toutes les composantes de la soufflerie. Cette dernière étape s'accompagne aussi des justifications des choix de design ainsi que des dessins d'ingénierie des sous-systèmes constituant la soufflerie.

L'objectif ultime de la conception est d'arriver à un produit final, fabriqué et testé par l'équipe de conception et répondant aux besoins du client. Au cours de l'analyse des requis conceptuels et techniques, les hypothèses initiales sur les matériaux, les forces, l'écoulement d'air et les autres points importants de la soufflerie sont imposées. Les données techniques sont ensuite recherchées et interprétées. Une analyse des efforts externes et internes de la structure est effectuée et, au terme de cette analyse, des choix de conception sont faits pour les systèmes de génération d'un flux d'air et de mesure des caractéristiques de l'écoulement d'air. Les calculs associés à ces systèmes sont faits et les choix de conception sont ainsi justifiés. Suite à une discussion sur les répercussions de nos systèmes sur les autres systèmes de la soufflerie, on arrive aux dessins d'ingénierie des deux systèmes. Enfin, la fabrication de la soufflerie est décrite et les tests effectués sont présentés. Le rapport se termine avec un tableau synthèse des pièces et du produit final.

Chapitre 1

REQUIS CONCEPTUELS ET TECHNIQUES

Dans ce chapitre, le concept sélectionné à l'étude de cas précédente est d'abord discuté. Les modifications qui y ont été apportées sont présentées et expliquées, et le concept final adopté par l'équipe est décrit plus précisément par rapport aux systèmes de génération d'un flux d'air et de mesure des caractéristiques de l'écoulement d'air. Enfin, les hypothèses et les suppositions émises initialement pour la réalisation de ces deux systèmes sont énumérées.

1.1 CONCEPT PROPOSÉ À L'ÉTUDE DE CAS PRÉCÉDENTE

Lors de l'étude de cas précédente, une solution pour les systèmes de génération d'un flux d'air et de mesure des caractéristiques de l'écoulement d'air a été proposée. La Figure 1.1 suivante est une esquisse de ce concept.

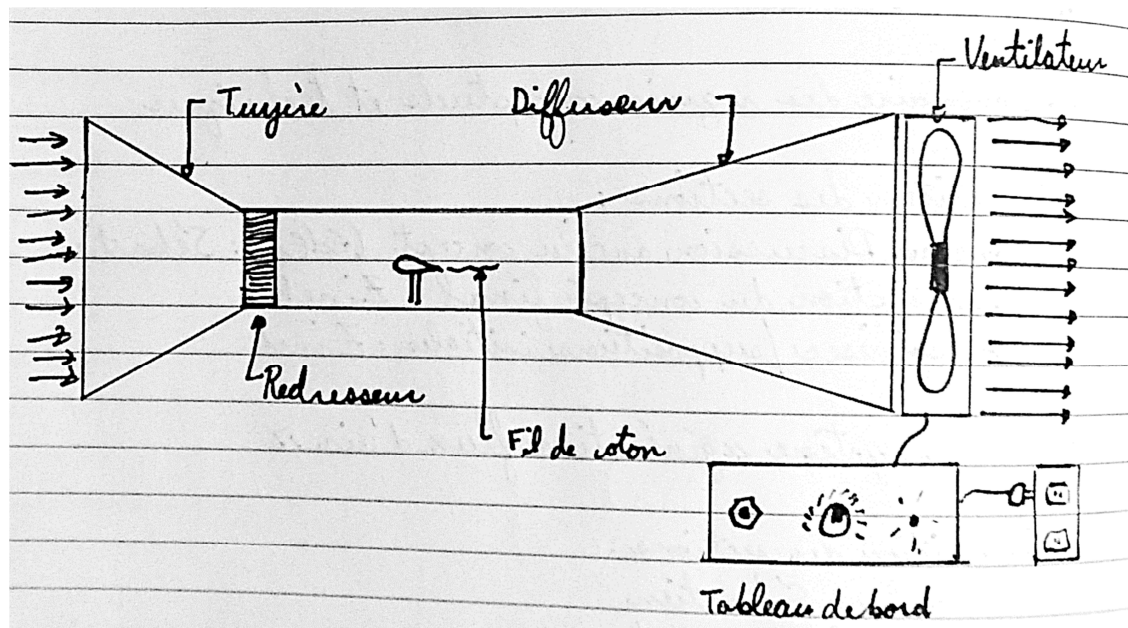


Figure 1.1. Croquis de la solution proposée à l'étude de cas n° 2

Les sections nommées dans la Figure 1.1 font partie intégrante des systèmes de génération d'un flux d'air et de mesure des caractéristiques de l'écoulement.

Le concept contient les éléments suivants :

- Une **tuyère**, fabriquée en *Coroplast*, pour accélérer l'air vers la veine d'essai;
- Un **redresseur**, fabriqué à l'aide de pailles découpées et collées ensemble, pour transformer l'écoulement d'air hélicoïdal en écoulement laminaire;
- Une **veine d'essai**, fabriquée en *Plexiglas*, qui contient le profil d'aile;
- Des **fils de coton** accrochés au profil d'aile pour visualiser l'écoulement autour du profil;
- Un **diffuseur**, fabriqué en *Coroplast*, utilisé conjointement avec la tuyère pour accélérer l'air dans la veine d'essai;
- Un **ventilateur** commercial de plancher (*box fan*) pour aspirer l'air dans la soufflerie;
- Un **tableau de bord**, comptant un interrupteur, un gradateur et un témoin lumineux, pour contrôler l'activité du ventilateur ainsi que sa vitesse de rotation.

Pour l'étude de cas n° 3, l'équipe est jumelée à deux autres équipes, qui s'occupent de la structure de la soufflerie ainsi que du système de mesure de la portance. Évidemment, les concepts de chaque équipe doivent être révisés pour garantir un assemblage harmonieux de toutes les sections de la soufflerie. Il en est de même pour les systèmes de génération d'un flux d'air et de mesure des caractéristiques de l'écoulement d'air.

La liste suivante décrit les modifications apportées au concept de l'équipe pour l'étude de cas actuelle :

- Placement du ventilateur en amont de la soufflerie, devant la tuyère;
- Élimination du diffuseur, devenu inutile avec le déplacement du ventilateur;
- Élimination du tableau de bord, étant donné que les ventilateurs ont, pour la plupart, des contrôles intégrés.

Avec ces modifications, il est évident que le fonctionnement de la soufflerie n'est plus le même. La prochaine section présente le concept amélioré pour les systèmes de génération d'un flux d'air et de mesure des caractéristiques de l'écoulement d'air.

1.2 DESCRIPTION DU CONCEPT FINAL

Comme mentionné dans la section précédente, l'emplacement du ventilateur a été changé. En changeant la source du flux d'air, c'est toute la configuration de la soufflerie qui est remise en cause. Une nouvelle configuration, qui utilise un moteur d'aéromodélisme muni d'une hélice d'avion réduit, est retenue. L'air, au lieu d'être aspiré dans la soufflerie, est maintenant soufflé vers la veine d'essai.

Le concept final est étudié de sorte à répondre le plus possible aux **besoins du client** et des enseignants en termes de différents critères communiqués lors des études de cas précédentes. Le concept adopté par la compagnie offre une **vitesse d'écoulement compétitive** avec celle des autres compagnies, tout en ayant **un poids et un prix réduits**, en **facilitant la fabrication et l'assemblage** et en ayant des dimensions réduites afin d'être **facilement transporté et rangé**.

Le nouveau système de génération d'un flux d'air contient donc :

- Un ensemble de moteur d'aéromodélisme;
- Une tuyère;
- Un redresseur;
- Une veine d'essai.

Le nouveau système de mesure des caractéristiques de l'écoulement d'air contient :

- Un manomètre artisanal;
- Des fils de coton accrochés au bord de fuite du profil d'aile;
- Une machine à fumée.

La figure 1.2 suivante montre l'allure de la solution finale du point de vue de la génération du flux d'air.

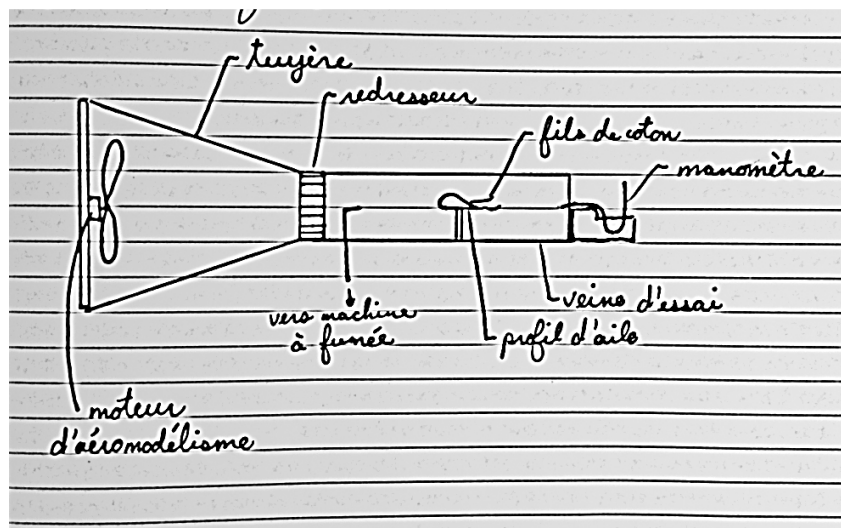


Figure 1.2. Esquisse de la solution finale

L'ensemble de **moteur d'aéromodélisme** comporte plusieurs éléments mécaniques et électroniques, énumérés et décrits au chapitre 3.

La **tuyère** permet d'accélérer le flux d'air avant l'entrée dans la veine d'essai. Celle-ci est fabriquée en *Coroplast* et est soutenue par une structure en MDF.

Le **redresseur** permet de transformer l'écoulement d'air hélicoïdal généré par l'hélice du moteur en écoulement linéaire. Il comporte un cadre en MDF collé à la sortie de la tuyère. Deux solutions ont été envisagées pour redresser l'air. La première solution consiste à utiliser une structure en pailles. Toutefois, des critères de complexité nous ont poussés à abandonner cette solution, qui aurait nécessité le découpage de 442 pailles (voir calcul en annexe E). Une solution alternative, plus simple, a été adoptée. Celle-ci est constituée de panneaux de *Coroplast* entrecroisées à l'aide de fentes. Cette solution a été considérée comme étant plus pratique pour la fabrication et n'entraînant pas des pertes de vitesse d'écoulement d'air trop importantes.

La **veine d'essai** est la zone d'observation des expériences et la zone de prise de mesures. Celle-ci est réalisée en *Plexiglas* pour assurer la visibilité des expériences. Elle est démontable, puisqu'elle est positionnée sur une structure en MDF. Elle possède un faux-fond au niveau duquel se trouve le support du profil d'aile ainsi que la balance pour les prises de mesure.

Le système de mesure de la vitesse d'écoulement est un **manomètre** constitué d'un tube flexible fixé en aval de la soufflerie à l'aide d'un support en MDF qui lui permet de maintenir la forme souhaitée.

Pour pouvoir observer le comportement de l'écoulement d'air autour du profil d'aile, des **fils de coton** sont accrochés au bord de fuite du profil. Optionnellement, une **machine à fumée** fait également partie de la solution finale. Celle-ci présente un avantage intéressant d'un point de vue pédagogique puisqu'elle permet la visualisation de l'écoulement d'air sur tout le profil d'aile. La fumée permet également d'observer les phénomènes de tourbillons et de décrochage.

1.3 HYPOTHÈSES ET SUPPOSITIONS DE DÉPART

La présente section énumère les hypothèses émises par l'équipe pour la conception de la solution adoptée par la compagnie. Ces hypothèses sont divisées selon des **considérations thermodynamiques et liées aux matériaux utilisés**.

Pour les calculs effectués sur la vitesse de l'écoulement, il est nécessaire d'établir les hypothèses standard en thermodynamique, soit que l'on a un *écoulement permanent*, un *système stationnaire* et que l'on considère l'air comme un *gaz parfait*. On assume aussi que la masse volumique de l'air reste *constante* dans toute la soufflerie et on l'évalue à **1,225 kg/m³**. La masse volumique de l'eau est évaluée à **1 000 kg/m³**. De plus, on suppose un *ralentissement de l'air* à la sortie du redresseur d'environ **20%**. On émet également l'hypothèse que les refoulements d'air au sein de la tuyère sont *négligeables*. On pose l'accélération gravitationnelle terrestre **$g = 9,81 \text{ m/s}^2$** .

On suppose que les matériaux sont **isotropes** et qu'ils possèdent des **densités constantes**. Les densités des différents matériaux utilisés sont présentées dans le

Tableau 1.1 suivant.

Tableau 1.1. Densités massiques des matériaux utilisés

Matériau	Densité [kg/m³]
MDF	740
<i>Coroplast</i>	187,5
<i>Plexiglas</i>	1180
Peuplier	460

Les masses volumiques des matériaux utilisés telles que présentées dans le tableau précédent résultent d'approximations faites à partir de recherches de densités standards de ces matériaux. Par exemple, la densité du MDF varie de 680 kg/m³ à 830 kg/m³ en fonction de l'épaisseur du panneau et des fibres contenues dans le matériau. L'épaisseur du MDF utilisé est de 12,7 mm (½ po), ce qui correspond à une densité d'environ 740 kg/m³. Pour une épaisseur de 4 mm, le *Coroplast* a une densité de 187,5 kg/m³. La densité du *Plexiglas*, utilisé pour la veine d'essai, est de 1 180 kg/m³. La masse volumique du peuplier varie entre 400 kg/m³ et 520 kg/m³. On considère la moyenne de ces deux valeurs comme la densité du peuplier utilisé pour la soufflerie, soit 460 kg/m³.

RÉFÉRENCES

[1] - Density of wood - The Physics Factbook (s.d) , [En ligne], Tiré de :
<http://hypertextbook.com/facts/2000/ShirleyLam.shtml>

[2] - Fiche essences Peuplier, Belgian Woodforum, (s.d). [En ligne], Tiré de :
<http://www.delvauxciney.be/Bois%20fiches%20techniques/Peuplier.pdf>

[3] - Masse volumique - Matières plastiques (s.d). Tiré de :
http://fr.wikipedia.org/wiki/Masse_volumique#.C3.89l.C3.A9ments

[2] - Professionnal Plastics - Coroplast Polypropylene Sheet Specifications & Tolerances, (s.d)
[En ligne], Tiré de :
<https://www.professionalplastics.com/professionalplastics/content/CoroplastSpecifications.pdf>

Chapitre 2

ANALYSE DU CONCEPT

Dans cette section, le concept sélectionné est analysé afin de déterminer les dimensions critiques au bon fonctionnement de la soufflerie. Afin d'éviter toutes ruptures de pièces ou déplacements non souhaités causées par diverses charges, des analyses de forces internes et externes sont faites. Malgré un grand nombre de données inconnues, la modélisation et l'analyse du système est possible grâce à certaines hypothèses initialement posées. L'analyse du concept assure donc un produit solide et viable lors d'essais pratiques.

2.1 EFFORTS EXTERNES

2.1.1 Hypothèses initiales et justifications

Des suppositions et hypothèses sont d'abord faites afin de simplifier les calculs d'équilibre sur la structure de la soufflerie.

Densité moyenne et uniforme des matériaux

Les matériaux sont supposés de densité uniforme, afin d'avoir une valeur du centre de masse à l'aide du logiciel de modélisation CATIA V5. Le concept final de la soufflerie a été modélisé, et les matériaux correspondants appliqués à l'assemblage afin d'avoir un bon estimé de la masse ainsi que du positionnement du centre de masse des différentes sections. Les matériaux sont donc supposés de densités moyennes, uniformes et conformes aux spécifications techniques.

Hélice

Afin de simplifier les calculs permettant de trouver le moment causé par la rotation de l'hélice, le premier moment d'inertie de l'hélice est approximé comme celle d'une tige de densité uniforme, qui a une inertie plus grande que la valeur réelle, puisque la masse est concentrée près du point de rotation dans la véritable hélice. Le moment ainsi calculé est donc plus grand que le moment réellement causé par l'hélice, ajoutant ainsi un facteur de sécurité. La vitesse de rotation de l'hélice est aussi estimée au-dessus de sa vitesse de rotation réelle, afin de s'assurer que la soufflerie résiste à la charge imposée par l'hélice. Le moteur, lorsque à vide, tourne à 1250 rpm/V fourni, ce qui correspond, lorsque sur un voltage de 10.8V, à 13500 rpm. Cette vitesse est utilisée dans les calculs subséquents.

Encastrement avec veine d'essai

La série de gougeons et de connections entre la veine d'essai et la tuyère de la soufflerie sont modélisés par un encastrement, afin de simplifier les calculs. Les nombreux gougeons empêchent la soufflerie de bouger verticalement, ainsi que dans l'axe de la soufflerie. Les montants verticaux l'empêchent de se déplacer latéralement et verticalement. La combinaison des montants et des gougeons empêchent la soufflerie de pivoter sur les 3 axes. Aucun degré de liberté n'est laissé à la soufflerie. Le système reprend donc tous les types d'efforts, ce qui est équivalent à un encastrement.

Extrémité non supportée

La tuyère de la soufflerie est représentée comme ayant son extrémité non supportée, ce qui correspond à la pire situation dans laquelle elle devrait se retrouver dans le cadre d'un usage normal. Elle doit donc résister aux charges imposées dans cette situation.

Écoulement permanent

L'écoulement d'air dans la tuyère est modélisé comme un écoulement permanent, afin de permettre des calculs de fluides simple.

2.1.2 Descriptions des charges et diagrammes de corps libres

La masse de la tuyère crée des forces sur la structure qui sont transformées en un moment à la jonction des deux sections. Ainsi, la tuyère peut être modélisée comme une poutre encastree.

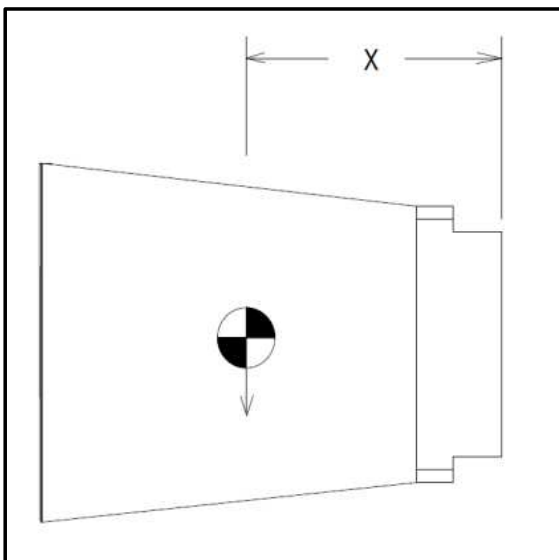


Figure 2.1. Centre de masse

En supposant que la masse, qui est une charge répartie, est appliquée au centre de masse, on obtient les équations présentées à la section 2.1.3. Ainsi la force générée par l'accélération gravitationnelle sur la masse de la tuyère appliquée au centre de masse est nommée F_B dans la modélisation de la poutre et les réactions aux appuis sont calculées au point C. X est la position du Centre de masse, qui correspond à 197 mm. F_B est de 43 N alors que F_U est de 22 N.

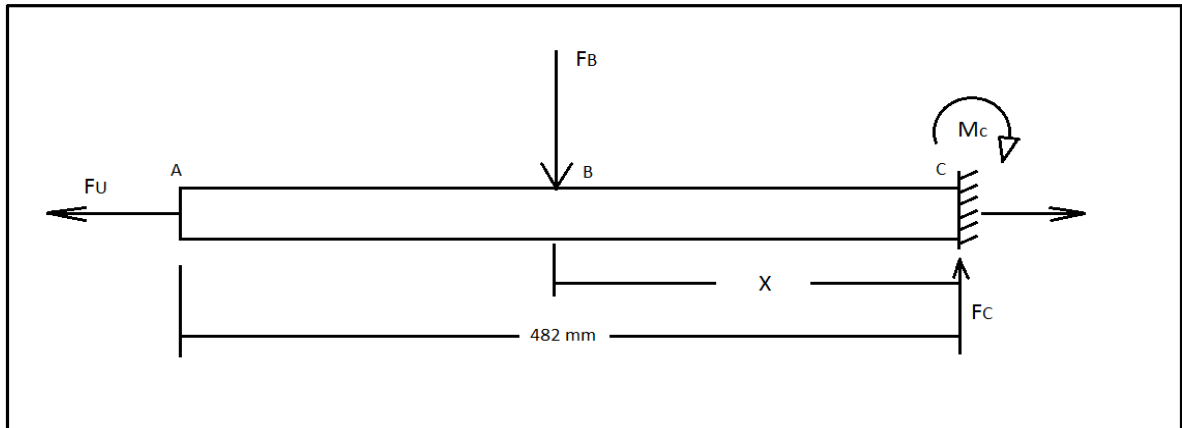


Figure 2.2. DCL de la tuyère

2.1.3 Calculs (formules, résultats, graphiques et interprétations) :

En faisant le bilan et l'analyse des forces, on peut trouver nos inconnues aux appuis.

Moment à l'encastrement :

$$\sum Mc = X(Fb) - Mc = 0$$

Somme des forces verticales :

$$\sum Fy = - Fb + Fc = 0$$

Somme des forces horizontales :

$$\sum Fx = - Fu + Fcx = 0$$

On détermine donc que les forces à l'encastrement sont :

$$Fcx = 22 \text{ N}$$

$$Fcy = 43 \text{ N}$$

$$Mc = 8.6 \text{ N.m}$$

En faisant le bilan et l'analyse des forces de la section précédente, on peut trouver nos inconnues aux appuis. Le moment causé par l'hélice est calculé durant l'accélération de l'hélice, qui correspond à l'instant où le moment sera maximal.

Hélice

Longueur : 12 po

Masse : 28 g

$$I : (\text{mL}^2)/12 = (.028(12*25.4)^2)/12 = 216,77 \times 10^{-6}$$

Moteur

7.4V à 10.8 V

1250 kV : 1250 rpm/volt

13 500 RPM à vide à 10.8V (Réduit par l'inertie de l'hélice)

Calculs : 0 rad/s à 450 rad/s (13500RPM) en 5 secondes

$$\alpha = ? \quad W_1 = 0 \text{ rad/sec} \quad W_2 = 450\pi \text{ rad/sec} \quad \Delta t = 5 \text{ sec}$$

$$W_2 = W_1 + \alpha \Delta t$$

$$\alpha = 90\pi \text{ rad/sec}$$

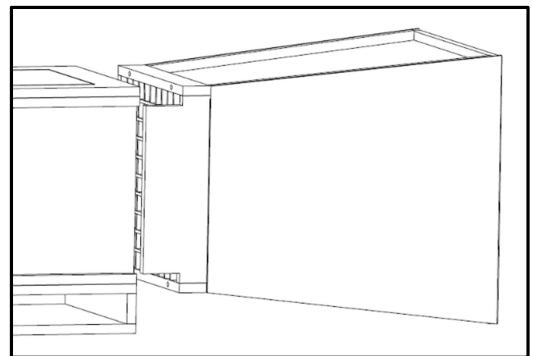
Moment généré

$$M = I\alpha$$

$$M = 0.06129 \text{ N.m}$$

2.1.4 Analyse

Le concept d'encastrement est donc *over-designed* si on l'analyse conjointement avec les efforts qui lui sont fournis. Les gougeons ainsi que la structure en sandwich résisteront à des forces de magnitudes très supérieures aux efforts externes générées par le poids de la tuyère. Certaines recommandations sont cependant à faire. Pour éviter tout accident, il serait préférable de laisser la tuyère appuyé au même niveau que la veine d'essai. La structure étant facilement démontable, elle pourrait être accrochée en pleine utilisation et tomber, ce qui n'est pas souhaitable.

**Figure 2.3.** Croquis de la section GFA

2.2 EFFORTS INTERNES

2.2.1 Hypothèses initiales et justifications

Des suppositions et hypothèses sont d'abord faites afin de simplifier les calculs de contraintes et de déformations sur la structure de la tuyère.

Différence de pression négligeable

La différence de pression entre l'extérieur de la tuyère et l'intérieur a été calculée, et est considérée comme négligeable. En effet, un différentiel de pression de 73.5 Pa a été calculé avec un écoulement de 20 m/s, qui est supérieur à ce qui sera présent dans la véritable soufflerie. Cette force peut donc être considérée comme négligeable.

Revêtements de la tuyère ne prenant aucune charge

Les revêtements de *Coroplast* de la tuyère sont considérés comme ne prenant aucune charge structurelle, puisqu'ils reposent sur des tiges de peuplier qui ont une rigidité supérieure à celle du *Coroplast*. Les seules charges s'appliquant sur ces feuilles seraient leur poids (qui est très faible) ainsi que la force provenant du différentiel de pression entre l'extérieur et l'intérieur de la tuyère, qui est négligeable.

Densité moyenne et uniforme des matériaux

Les matériaux sont supposés de densité uniforme, afin de pouvoir approximer la force exercée par le poids de la soufflerie comme étant une charge ponctuelle au centre de masse. L'hypothèse de la densité uniforme permet aussi d'utiliser la valeur moyenne du module de Young pour le MDF.

Matériaux isotropes

Les matériaux sont considérés comme isotropes, afin de simplifier les calculs de contraintes, qui devraient être faits pour les différents axes des pièces. En réalité, le peuplier et le *Coroplast* ne sont pas isotropes, mais les contraintes ici présentes sont trop faibles pour que cette hypothèse ait un impact sur la validité de la réponse finale.

Aucune concentration de contraintes

Les pièces sont modélisées comme n'ayant aucune concentration de contraintes, puisque ces calculs s'avèrent assez complexes. Encore une fois, les charges et contraintes imposées à la structure de la soufflerie sont assez faible pour que les concentrations de contraintes n'affectent pas la solidité des pièces.

2.2.2 Descriptions des charges et diagrammes de corps libres

Sur la section centrale de la pièce GFA-03-01-01 est installé le moteur électrique permettant de générer le flux d'air. Celui-ci est fourni avec des vis et on suppose que des analyses de cisaillement de vis ont déjà été conduites afin d'éviter toutes défaillances mécaniques par le détaillant. Le moteur génère une poussée qui tire sur la section centrale et un moment résultant de la rotation de l'hélice. Pour de plus amples détails sur les hypothèses, consultez la section précédente (2.2.1 Hypothèses initiales et justifications). Ainsi, la section critique de la pièce est la poutre centrale de la pièce GFA-03-01-01. On suppose donc que cette section est une poutre aux dimensions minimales de la section et on ne suppose aucune concentration de contraintes aux 2 encastremets des extrémités.

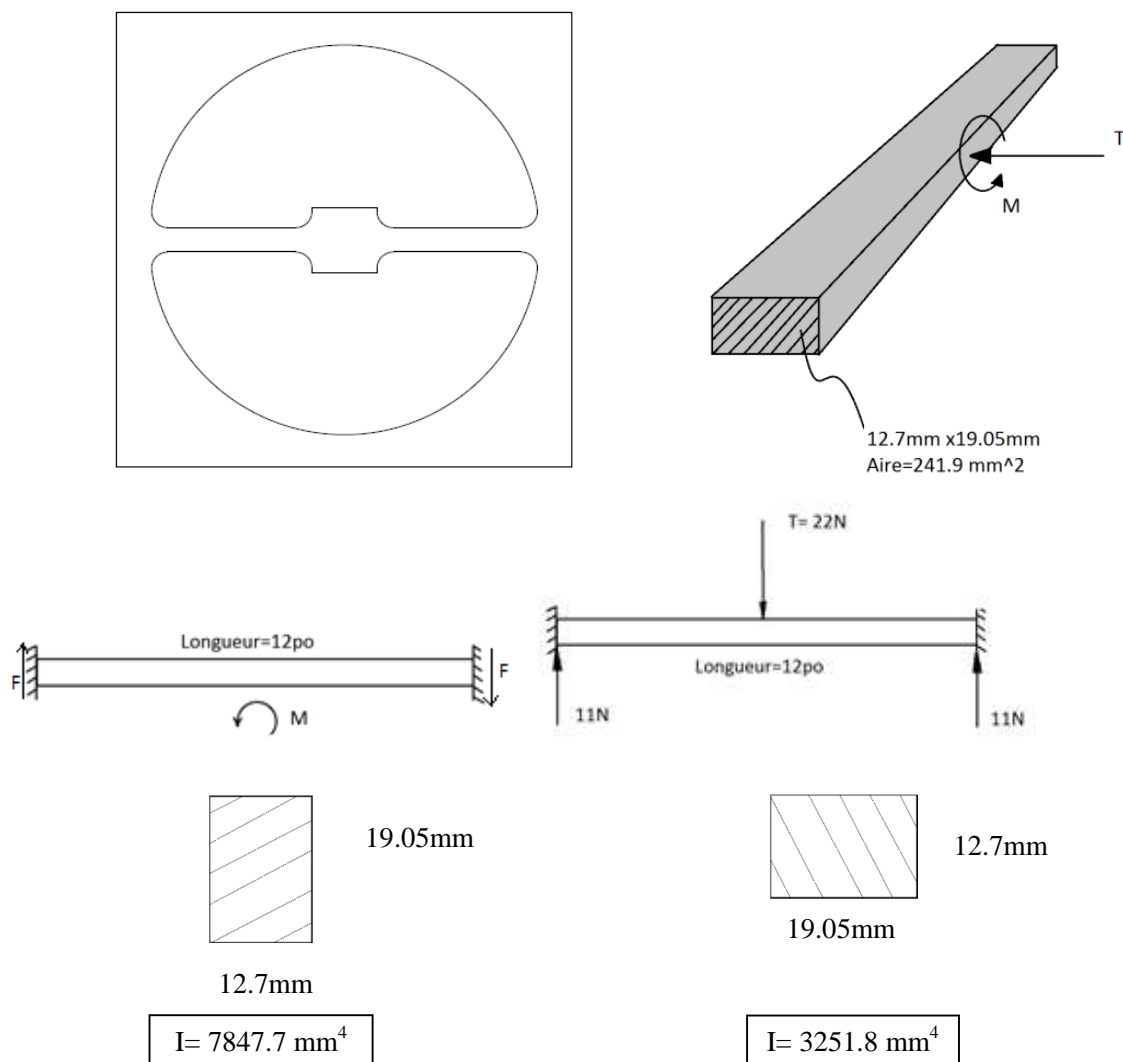


Figure 2.4. DCLs et Croquis des forces sur le support

2.2.3 Calculs (formules, résultats, graphiques et interprétations)

Déformations

* Puisque les 2 extrémités sont encastrées, C_1 et C_2 sont nuls.

$q(x) = F\langle x \rangle_{.1} - M\langle x-152.5 \rangle_{.2} + \dots$	$q(x) = 11\langle x \rangle_{.1} - 22\langle x-152.5 \rangle_{.1} + \dots$
$-v(x) = F\langle x \rangle^0 - M\langle x-152.5 \rangle_{.1} + \dots$	$-v(x) = 11\langle x \rangle^0 - 22\langle x-152.5 \rangle^0 + \dots$
$M(x) = F\langle x \rangle^1 - M\langle x-152.5 \rangle^0 + \dots$	$M(x) = 11\langle x \rangle^1 - 22\langle x-152.5 \rangle^1 + \dots$
$EI\phi(x) = F/2\langle x \rangle^2 - M\langle x-152.5 \rangle^1 + C_1 + \dots$	$EI\phi(x) = 11/2\langle x \rangle^2 - 22/2\langle x-152.5 \rangle^2 + C_1 + \dots$
$EIV(x) = F/6\langle x \rangle^3 - M/2\langle x-152.5 \rangle^2 + C_2 + \dots$	$EIV(x) = 11/6\langle x \rangle^3 - 22/6\langle x-152.5 \rangle^3 + C_2 + \dots$
$v(182.5) = ((M/(152.5*2))/6*152.5^3) / (EI) = .019\text{mm}$	$v(182.5) = (11/6*152.5^3) / (EI) = .833\text{mm}$

$$2 \times 152.5 \times F = 61.29 \text{ Nmm}$$

$$F = .2 \text{ N}$$

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{.2\text{N}}{241.9\text{mm}^2} = 8.26 \times 10^{-4} \text{MPa}$$

Contrainte normale

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{11\text{N}}{241.9\text{mm}^2} = 0.0546 \text{MPa}$$

L'autre section qui pourrait être critique est la structure de la tuyère elle-même. Elle est supportée par quatre longerons de 0.5x0.75 pouces, qui servent à retenir les feuilles de *Coroplast* (et qui reprennent donc la pression interne) et à maintenir la structure (reprenant ainsi le poids de la tuyère). Comme il a été démontré précédemment, une force de 22 N est appliquée dans l'axe de la soufflerie, créant donc une contrainte normale sur les longerons.

Contrainte normale sur les longerons

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{22\text{N}}{4 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot 25.4\right) \cdot \left(\frac{3}{4} \cdot 25.4\right)} = 0.0227 \text{MPa}$$

Déformation normale des longerons

$$\delta = \frac{\sigma L}{E} = \frac{0.0227 \text{ MPa} \cdot 394 \text{ mm}}{2400 \text{ MPa}} = 0.0047 \text{ mm}$$

Flexion de la structure sous le poids

$$I = 4 \cdot \frac{\left(\frac{1}{2} \cdot 25.4\right) \cdot \left(\frac{3}{4} \cdot 25.4\right)^3}{3} + 2 \cdot 256^2 \cdot 241.9 = 31.83 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

$$\begin{aligned} q(x) &= 43\langle x \rangle_{-1} - 43\langle x-197 \rangle_{-1} + \dots \\ -v(x) &= 43\langle x \rangle^0 - 43\langle x-197 \rangle^0 + \dots \\ M(x) &= 43\langle x \rangle^1 - 43\langle x-197 \rangle^1 + \dots \\ EI\phi(x) &= 43/2\langle x \rangle^2 - 43/2\langle x-197 \rangle^2 + C_1 + \dots \\ EIV(x) &= 43/6\langle x \rangle^3 - 43/6\langle x-197 \rangle^3 + C_2 + \dots \\ v(182.5) &= (43/6 \cdot 197^3) / (EI) \approx 0 \end{aligned}$$

2.2.4 Analyse

Les résultats obtenus sont très représentatifs de notre soufflerie, qui a été *over-designed*. Encore une fois, les contraintes et déformations causées par les charges sur la structure sont très faibles. Aucune contrainte ne dépasse 0.1 MPa, et aucune déformation n'est plus grande que de 1 mm. Les dimensions des sections critiques sont donc beaucoup plus grandes que nécessaire, mais serviront entre autre à rassurer l'utilisateur de la soufflerie afin qu'il se sente en sécurité lors du fonctionnement, ainsi qu'à faciliter la fabrication des pièces. Certaines recommandations restent quand même à faire. Les extrémités de la section encastrée de la pièce GFA-03-01-01 devraient avoir des congés afin d'éviter les concentrations de contraintes. Un changement de matériau peut être possible pour cette section mais éviter les matériaux mousses, *Coroplast* ou tout autre matériau moins résistant que le bois. Enfin, il n'est pas recommandé de réparer la pièce en cas de rupture mécanique avec de la colle, des vis ou de quelque façon que ce soit.

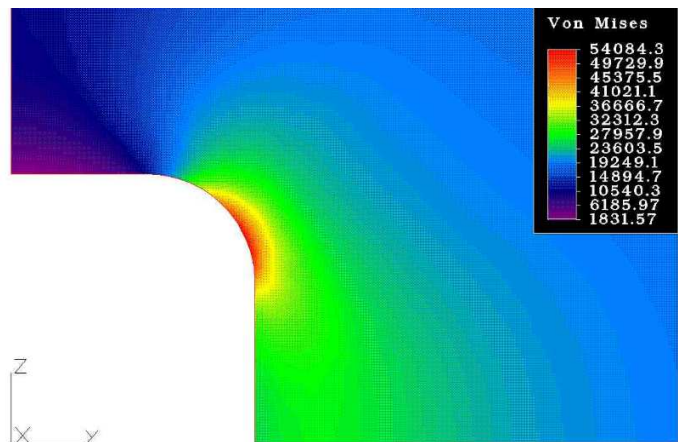


Figure 2.5. Concentration de contraintes

Chapitre 3

RÉALISATION DE LA SOUFFLERIE

Dans ce chapitre, les étapes amenant à la réalisation de la soufflerie sont expliquées en détail. D'abord, les choix de conception sont présentés. Les équations utilisées ainsi que leurs résultats sont interprétés et justifiés. Ensuite, les conséquences et les répercussions des choix de conception sur l'ensemble de la soufflerie sont exposées, pour finalement terminer avec les dessins d'ingénierie, avec dimensionnement et tolérancement, des sous-systèmes et de leurs composantes. Le tout est divisé en deux sections : une section pour le système de génération d'un flux d'air et une autre pour le système de mesure des caractéristiques de l'écoulement.

3.1 SYSTÈME DE GÉNÉRATION D'UN FLUX D'AIR

Les prochains articles traitent des étapes menant à la réalisation du système de génération d'un flux d'air (appelé système GFA, à l'interne).

3.1.1 Choix de conception

Comme expliqué au chapitre 1, le concept de système GFA a été modifié pour mieux s'associer aux autres systèmes de la soufflerie (structure et mesure de la portance). La solution finale adoptée contient un ensemble de **moteur d'aéromodélisme**, une **tuyère**, un **redresseur** et la **veine d'essai** contenant le profil d'aile.

Les caractéristiques du système GFA sont les suivantes :

- Ensemble de moteur d'aéromodélisme, supporté par un cadre en MDF, soufflant l'air à l'intérieur de la veine d'essai;
- Vitesse d'écoulement d'air maximale mesurée devant le moteur : 15 m/s;
- Vitesse de rotation du moteur modifiable à l'aide d'un contrôleur;
- Tuyère, fabriquée en *Coroplast* et supportée par des longerons en peuplier, accélérant le flux d'air vers la veine d'essai;
- Redresseur, fabriquée en *Coroplast* et supporté par un cadre en MDF, transformant le flux d'air hélicoïdal en flux d'air laminaire;
- Veine d'essai, fabriquée en *Plexiglas* et en MDF, contenant le profil d'aile.

Les raisons qui ont poussé l'équipe à choisir cette solution sont les suivantes :

- Un ventilateur commercial de plancher est lourd, peu transportable, n'offre que des vitesses de rotation fixes et n'offre pas une très grande vitesse d'écoulement d'air;
- En aspirant l'air dans la soufflerie, la vitesse de l'écoulement d'air dans la veine d'essai est moindre que lorsque l'air est poussé dans la soufflerie (des tests ont été effectués avec un ventilateur commercial; les résultats sont montrés dans le prochain article);
- En poussant l'air à l'intérieur de la soufflerie, il n'est plus nécessaire d'avoir un diffuseur à la sortie de la veine d'essai.

3.1.2 Description de l'ensemble de moteur d'aéromodélisme

L'ensemble de moteur d'aéromodélisme utilisé contient plusieurs éléments électroniques, dont leur type, leur nom et leur rôle sont décrits dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1. Pièces de l'ensemble de moteur d'aéromodélisme

Type	Nom	Rôle
Moteur	SuperTiger .10 Brushless Motor	Faire tourner l'hélice
Hélice	LP12060E 12x6 Thin Electric Prop	Générer un mouvement d'air
Adaptateur d'hélice	Prop Adapter 4 mm to 1/4x28	Coupler l'hélice au moteur
Contrôleur de vitesse	DJI ESC-30A OPTO	Transmettre les signaux électriques de vitesse au moteur
Testeur de servomoteur	Astro Servo Tester p/n 105	Contrôler la vitesse de rotation du moteur manuellement
Transformateur	EFuel Switching DC Power Supply 30A	Alimenter le circuit en électricité

Toutes ces pièces sont critiques au bon fonctionnement du moteur d'aéromodélisme. La Figure 3.1 suivante indique les branchements électriques entre les composantes.

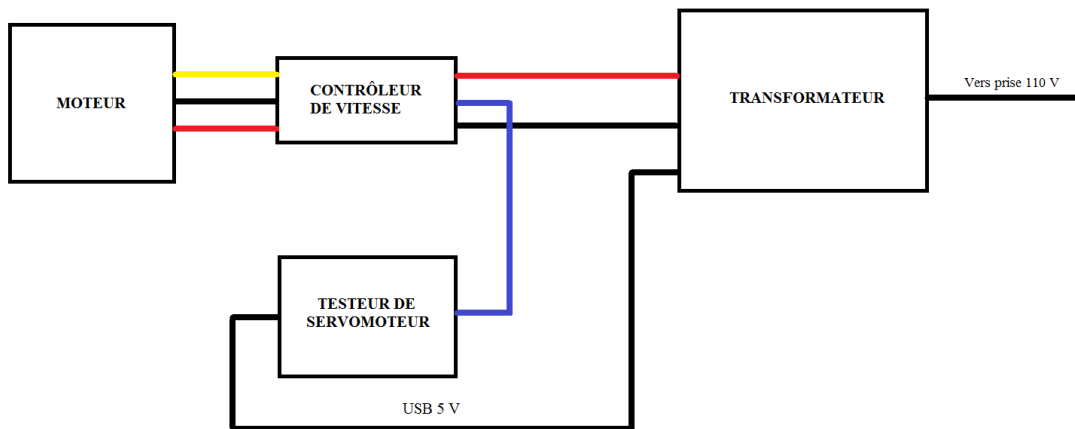


Figure 3.1. Circuit de l'ensemble d'aéromodélisme

Pour faire fonctionner le moteur, l'utilisateur doit :

1. Brancher le transformateur dans une prise murale;
2. Allumer le transformateur;
3. Tourner le gradateur du testeur de servomoteur jusqu'à ce que le moteur tourne;
4. Tourner le gradateur jusqu'à la vitesse désirée.

3.1.3 Calcul du dimensionnement de la tuyère et de la veine d'essai

Dans cette section, les calculs menant au dimensionnement de la tuyère et de la veine d'essai sont donnés.

Rappel des hypothèses :

- La masse volumique de l'air est constante à travers la soufflerie;
- Le système opère en régime permanent;
- L'air est considéré comme un gaz parfait;
- Le redresseur occasionne des pertes de vitesse d'environ 20%.

Lors d'essais initiaux du système de génération d'un flux d'air, une vitesse d'écoulement d'air maximale d'environ **15 m/s** a été mesurée directement devant l'hélice en rotation. Le diamètre de l'hélice utilisée est de **12 pouces** (30,48 cm).

Il est possible de calculer le débit volumique d'air généré par l'hélice à l'aide de la formule suivante :

$$\dot{V} = v \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] * A [\text{m}^2]$$

où v est la vitesse de l'écoulement et A est l'aire du disque parcouru par l'hélice en rotation. Pour une vitesse mesurée de 15 m/s, on obtient un débit volumique de **1,0945 m³/s**.

En manipulant la même équation et en supposant que le débit volumique de l'air reste constant dans toute la soufflerie, on obtient :

$$v_1 * A_1 = v_2 * A_2$$

où v_1 est la vitesse à l'entrée de la tuyère, A_1 est la section à l'entrée de la tuyère, v_2 est la vitesse à la sortie de la tuyère et A_2 est la section à la sortie de la tuyère. En déplaçant les variables, on obtient la relation suivante :

$$v_2 = v_1 * \frac{A_1}{A_2}$$

Il est donc possible de calculer la vitesse de l'écoulement d'air à la sortie de la tuyère selon les aires à l'entrée et à la sortie. L'aire à l'entrée est considérée comme l'aire du disque parcouru par l'hélice en rotation.

Un programme MATLAB a été écrit pour calculer la vitesse de l'écoulement d'air à la sortie de la tuyère et du redresseur en considérant des pertes de vitesse de 20% à travers le redresseur. Ce programme est disponible en annexe (Annexe F). La Figure 3.2 suivante montre la vitesse de l'écoulement selon la largeur de la veine d'essai, en supposant que la veine d'essai soit carrée.

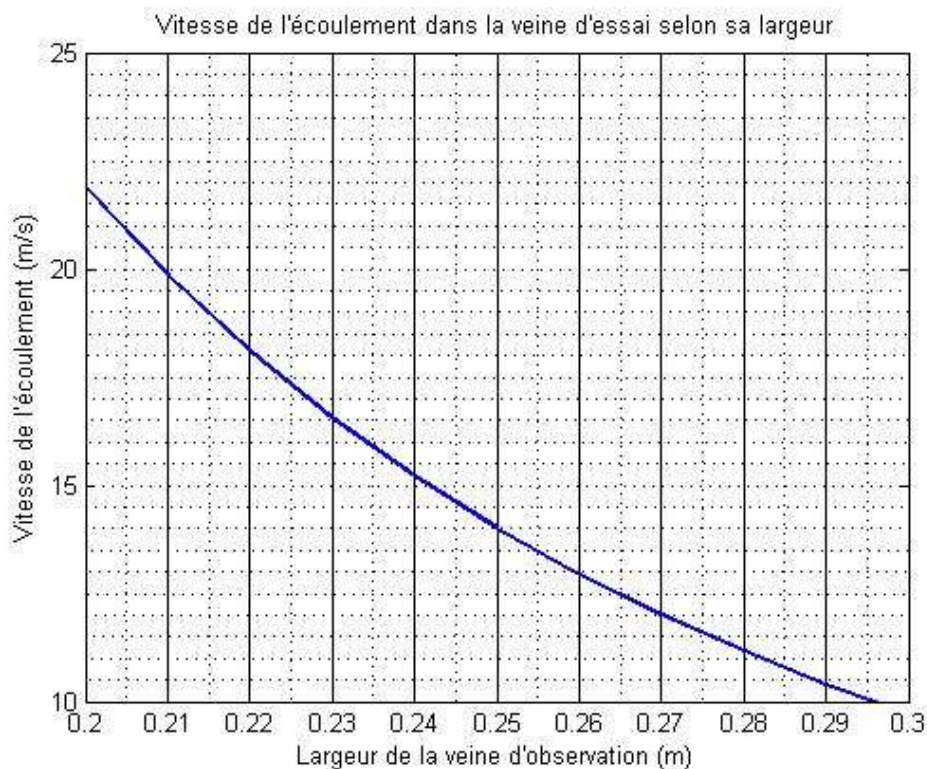


Figure 3.2. Vitesse de l'écoulement d'air selon la largeur de la veine d'essai

En observant le graphique, il devient évident que plus la veine d'essai est grande, moins la vitesse d'écoulement est élevée. De plus, avec la présence du redresseur, l'efficacité de la tuyère est beaucoup moins grande que ce qu'elle devrait être.

En discutant avec l'équipe de la mesure de la portance, il a été convenu que la veine d'essai aura des dimensions de **25 X 25 cm**. Avec ces dimensions, on obtient une vitesse d'écoulement d'air dans la veine d'essai d'environ **13 m/s**, ce qui représente une **perte de 13%** par rapport au 15 m/s à l'entrée de la tuyère. C'est un compromis qui a été fait pour pouvoir rentrer de plus gros profils d'ailes dans la veine d'essai et, ainsi, obtenir de plus grandes mesures de portance.

3.1.4 Répercussions du choix de concept

Le choix d'un moteur d'aéromodélisme a un impact considérable sur les principales considérations étudiées au cours l'étape de fabrication, soit le **poids** de la soufflerie, la **vitesse de l'écoulement obtenue** et la **portance** résultante. Les principales conséquences de cette solution sont :

- Un poids réduit pour deux raisons : le moteur a un poids inférieur au ventilateur commercial essayé et une composante de la soufflerie, le diffuseur, a été retirée;
- Une vitesse d'écoulement maximum de 15 m/s en comparaison avec une vitesse maximum de 8,4 m/s pour le ventilateur précédemment envisagé, soit un gain en vitesse de 44 %;
- Une vitesse variable manuellement, et ce, grâce au testeur de servomoteur. Ceci répond à un des besoins du client tels qu'étudiés à l'étude de cas n° 1;
- Une portance plus élevée grâce à une meilleure vitesse d'écoulement.

Par ailleurs, le choix du moteur d'aéromodélisme a un impact sur la configuration de la soufflerie dans son ensemble. Seules les composantes nécessaires pour les prises de mesure, l'observation des tests et la qualité de l'écoulement sont conservées.

La tuyère est maintenue avant tout pour des besoins dimensionnels. En effet, elle permet de contenir le moteur avec l'hélice de 12 pouces (soit 30,48 cm) qui lui est reliée et est rattachée à la veine d'essai dont les dimensions sont de 25 X 25 cm. La tuyère ne possède pas un grand avantage d'un point de vue aérodynamique, étant donné que son rapport de sections entrée-sortie n'est pas suffisamment grand pour permettre un réel gain de vitesse. Au contraire, à la suite des tests effectués, il semble que la tuyère soit responsable d'une perte de vitesse d'environ 1 m/s, ceci étant probablement dû au redresseur et à un phénomène de refoulement de l'air. Toutefois, en raison du diamètre de l'hélice, le moteur n'aurait pas pu être relié directement à la veine d'essai.

3.1.5 Dessins de détail et d'assemblage

Les dessins de détail et d'assemblage sont inclus en annexe (Annexe H – Dessins d'ingénierie). Ils contiennent les dimensions et les tolérances des éléments suivants :

- Support du moteur (MDF);
- Panneaux de la tuyère (*Coroplast*);
- Longérons de la tuyère (peuplier);
- Morceaux du cadre du redresseur (MDF);
- Redresseur (*Coroplast*).

Il est à noter que les équipements du moteur d'aéromodélisme n'ont pas été inclus dans les dessins d'ingénierie. Leurs connexions ainsi que leur montage sur la structure sont expliqués dans les gammes de fabrication.

3.2 SYSTÈME DE MESURE DES CARACTÉRISTIQUES DE L'ÉCOULEMENT D'AIR

Cette section traite des étapes menant à la réalisation du système de mesure des caractéristiques de l'écoulement d'air. Ce système est celui qui permet une mesure quantitative de premier ordre : la pression dynamique de l'air, qui permet de calculer la vitesse. Le manomètre est représenté par le croquis de concept suivant (Figure 3.3).

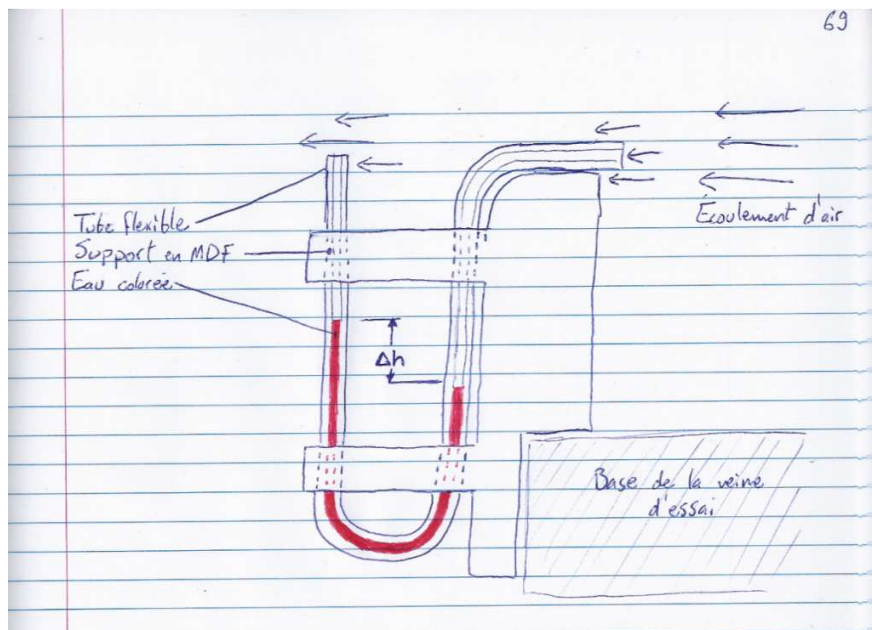


Figure 3.3. Croquis de concept du manomètre

3.2.1 Choix de conception

Le concept retenu pour la mesure de la vitesse de l'air consiste en un manomètre en U artisanal. Les dessins de détail et d'assemblage sont disponibles en annexe (Annexe H – Dessins d'ingénierie). Les principales caractéristiques sont les suivantes :

- Manomètre en U mesurant une pression différentielle;
- Composé d'un tube de vinyle flexible replié;
- Supporté par un support en MDF;
- Positionné à la sortie de la veine d'essai;
- Permettant la mesure de pression différentielle par la hauteur de colonnes d'eau;
- Pour des vitesses d'écoulement allant jusqu'à 30 m/s.

Les principales raisons menant à la sélection de cette solution sont:

- Très faible coût, comparativement à un anémomètre ou tube de Pitot;
- Permet d'illustrer le concept de pression ainsi que l'équation de Bernoulli;
- Facilite le transport par sa robustesse et son faible poids.

Ainsi, le concept retenu répond bien aux besoins du client (faible coût, illustration de phénomènes physiques, facilité de transport, disponibilité des matériaux).

3.2.2 Dimensionnement

Afin de produire un système de mesure qui répond aux besoins du client, il faut se pencher sur le dimensionnement du système. Les principales contraintes imposant des dimensions particulières sont :

Vitesse de l'écoulement

Le manomètre permet la mesure de vitesses dans l'intervalle de vitesse généré par le moteur. La hauteur entre les colonnes d'eau pour une vitesse de 30 m/s équivaut à environ 55 mm (la correspondance vitesse – hauteur est donnée à l'annexe D). Comme il est difficile de centrer exactement le niveau d'eau initial dans la zone observable, une marge de 15 mm est ajoutée à la longueur de la zone visible. Elle mesure donc 70 mm.

Disponibilité du tube flexible (diamètre)

Le tube flexible est choisi en fonction de la disponibilité en magasin au moment de la fabrication. La valeur cible de diamètre intérieur est de 1/4". Le support est par la suite ajusté afin de correspondre au diamètre du tube. Dans notre cas, le tube a un diamètre intérieur de 3/16" et

un diamètre extérieur de 5/16". L'épaisseur du support de MDF (1/2"), est choisie de sorte à diminuer l'impact sur l'écoulement tout en restant suffisamment grande pour y fixer le tube.

Flexibilité du tube

Courber le tube sur un rayon de courbure trop petit engendre une déformation de la chambre interne et nuit à la transmission d'énergie. Suite à des tests de flexion, il est déterminé qu'un rayon de courbure de 25 mm, mesuré à partir de la paroi externe, est suffisamment grand pour éviter que le tube ne plie.

Interfaçage avec les autres sous-systèmes

La forme du support dépend de la position du système et donc de l'interaction entre les sous-systèmes. Par exemple, si le manomètre doit être placé devant la veine d'essai, alors il est nécessaire de percer la paroi de plexiglas (ce qui présente des difficultés techniques) et de bloquer une partie de la zone visible. Ainsi, le manomètre est positionné à la sortie de la veine d'essai, où il est facile de l'insérer et de le retirer, ainsi que de prendre des mesures. Le support est conçu de sorte à s'appuyer sur la base de la veine d'essai.

3.2.3 Calcul de la hauteur de colonne d'eau

Dans cette section, le calcul type de la hauteur de colonne d'eau correspondant à une vitesse est donné. Le positionnement des deux tubes du manomètre (respectivement parallèle et perpendiculaire à l'écoulement) en fait un tube de Pitot, mesurant la différence de pression entre les pressions statique et dynamique¹.

Rappel des hypothèses :

- La masse volumique de l'air est constante à travers la soufflerie;
- La densité standard² de l'air au niveau de la mer est $\rho_{\text{air}} = 1,225 \text{ kg/m}^3$;
- Le débit massique est conservé à travers l'écoulement;
- L'air ne subit aucun transfert de chaleur.

L'équation de Bernoulli est :

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{cte}$$

On peut réarranger les termes pour obtenir :

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

où les points 1 et 2 sont deux points de l'écoulement, tels que le point 1 est celui qui nous intéresse, et le point 2 est choisi de sorte à ce que $v_2=0$. On peut isoler v_1 dans l'équation :

$$v_1 = \sqrt{\frac{2(p_2 - p_1)}{\rho_{\text{air}}}}$$

Nommons Δp le terme p_2-p_1 . Δp correspond à la différence de pression des colonnes d'eau dans le tube du manomètre. Cette pression est donnée par la formule de pression hydrostatique :

$$\Delta p = \rho_{\text{eau}}g\Delta h$$

où g est l'accélération gravitationnelle, et ρ_{eau} la densité de l'eau, ou de tout autre fluide utilisé dans le manomètre. Ainsi, en remplaçant dans l'équation de Bernoulli :

$$v_1 = \sqrt{\frac{2\rho_{\text{eau}}g\Delta h}{\rho_{\text{air}}}}$$

Cette équation permet de calculer la vitesse en fonction de la différence de hauteur mesurée entre les colonnes d'eau. Pour dimensionner le manomètre, on s'intéresse plutôt à Δh comme fonction de v_1 :

$$\Delta h = \frac{v_1^2\rho_{\text{air}}}{2g\rho_{\text{eau}}}$$

On constate que Δh augmente avec le carré de la vitesse. Cette fonction est représentée graphiquement en annexe (Annexe D).

3.2.4 Répercussions du choix de concept

Le concept de manomètre en U a de nombreuses répercussions. Le choix de concept a une influence sur les éléments avec lesquels le manomètre interagit, principalement la veine d'essai.

La base de la veine d'essai est adaptée à la forme du support à manomètre. Celui-ci vient s'accoter contre deux de ses parois, et la base sert également de fixation au support. Les dimensions du bloc de support sont ajustées de sorte à ce que le tube arrive à la hauteur médiane de la veine d'essai.

Au niveau du maintien structurel, le manomètre a un très faible impact car il ne reprend aucun chargement. Les seuls efforts sont internes et servent à maintenir le tube dans la position voulue.

Le manomètre est placé à la sortie de la veine d'essai pour éviter de perturber l'écoulement en amont du profil d'aile à tester.

Globalement, le manomètre est conçu avec les autres systèmes en tête et avec pour objectif de minimiser son impact sur les autres sous-systèmes.

3.2.5 Dessins de détail et d'assemblage

Le manomètre est constitué de deux pièces: le support et le tube en U. Les dessins du support et de l'assemblage sont disponibles en annexe (Annexe H).

Pour être fonctionnel, le tube doit également être à moitié rempli d'eau. Il est également possible d'utiliser un autre liquide, puisque Δh varie en fonction de la densité du liquide utilisé. La ligne de niveau de l'eau doit arriver au milieu de la zone visible. L'utilisation de colorant augmente la visibilité de la différence de hauteur.

RÉFÉRENCES

-
- [1] The Engineering ToolBox. *Pitot Tubes* [En ligne]. Disponible : http://www.engineeringtoolbox.com/pitot-tubes-d_612.html, [Consulté le 6 avril 2014]
- [2] International Civil Aviation Organization, Langley Aeronautical Laboratory. *Standard Atmosphere – Tables and Data for Altitudes to 65,800 Feet* [En ligne]. Disponible: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a278141.pdf>, [Consulté le 6 avril 2014]

Chapitre 4

FABRICATION ET ESSAIS

Dans ce chapitre, le processus de fabrication de la soufflerie finale est présenté. Il fait également mention des différentes étapes et les changements apportés au plan de travail. Puis, les différents essais sur les moteurs et la soufflerie finale sont abordés.

4.1 ESSAIS SUR LES MOTEURS

Dans le chapitre 3, il a été spécifié qu'un moteur d'aéromodélisme a été adopté comme solution finale. Toutefois, des tests ont été effectués sur d'autres moteurs avant d'en arriver à cette solution. Cette section rapporte donc les différents tests effectués.

La solution proposée à l'étude de cas précédente était un ventilateur aspirant l'air dans la soufflerie. Un **premier moteur** est acheté : le ventilateur 18 pouces Uberhaus Pro FE45-H1. Des tests, dont les résultats se sont avérés infructueux avec une vitesse maximale de seulement 7 m/s, permettent de conclure qu'il faut envisager une nouvelle solution pour rivaliser avec les autres compagnies.

À la séance suivante, l'achat d'un **deuxième ventilateur** confirme que l'option de souffler l'air est plus efficace qu'aspirer l'air dans la veine d'essai. Ce nouvel engin, le ventilateur 24 pouces caréné, de marque CoolWorks, n'est toutefois pas bien plus performant que le premier avec ses 8.5 m/s et 6.7 m/s directement devant et à 10 pouces du grillage respectivement (résultats plus détaillés en annexe C). Cependant, les tests ayant cette fois été réalisés (en plus de directement devant le ventilateur) à la sortie d'une tuyère en bois pressé utilisée par une autre équipe l'an dernier, l'équipe réalise la présence considérable d'un effet de refoulement causé par une tuyère de pente trop élevée. Cette remarque est très importante pour la suite de la fabrication.

À la réunion suivante, une nouvelle solution est proposée et un **moteur d'aéromodélisme** est apporté à la séance 11. Ce dernier est plus bruyant, mais génère une vitesse d'écoulement d'air beaucoup plus importante. Testé sans tuyère, il souffle l'air jusqu'à une vitesse de 15 m/s, puis 13.9 m/s avec la tuyère de *Coroplast* (pente de seulement 7 degrés pour minimiser le refoulement). Cette solution est donc retenue pour la soufflerie finale.

4.2 FABRICATION DU SYSTÈME DE GÉNÉRATION D'UN FLUX D'AIR

La fabrication du concept final consiste en plusieurs étapes réalisées parallèlement ou en série par l'équipe, selon la priorité des pièces à construire. Les sous-ensembles se présentent comme suit.

4.2.1 Redresseur

Le redresseur, permettant l'écoulement laminaire, est initialement formé d'un cadre de MDF et de pailles collées à l'époxy. Le cadre, formé de deux montants qui s'attachent à la veine d'essai et de deux traverses rectangulaires, est découpé à l'aide d'une scie à ruban. C'est en commençant à découper et à coller les pailles à l'intérieur du cadre que l'équipe se rend compte que ce travail prendra trop de temps et qu'il vaut mieux trouver une autre solution (voir calcul des pailles en annexe E). La deuxième solution est d'empiler des plaques de *Coroplast* de 1½ po et de les insérer dans le cadre, ce qui est aussi très efficace pour redresser un écoulement. Le problème rencontré, selon le professeur Lemarquis, est que cette option bloque grandement le flux d'air et diminue ainsi sa vitesse d'environ 25%. Finalement, une autre idée est adoptée : un assemblage de 9 plaques de *Coroplast* verticales par 9 horizontales s'emboîtant grâce à des demi-fentes formant un échiquier redresseur léger et efficace.

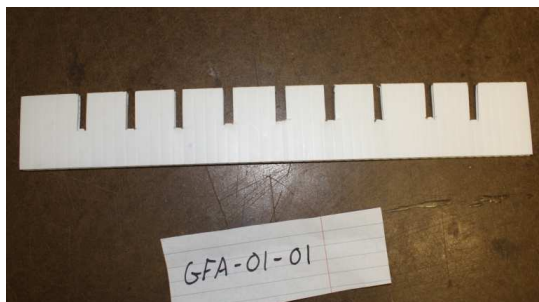


Figure 4.1. Pièce GFA-01-01

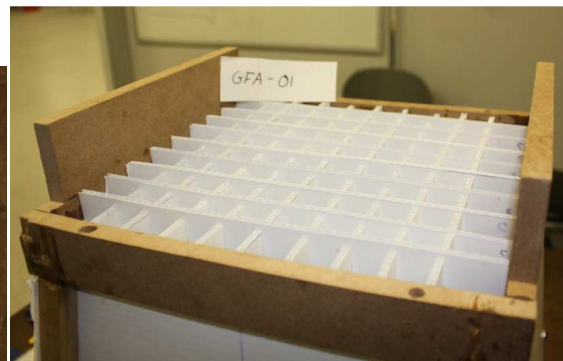


Figure 4.2. Sous-assemblage GFA-01 final

4.2.2 Tuyère

La tuyère est d'abord composée de 4 plaques de *Coroplast* trapézoïdales qui sont coupées à la tranche après avoir été marquées avec un crayon et une règle. Ensuite, quatre longerons de peuplier, fixés sur les plaques du haut et du bas, sont d'abord coupés et collés à ces dernières,

puis boulonnés aux plaques de côté à raison de trois vis par longeron, formant la tuyère finale. L'intention primaire était d'uniquement visser, mais la fragilité des longerons a forcé l'équipe à utiliser l'époxy pour les liaisons aux plaques supérieures et inférieures. La tuyère est ensuite sablée aux extrémités pour palier à l'angle et collée avec de l'époxy au cadre du redresseur.



Figure 4.4. Boulonnage des longerons GFA-02-03 **Figure 4.3.** Sous-assemblage GFA-02 final

4.2.3 Moteur

Le moteur comprend plusieurs pièces à assembler, mais une seule à fabriquer : le support. Celui-ci est fait à partir d'une plaque de MDF dans laquelle la forme est découpée à l'aide d'une toupie à arbre fixe. Le moteur est fixé au centre du support par quatre boulons et l'hélice est assemblée à l'arbre avec l'attache fournie à l'achat. Le support du moteur est ensuite collé avec de l'époxy à l'entrée de la tuyère préalablement sablée. Le schéma électrique de l'ensemble d'aéromodélisme est contenu au chapitre 3.

*Toutes les gammes de fabrication et d'assemblage sont incluses en annexe I.



Figure 4.6. Pièce GFA-03-01 Support moteur

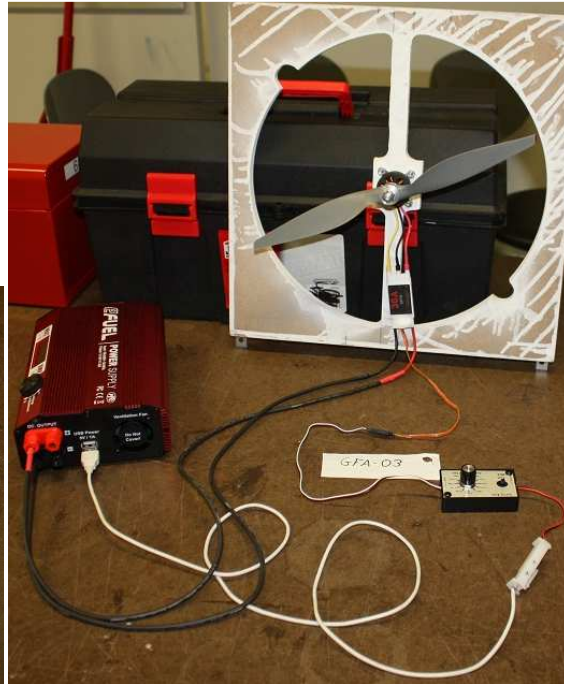


Figure 4.5. Sous-assemblage GFA-03 final

4.3 FABRICATION DU SYSTÈME DE MESURE

Le système de mesure de la vitesse de l'écoulement est constitué de deux composantes : le **support** en MDF et le **tube** flexible en U.

4.3.1 Support en MDF

Le support en MDF est fabriqué selon la gamme de fabrication, incluse en annexe I. Sa principale fonction est de supporter le tube flexible et de lui imposer une forme.

4.3.2 Tube flexible en U

Le tube flexible est en vinyle et s'achète au rouleau selon des dimensions standard (dans notre cas : 5/16'' X 3/16'' X 20')¹. Pour la fabrication, le seul procédé est de couper le tube à la longueur désirée.

4.3.3 Assemblage du système de mesure

Suite à la fabrication des deux pièces, celles-ci sont assemblées, selon la gamme d'assemblage incluse en annexe I. Le tube flexible est simplement inséré dans l'un des deux trous

supérieurs du support et une forme de U lui est imposée en le glissant à travers les autres trous. Après l'avoir maintenu en place, il faut le remplir d'eau pour pouvoir prendre des mesures.

4.3.4 Sensibilité du système de mesure

Le système de mesure est sensible aux variations de pression, mais sa précision est limitée.

En faisant de rapides et simples essais, comme en soufflant dans le tube ou en approchant le manomètre d'une source de vent (ventilateur), on observe facilement une variation du niveau d'eau. En soufflant, le niveau varie constamment, car la vitesse du souffle n'est pas constante. Ainsi, il en découle que le manomètre est sensible aux variations de pression, et varie rapidement avec la vitesse. Si l'écoulement est très turbulent, la lecture pourrait être imprécise en raison des fréquentes variations.

En ce qui concerne la précision des mesures, le principal problème est la grandeur de la variation de hauteur. Pour une vitesse d'écoulement de 5 m/s, la variation de hauteur correspondante est de l'ordre du millimètre. Compte tenu de la distance horizontale entre les colonnes d'eau, une petite variation est difficile à lire précisément. Comme la différence de hauteur varie avec le carré de la vitesse, le système de mesure devient plus précis pour de grandes vitesses. Par exemple, pour une vitesse de 10 m/s, la différence de hauteur correspondante est de 6 mm, et pour une vitesse de 25 m/s, Δh est d'environ 38 mm. La correspondance est donnée graphiquement en annexe D.

Donc, les facteurs déterminants pour la précision du manomètre sont :

- Erreur de parallaxe;
- Grandeur de la vitesse réelle de l'air;
- Variation de la vitesse de l'air;

Pour corriger la faible précision à basse vitesse, on peut remplacer l'eau par un liquide de densité plus faible (huile, alcool), ce qui augmente la différence de hauteur pour une pression (ou vitesse) donnée. Par exemple, pour de l'alcool ($\rho_{\text{alcool}} = 785 \text{ kg/m}^3$), la hauteur correspondant à $v = 15 \text{ m/s}$ passe d'environ 14 mm à environ 18 mm. Nous n'avons pas fait de test avec d'autres liquides.

4.4 INTERFAÇAGE AVEC LES AUTRES SOUS-SYSTÈMES

L'interfaçage entre les sous-systèmes de la soufflerie assure le fonctionnement désiré et facilite l'assemblage. L'interfaçage peut être étudié séparément pour le système de génération de flux d'air et le système de mesure.

4.4.1 Système de génération d'un flux d'air

Pour assembler la tuyère avec la veine d'essai, l'équipe utilise le cadre du redresseur. Celui-ci est percé sur ses parties supérieures et inférieures pour y insérer des gougeons de bois et de la colle qui maintiennent l'assemblage en place. Pour s'assurer de la stabilité, les montants qui dépassent du cadre viennent se glisser de part et d'autre des panneaux de *Plexiglas* de la veine d'essai.

4.4.2 Système de mesure

Le système de mesure de la vitesse est conçu de sorte à limiter son impact sur les autres sous-systèmes. Les trois sous-systèmes avec lesquels le manomètre peut interagir sont : le système de génération de flux d'air, de maintien structurel et de mesure de portance.

Génération de flux d'air

Le système de mesure fait partie du système de génération de flux d'air. Les dimensions sont ajustées de sorte à mesurer des vitesses contenues dans la plage de vitesse générées par le moteur. De par son positionnement, l'interfaçage entre ces systèmes est quasi nul : le système a simplement besoin d'un flux d'air pour pouvoir le mesurer.

Maintien structurel

Le système de mesure ne reprend aucun chargement et ainsi ne contribue pas au maintien de l'ensemble. Ses dimensions sont ajustées de telle sorte que le tube et le bas du support sont surélevés afin d'éviter de supporter la veine d'essai. Sa position évite d'avoir à percer dans le *Plexiglas* qui constitue les parois de la veine d'essai. Le manomètre doit être fixé à la veine d'essai, ce qui implique de percer et visser dans la base.

Mesure de portance

Le système de mesure est placé à la sortie de la veine d'essai afin d'éviter de générer des turbulences en amont du profil d'aile. Les dimensions sont choisies de sorte à minimiser l'impact sur la zone utilisable; le tube en utilise le moins possible. L'interfaçage entre ces systèmes est minimal.

4.5 ESSAIS SUR LA SOUFFLERIE ASSEMBLÉE

Une fois tous les sous-systèmes assemblés et la soufflerie fonctionnelle, les essais finaux sont réalisés. L'équipe de mesure de portance y installe un profil-test et la vitesse mesurée dans la veine d'essai à l'aide d'un anémomètre numérique, derrière le profil d'aile, est de 10 m/s. On y mesure pour le profil d'essai une portance de 300 g sur la balance numérique. Un tableau plus détaillé des données obtenues par l'équipe de portance est fourni dans l'annexe B.

RÉFÉRENCES

-
- [¹] RONA. *Tuyau de vinyle* [En ligne]. Disponible : <http://www.rona.ca/fr/tuyau-de-vinyle-06795463>, [Consulté le 6 avril 2014]
- [²] The Engineering ToolBox. *Liquids – Densities* [En ligne]. Disponible : http://www.engineeringtoolbox.com/liquids-densities-d_743.html, [Consulté le 6 avril 2014]

Chapitre 5

TABLEAU SYNTHÈSE

Tableau 5.1. Synthèse des pièces et des assemblages de la génération d'un flux d'air

Qté/ GFA- 03-01	Qté/ GFA- 04	Qté/ GFA- 03	Qté/ GFA- 02	Qté/ GFA- 01	Qté/ GFA	Qté total	Nomenclature	Nom d'item	Matériau	Coût unitaire (\$)	Coût total (\$)	Poids unitaire (g)	Poids Total (g)	Hauteur (mm)	Largeur ou diamètre (mm)	Profondeur ou longueur (mm)
					X	1	GFA	Génération flux d'air assy	N/A	319,84	319,84	5049	5049	393	1260	766
				X	1	1	GFA-01	Redresseur assy	N/A	3,91	3,91	840	840	276	286	88
			X		1	1	GFA-02	Tuyère assy	N/A	10,71	10,71	920	920	387	400	360
		X			1	1	GFA-03	Moteur assy	N/A	297,84	297,84	2438	2438	368	580	710
	X				1	1	GFA-04	Manomètre assy	N/A	0,58	0,58	172	172	198	165	13
X		1				1	GFA-03-01	Support moteur sub- assy	N/A	62,15	62,15	655	655	76	355	355
				9		9	GFA-01-01	Redresseur vertical	Coroplast	0,08	0,73	7	64	37	258	4
				9		9	GFA-01-02	Redresseur horizontal	Coroplast	0,08	0,69	7	61	36	250	4
				2		2	GFA-01-03	Montant	MDF	0,17	0,33	190	381	88	250	13
				2		2	GFA-01-04	Traverse	MDF	0,08	0,16	105	209	38	286	13
			2			2	GFA-02-01	Panneau vertical	Coroplast	1,27	2,54	90	179	388	385	4
			1			1	GFA-02-02A	Panneau horizontal haut	Coroplast	1,19	1,19	84	84	395	354	4
			1			1	GFA-02-02B	Panneau horizontal bas	Coroplast	1,19	1,19	84	84	395	354	4
			4			4	GFA-02-03	Structure tuyère	Peuplier	0,05	0,19	43	172	18	400	13
1						1	GFA-03-01-01	Support moteur	MDF	0,95	0,95	400	400	355	355	13
	1					1	GFA-04-01	Support tube	MDF	0,18	0,18	117	117	188	129	13
		1				1	GFA-STD-017	Contrôleur	Électronique	50,00	50,00	75	75	7	78	25
		1				1	GFA-STD-018	Servo-testeur	Électronique	43,69	43,69	25	25	31	66	41
		1				1	GFA-STD-019	Transformateur ac/dc	Électronique	140,00	140,00	1670	1670	64	233	140
		1				1	GFA-STD-020	Câble usb	Électronique	2,00	2,00	13	13	4	8	15
1						1	GFA-STD-021	Moteur	Électronique	45,00	45,00	125	125	63	49	49
4						4	GFA-STD-022	Vis à boulon	Acier	0,10	0,40	10	40	N/A	3	25
8						8	GFA-STD-023	Écrou	Acier	0,10	0,80	5	40	2	5	N/A
1						1	GFA-STD-024	Hélice	Plastique	15,00	15,00	50	50	11	305	20
	1					1	GFA-STD-025	Tube de vinyle	Vinyle	0,30	0,30	50	50	N/A	8	300
			12			12	GFA-STD-026	Vis à cloison sèche	Acier	0,10	1,20	13	156	N/A	3	15
			24			24	GFA-STD-027	Rondelle	Acier	0,10	2,40	5	120	2	12	N/A
			1	1	1	3	GFA-STD-028	Colle epoxy	Epoxy	2,00	6,00	125	375	N/A	N/A	N/A
					8	8	GFA-STD-029	Vis à bois	Acier	0,10	0,80	13	104	N/A	3	15
					4	4	GFA-STD-030	Plate 2 trous	Aluminium	0,25	1,00	50	200	2	51	13
					1	1	GFA-STD-031	Duct tape	Duct tape	2,00	2,00	125	125	1	35	N/A
	1					1	GFA-STD-032	Broche	Acier	0,10	0,10	5	5	11	11	5
					1	1	GFA-STD-033	Grillage	Acier	1,00	1,00	125	125	400	380	4
Total										319,84	319,84	Total	5049			

CONCLUSION

En conclusion, le travail consiste en la conception du système de génération d'un flux d'air ainsi que du système de mesure des caractéristiques de l'écoulement. Cette étude fait suite à la définition des besoins du client et à la génération de solutions possibles à ces besoins. Les objectifs déterminés au cours des deux premières études de cas ont été atteints.

La première étape est de revenir sur la solution proposée dans la deuxième étude de cas et de l'adapter aux solutions des deux autres équipes de la compagnie. Il est ensuite requis d'émettre des hypothèses et des suppositions quant à la génération d'un flux d'air dans la soufflerie. Dans l'étape subséquente, le concept retenu est analysé au niveau des efforts externes et internes. Le système de génération d'un flux d'air est alors défini à partir de la vitesse de l'écoulement d'air dans la veine d'essai. Le système de mesure des caractéristiques de l'écoulement est lui aussi étudié à cette étape. Enfin, la fabrication du prototype est discutée et les difficultés rencontrées sont relevées. Un tableau synthèse des composantes de la soufflerie complète l'étude.

Plusieurs difficultés sont rencontrées lors de la sélection d'un système de génération d'un flux d'air. Trois solutions ont été envisagées; les deux premières ont été jugées insatisfaisantes en vue des critères communiqués par les enseignants et des résultats obtenus par les autres compagnies. La troisième solution, qui a été retenue, est la solution la plus adéquate par rapport aux besoins du client et à la fabrication.

Le système de génération d'un flux d'air fabriqué est constitué d'un moteur d'aéromodélisme couplé à une tuyère et à un redresseur. Le système de mesure des caractéristiques de l'écoulement d'air, quant à lui, consiste en un manomètre artisanal agissant comme un tube de Pitot.

Il s'agit maintenant d'effectuer des essais en vue de déterminer les performances aérodynamiques de la soufflerie. Le client pourra alors juger de la soufflerie qui correspond le plus à ses besoins.

ANNEXE A – FACTURE



Équipe N° 2 Soufflerie H14 INC.

FACTURATION DE L'ÉTUDE DE CAS N° 3

Nos souffleries sont les meilleures en ville!

POUR	Éric Morissette, agent de développement pédagogique Centre de développement pédagogique pour la formation générale en science et technologie 300, rue Sicard, bureau 1.55 Sainte-Thérèse (Québec), J7E 3X5
-------------	---

DÉTAILS	DATE DU BON DE TRAVAIL	DEMANDÉ PAR	SERVICE	FACTURE N°	CONDITIONS
	8 avril 2014	J.-P. Lemarquis	Ingénierie	3	Aucunes

FACTURATION	DESCRIPTION DU TRAVAIL	HEURES	TAUX HORAIRE	MONTANT
	Administration	57,00	50,00 \$	2 850,00 \$
	Conception et rédaction technique	173,00	100,00 \$	17 300,00 \$
	Sous-total			20 150,00 \$
	Taxes			3 017,46 \$
	Port & manutention			0,00 \$
	Autre			0,00 \$
	TOTAL			23 167,46 \$

Votre satisfaction et votre soufflerie sont notre priorité !

CONTACTEZ-NOUS	ADRESSE :	2500, chemin de Polytechnique Montréal (Québec), H3T 1J4
	TÉLÉPHONE :	514-340-4711

ANNEXE B – TESTS SUR UN PROFIL D’AILE DE PRATIQUE ET UN CARRÉ STYROMOUSSE

Test	Objet	Angle d’attaque	Portance	Traînée	Grille (moteur)	Plaque de plexiglass	Vitesse de l’air	
#1	Profil test	0°	112g	∅	∅	Défectueuse (trou oblong)	10m/s	
#2	Profil test	0°	125g	∅	∅	Défectueuse (trou oblong)	10m/s	
#3	Carré de styromousse	0°	320g	>2.5N	∅	Avec	10m/s	
#4	Profil test	15°	300g	1.25N	∅	∅	10m/s	
#5	Profil test	15°	∅	1N	Avec	Avec	Non maximale	
#6	Profil test	15°	∅	∅	Avec	Avec	Non maximale	Visibilité de tourbillons et de l’écoulement sur le profil

ANNEXE C – ESSAIS SUR LE VENTILATEUR

INDUSTRIEL 24 PO

Cette annexe présente un tableau des résultats obtenus à la séance 10 avec le ventilateur industriel caréné 24 po. *CoolWorks* pour différents emplacements de prise de mesure.

	Distance (po)	Vitesse mesurée (m/s)
Dans l'axe du ventilateur	10	6.7
	0	8.5
Radiale	13	1.5
	11	2.5
	9	7.1
	7	8.4
	5	7.8
	3	4.8

ANNEXE D – ANALYSE GRAPHIQUE DE Δh

Cette annexe présente graphiquement la hauteur de la colonne d'eau comme fonction de la vitesse de l'air. Les hypothèses utilisées sont :

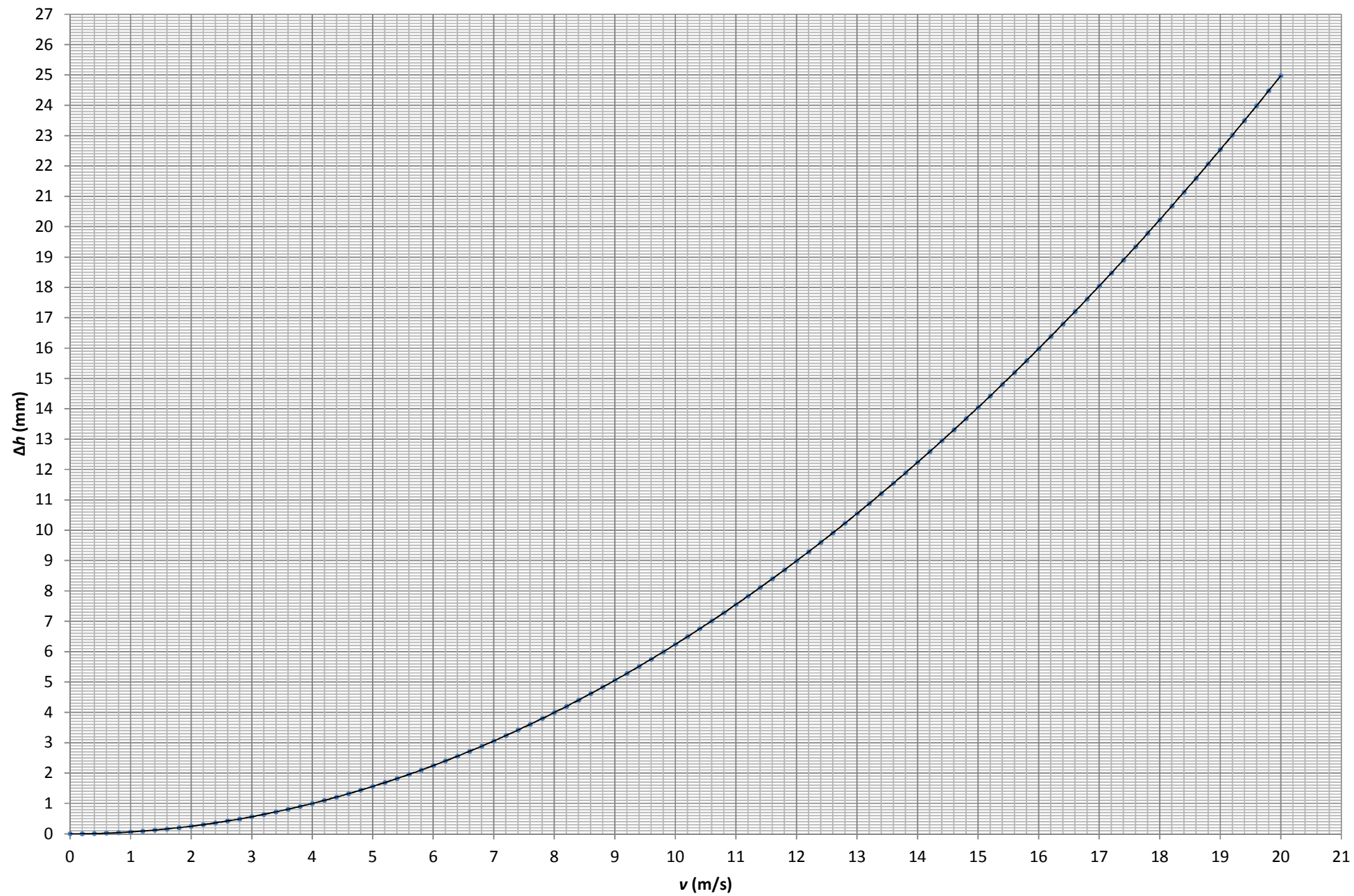
- Densité de l'air constante;
- Densité standard de l'air au niveau de la mer : $\rho_{\text{air}} = 1,225 \text{ kg/m}^3$;
- Densité standard de l'eau : $\rho_{\text{eau}} = 1000 \text{ kg/m}^3$;
- Accélération gravitationnelle : $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

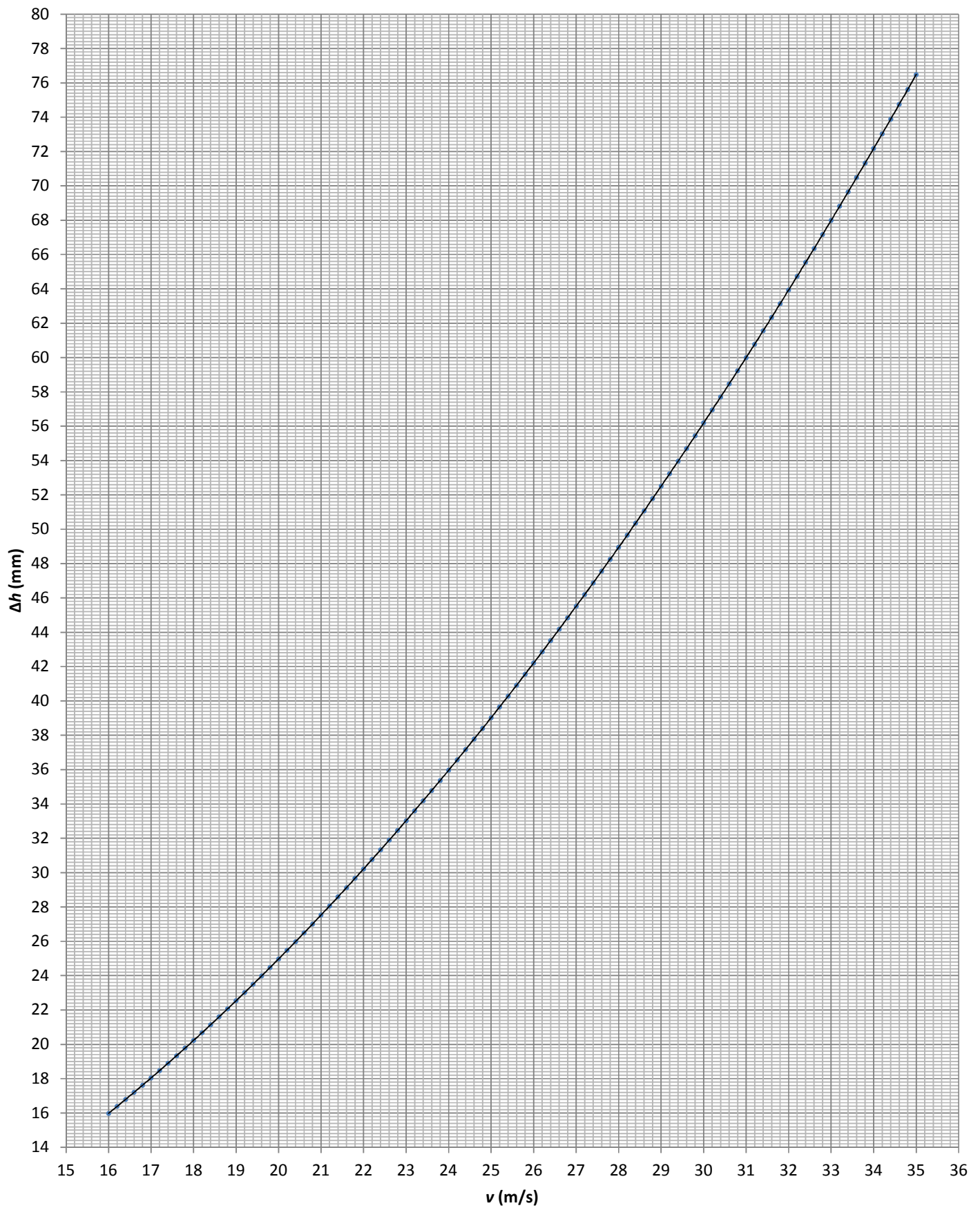
L'analyse est séparée en deux graphiques, l'un pour des petites valeurs de v (0 m/s à 20 m/s) et l'autre pour des grandes valeurs (15 m/s à 35 m/s). Ce choix est motivé par les raisons suivantes :

1. Pour de petites valeurs de v , v croît plus rapidement que Δh ;
2. Pour de grandes valeurs de v , Δh croît plus rapidement que v .
3. Le point de transition ($\Delta h = v$) se situe dans l'intervalle commun, donc dans les deux graphiques;
4. Les valeurs théoriques de vitesse d'écoulement dans la soufflerie sont contenues dans l'intervalle de petites valeurs.

Ainsi, la séparation des graphiques permet une plus grande précision.

Les graphiques sont obtenus dans *Microsoft Excel* en évaluant la fonction à un intervalle de v correspondant à 0,2 m/s.

Graphique D.17 – Δh en fonction de v (petites valeurs de v)

Graphique D.18 – Δh en fonction de v (grandes valeurs de v)

ANNEXE E – CALCUL DU NOMBRE DE PAILLES POUR LE REDRESSEUR

- Le diamètre mesuré d'une paille est de 0,6cm. Donc l'aire occupé par une paille est :

$$A = \frac{\pi}{4} \times d^2 = \frac{\pi}{4} \times 0,6^2 = 0,283 \text{ cm}^2$$

- L'aire du redresseur est :

$$A' = 25^2 = 625 \text{ cm}^2$$

- Une paille contient 5 sections de 1,5 pouces. Donc le nombre de pailles nécessaires à découper pour la fabrication du redresseur est :

$$N = \frac{A'}{A \times 5} = \frac{625}{0,283 \times 5} = 442$$

ANNEXE F – PROGRAMME MATLAB D'ÉTUDE DE LA VITESSE DANS LA VEINE D'ESSAI

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% PROGRAMME : VITESSE D'ÉCOULEMENT DE L'AIR VS SECTION DE LA
% SOUFFLERIE
% COURS : AER1110 PROJET INITIAL EN GÉNIE AÉROSPATIAL
% PROGRAMMÉ PAR : SÉBASTIEN LAGASSÉ
% ÉQUIPE : 02
% DATE : 2014-03-18
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear all;
clc;

% Matrice "Largeur" où des largeurs de veine d'essai sont étalées
% entre 20 cm et 30 cm par incrément de 0,1 cm
Largeur = 0.20:0.01:0.30;

% Entrée des paramètres du moteur
VitesseFan = 15;
DiametreFan = 12*2.54/100;
AireFan = pi/4*DiametreFan^2;

% Calcul du débit volumétrique au niveau du ventilateur
V_dot_Fan = VitesseFan * AireFan

% Calcul des vitesses d'écoulement d'air dans la veine d'essai
% selon la section de la veine d'essai, avec 20% de pertes dans
% le redresseur
VitesseVeine = (V_dot_Fan./Largeur.^2).*0.80;

% Traçage du graphique
plot(Largeur, VitesseVeine, 'LineWidth', 2)
grid on
grid minor
xlabel('Largeur de la veine d''observation (m)')
ylabel('Vitesse de l''écoulement (m/s)')
title('Vitesse de l''écoulement dans la veine d''essai selon sa
largeur')
axis([0.2 0.3 10 25])

```


ANNEXE G – RENCONTRE AVEC ÉRIC MORISSETTE

(2014-03-20)

1. Visite du CDP

Une visite des installations du CDP est effectuée avec monsieur Morissette. On est amené à visiter les bureaux de conception, l'atelier de fabrication, le bureau de dessin et l'entrepôt de matériaux. Les matériaux présents dans cet entrepôt sont représentatifs de ce que les écoles secondaires possèdent. La nécessité d'utiliser des matériaux disponibles, usuels et accessibles est très importante pour les besoins des écoles. Ces matériaux incluent, entre autre, des panneaux de *Coroplast*, divers matériaux plastiques, des panneaux de *Foamcore*, des tubes, des planches de divers bois, etc.

L'un des principaux fournisseurs en matériaux plastiques pour le CDP est le Groupe PolyAlto (anciennement connu sous le nom Plastique Alto). Leurs coordonnées sont les suivantes.

Téléphone : 1 888-506-9600

Site internet : <http://www.polyalto.com/>

Adresse : 4105, rue Hickmore, Montréal (Québec), Canada, H4T 1S5

2. *Coroplast*

Éric et son collègue Michel (dessinateur principal du CDP), nous informe de l'existence d'un couteau spécial pour le *Coroplast*. Cet outil permet d'obtenir de belles coupes longues et droites de qualité sur des panneaux de *Coroplast*. Il serait judicieux d'acquérir un tel outil dans l'éventualité où notre équipe utiliserait ce matériau pour la fabrication de la soufflerie.

3. Science et vulgarisation scientifique

Le but premier du CDP est de rendre la science ludique et accessible à des enfants du secondaire. Les jeunes sont amenés à apprendre et à comprendre la méthode et l'expérimentation scientifique à travers divers outils pédagogiques. Par exemple, les cartes animées montrent des phénomènes physiques grâce au mouvement d'une roue qui transforme le mouvement circulaire en mouvement linéaire. Elles servent d'abord et avant tout à illustrer et à imager un processus scientifique.

D'autres objets ou machines sont montrés lors de la présentation des bureaux du CDP, tels que la démonstration du débit dans un contenant avec une bille. On mesure l'angle que la bille fait avec un point 0 initial. Le tube augmente de hauteur de manière parabolique. Un autre objet consiste en un manomètre fabriqué simplement à l'aide de deux contenants de compote de pomme, d'un plastique de ballon à gonfler, faisant office de diaphragme. Un côté est percé pour qu'on puisse souffler dedans, faisant lever le diaphragme.

4. Présentation du concept de la soufflerie

La présentation de notre projet débute alors. Nous expliquons où nous en sommes rendus et nous montrons des dessins rendus grâce à CATIA de notre modèle de la soufflerie. Dans le cas spécifique de l'équipe génération d'un flux d'air, nous exprimons notre position quant à l'exploration de solutions possibles quant à la source du flux d'air. Les clients se montrent sceptiques quant aux idées d'intégrer un ou plusieurs souffleurs à feuille dans notre projet. Bien qu'ils trouvent l'idée intéressante, ils conçoivent difficilement la mise en œuvre d'un tel procédé de génération d'un flux d'air.

5. Génération du flux d'air : ventilateurs

Éric et Michel prennent alors le temps de nous expliquer leurs projets et leurs tentatives de générer un flux d'air à l'aide de ventilateurs. Ils nous expliquent les limitations auxquelles ils sont arrivés et des phénomènes qu'ils ont pu constater lors du prototypage de leurs expériences. Ils nous montrent aussi des petits objets ayant servi à démontrer divers phénomènes physiques, dont des tubes contenant des redresseurs de type feuilles de carton à bricolage cylindriques agrafées. Certains de ces projets démontraient l'importance du profil d'une aile, ou d'une aube, ou d'une ailette. Un élément intéressant du principe de la mesure de la vitesse de rotation d'un rotor est l'utilisation d'un petit moteur électrique au centre du rotor, il est alors possible de simplement mesurer une différence de potentiel directement aux bornes du moteur.

Dans les projets du CDP, différents types de ventilateurs ont été utilisés. Ceux qui ont retenu notre attention sont ceux qui ont un grand diamètre couplé à un carénage circonférentiel autour de la zone de rotation des pales du ventilateur. Le phénomène de refoulement de l'air est alors grandement diminué, ce qui pourrait améliorer l'écoulement dans un conduit. L'achat d'un tel ventilateur déjà doté de son propre carénage permettrait d'économiser en temps et en énergie de conception d'un carénage sécuritaire et fonctionnel pour un ventilateur standard. Il ne resterait qu'à intégrer le ventilateur à la structure principale du diffuseur pour lequel un support adéquat sera conçu.

Il est à noter que l'utilisation du ventilateur par monsieur Morissette se limitait à position le ventilateur à l'entrée d'un conduit convergent vers une veine. Les résultats d'un tel dispositif sont corrects et intéressants, mais il est inadéquat et inadapté pour un design incluant un système tuyère-diffuseur.

6. Révisions des dimensions de la veine d'essai

Les données telles que la mesure de la veine d'essai ne sont pas fiables en termes de réalité scientifique. Aucune mesure expérimentales n'ont permis de conclure qu'une veine d'essai de la soufflerie de dimension de 30 X 30 X 60 cm seraient idéales. En effet, monsieur Morissette s'est plutôt fié à l'avis d'un collègue, monsieur Éric Sauvé, conseiller pédagogique à la commission scolaire de Laval. Celui-ci avait l'intention de créer sa propre soufflerie avec ces dimensions, mais ne se rapportant sur aucune données concrètes. On peut donc en conclure que cette dimension est flexible et doit être adaptée à des réalités expérimentales, telles que le flux de l'air dans la veine et l'espace nécessaire à la manipulation des objets-tests. Nos calculs ont donc préséance sur cette dimension requise par le client. Après discussion, une dimension de veine de 25 X 25 cm semble réaliste aux yeux de monsieur Morissette.

7. Révision du prix de la soufflerie

La même démarche de discussion est amorcée concernant le prix maximum de 1000\$ associé à la fabrication et à l'assemblage de la soufflerie. Monsieur Morissette nous présente alors le catalogue d'un fournisseur de matériel scientifique pour les écoles. Ce fournisseur est Pro Labec, officiellement homologué par la commission scolaire de Montréal. Le bémol est que ce fournisseur offre du matériel de qualité supérieur qui vaut plusieurs fois le coût d'un objet de la vie courante. En effet, le coût d'une balance de base peut facilement atteindre plusieurs centaines de dollars chez Pro Labec, alors qu'une balance de cuisine domestique peut facilement ne coûter que 20\$. On en conclut que le 1000\$ maximum est un prix fixé arbitrairement sans réelle valeur scientifique. Nous expliquons alors que les écoles ont exprimé que le prix de 1000\$ était beaucoup trop élevé pour leurs moyens. La réduction du coût de la fabrication de la soufflerie est un facteur déterminant dans le succès du projet pour qu'il soit sélectionné par le CDP.

8. Simplification de la soufflerie

D'autres facteurs que l'on ne doit absolument pas perdre de vue : la simplicité de la conception et de la fabrication est primordiale. La priorité doit être donnée à un nombre élevé de pièces semblables et à un assemblage minimum et rapide. Il faut penser au technicien responsable de la fabrication en tout temps lors de la conception de la soufflerie. Le temps de montage,

démontage et de remontage peut grandement influencer le choix d'opter ou non pour la soufflerie. La simplification est le mot d'ordre. Est-il aussi possible d'utiliser la tuyère ou le diffuseur comme boîte de transport? La question de monsieur Morissette est importante. Enfin, comme type d'assemblage rigide, léger et peu cher, on nous propose le *Coroplast* et une planche de bois, vissé avec une rondelle (*washer*). Ce type d'assemblage est facile à réaliser et est relativement léger si on le compare avec des planches de bois pleines (type *presswood* ou *plywood*).

ANNEXE H – DESSINS D'INGÉNIERIE

**ANNEXE I – GAMMES DE FABRICATION ET
D'ASSEMBLAGE**