

# AER1110-PROJET INTÉGRATEUR I

---

Groupe cours no.1

**ÉTUDE DE CAS NO.3:  
Conception finale et fabrication d'une soufflerie**

présenté à :

Jean-Paul Lemarquis, ing. Doyen, Université Bombardier en génie

Patrice Remy, eng., Mechanical Design Advanced Programs

par  
Équipe no. 8

Lemay, Catherine

Léveillé, René

Oltean, Claudiu

Vandal, Donovan

Huynh, Danny

Khalifeh, Elias

Le 8 avril 2014  
à Montréal

Remerciements :

*Nous voulons remercier les équipes 3 et 5 pour leur participation active.*

## Résumé

Le rapport présenté ci-dessous expose les résultats de la troisième étude de cas du projet intégrateur I en génie aérospatial qui consistait à concevoir le système générateur du flux d'air d'une soufflerie qui sera utilisée dans des écoles secondaires au Québec. Il est formé de cinq chapitres suivis des annexes contenant la documentation et les informations supplémentaires nécessaires.

Ce rapport présente la liste des matériaux utilisés pour construire la partie moteur de la soufflerie tout en fournissant les dessins de détails et d'assemblage en plus des gammes de fabrication de chaque composant du groupe moteur de la soufflerie. Ainsi, il présente les calculs détaillés des efforts internes et externes générés par le moteur et le flux d'air traversant la soufflerie. En outre, il dévoile les résultats des tests effectués lors de la construction de la soufflerie ainsi que les analyses scientifiques relatives à chaque résultat. De surcroît, des notions de sécurité lors de l'utilisation de la soufflerie sont présentées dans ce rapport. Aussi, une facture détaillée contenant les tâches accomplies par chaque membre est présentée à la fin du rapport.

Les principaux résultats énumérés dans ce rapport sont les suivants :

- Le support du moteur est formé de deux plaques d'aluminium placées horizontalement dans la tuyère. Le moteur sera fixé à l'aide des vis sur ces deux plaques.
- Les contraintes maximales normales et de cisaillements dans la plaque formant le support du moteur sont respectivement : 10.8 MPa et 0.372 MPa
- Les contraintes normales sur les vis parallèles à la force du moteur : 1.99 MPa
- Les contraintes de cisaillement sur les vis perpendiculaires à la force du moteur : 13.07 MPa
- La mesure de la vitesse se fait à l'aide d'un anémomètre sans fil installé après la section alvéolaire.
- La vitesse maximale du flux d'air (sans la section alvéolaire) : 28.18 m/s
- La vitesse maximale du flux d'air (avec la section alvéolaire) : 25.6 m/s
- Pour des fins de sécurité, il ne faut pas se mettre aux alentours de la tuyère

Mots-clés : Soufflerie, construction, rapport, étude de cas.

## Abstract

The final study of the first year project in the aerospace program consists of the final stages of designing and building a wind tunnel to be used in high schools across the province of Québec. Throughout the chapters, the entire process is thoroughly explained with the appropriate documentation and information.

In order to create a functional and optimal wind tunnel, a number of steps were taken, the identification of the materials needed, the study of their resistance to the forces to which they are subjected. Therefore, these studies are provided in the study as well as all of the technical drawings and the fabrication process and instructions. After the construction finished, the tests had taken place, proving or disproving the hypotheses' made during the conception phase, these tests also gave light to security instructions on how to use the motor.

The main conclusions of the study are:

- The motor frame is made up of two aluminum bars placed horizontally in the converging part of the structure.
- The maximum tensile and bending constraints of the motor frame are respectively 10.8 MPa and 0.372 MPa
- The tensile constraints in the screws holding the motor are 1.99 MPa
- The bending constraints in the screws perpendicular to the motor's force are 13.07 MPa
- The speed measurement is taken by a wireless anemometer installed after the airflow straightener.
- The maximum air speed (without the air flow straightener) is 28.18 m/s
- The maximum air speed (with the air flow straightener) is 25.6 m/s
- For security reasons, persons must not be around and to the side of the converging part of the structure.

*Key words: Wind tunnel, construction, final study, and security.*

## Table des matières

Résumé .....	i
Abstract.....	ii
Liste des tableaux .....	iv
Liste des figures .....	iv
Introduction .....	1
<b>Chapitre 1 : Données conceptuelles et techniques.....</b>	<b>2</b>
1.1 Le concept.....	2
1.2 Du concept au technique .....	3
1.3 Liste de composante .....	4
<b>Chapitre 2 : Calcul des efforts internes et externes .....</b>	<b>7</b>
<b>Chapitre 3 : Fabrication de la Soufflerie .....</b>	<b>10</b>
3.1 Fiche technique du produit.....	10
3.1.1 Génération du flux d'air.....	10
3.1.2 Support du moteur.....	10
3.1.3 Laminarisation du flux d'air.....	11
.....	11
3.2 Fabrication de la soufflerie.....	11
3.2.1 Fabrication de la section alvéolaire .....	11
3.2.2 Assemblage du circuit du moteur .....	13
3.2.3 Fabrication du support du moteur.....	14
<b>Chapitre 4 : Utilisation et sécurité .....</b>	<b>16</b>
4.1 Utilisation .....	16
4.2 Sécurité.....	16
<b>Chapitre 5 : Tests et analyse du flux d'air .....</b>	<b>1</b>
5.1 Valeur théorique et prétest.....	1
5.2 Analyse du prétest .....	2
5.3 Analyse et résultats du test officiel .....	4
<b>Conclusion .....</b>	<b>7</b>
<b>Références.....</b>	<b>8</b>
<b>ANNEXE A : BUDGET .....</b>	<b>1</b>
<b>ANNEXE B : COMPOSANTES .....</b>	<b>2</b>
<b>ANNEXE C : GAMME DE FABRICATION, CIRCUIT DU MOTEUR .....</b>	<b>3</b>
<b>ANNEXE D : GAMME DE FABRICATION, SUPPORT DU MOTEUR.....</b>	<b>4</b>
<b>ANNEXE E : GAMME DE FABRICATION, LINÉARISATEUR DE L'AIR .....</b>	<b>8</b>
<b>ANNEXE F : CONTRAINTES VIS .....</b>	<b>9</b>

<b>ANNEXE G : NOMBRE DE REYNOLDS.....</b>	<b>11</b>
<b>ANNEXE H : VITESSE DU MOTEUR.....</b>	<b>12</b>
<b>ANNEXE I : PRESSION DYNAMIQUE .....</b>	<b>14</b>
<b>ANNEXE J : FICHE ANALYSE EFFORTS INTERNES .....</b>	<b>16</b>
<b>ANNEXE K : CROQUIS INITIAUX .....</b>	<b>17</b>
<b>ANNEXE L : ÉCHÉANCIER .....</b>	<b>23</b>
<b>ANNEXE M : FACTURE .....</b>	<b>24</b>

## **Liste des tableaux**

Tableau 1. Composantes pour le prototype .....	5
Tableau 2. Liste révisée, composantes à acheter.....	5

## **Liste des figures**

Figure 1. DCL d'une barre d'aluminium et sa section.....	7
Figure 2. Moteur électrique et ses composants.....	10
Figure 3. Support du moteur électrique dans la tuyère.....	10
Figure 4a. Section alvéolaire.....	11
Figure 4b. Languette de la section alvéolaire.....	11
Figure 6. Pointe de la languette, vue de profil.....	12
Figure 7. Couleurs correspondantes des phases de l'ESC.....	14
Figure 8. Exemple de trapèze troué.....	15
Figure 9. Zones dangereuses et sécuritaires de la soufflerie.....	16

## **Introduction**

Dans le cadre du projet intégrateur I en génie aérospatial, notre équipe a été mandatée de concevoir une soufflerie qui sera utilisée dans des écoles secondaires au Québec afin de mettre en évidence des concepts physiques enseignés dans le programme du secondaire 4 et 5. Pour ce faire, nous avons rencontré, à plusieurs reprises, notre client principal, M. Éric Morissette, afin de connaître ses besoins et ses exigences.

Durant les études de cas précédentes, nous avons pu analyser les besoins du client afin de pouvoir élaborer la liste qui détermine les fonctions et les caractéristiques de la soufflerie demandée. L'étude de cas 1 avait pour objectif de connaître les besoins du client et d'essayer de trouver les caractéristiques techniques de la soufflerie qui répondent à ces besoins. Dans ce contexte, une maison de qualité a été construite afin de pouvoir visualiser et analyser les relations entre les besoins et les caractéristiques de la soufflerie. Ensuite, à l'étude de cas 2, nous avons mis en place les solutions possibles, c'est-à-dire les différentes configurations et combinaisons possibles que la soufflerie peut avoir, puis à l'aide des outils appropriés, comme la matrice morphologique et la matrice de Pugh, nous avons pu sélectionner la solution qui répond le mieux et de la façon la plus adéquate aux exigences du client. La solution retenue était de générer un flux d'air en utilisant un moteur électrique équipé d'une hélice qui pousse l'air et qui fonctionne à l'aide d'une batterie.

Suite à ces deux étapes, nous avons amorcé le travail de l'étude de cas 3 qui consistait à faire les calculs nécessaires pour pouvoir construire le système générateur du flux d'air de notre soufflerie, en collaborant avec les autres équipes de notre compagnie responsables de la mesure de portance et de la structure de la soufflerie. Ainsi, nous avons appliqué des notions de résistance des matériaux pour connaître en avance les contraintes appliquées aux matériaux utilisés pour s'assurer que ces derniers pourront supporter les efforts qui y sont appliqués.

Dans ce rapport, nous présenterons tous les calculs effectués, ainsi que les croquis et les dessins de détail et d'assemblage de la soufflerie. De plus, ce rapport présente le matériel utilisé lors de la construction de la soufflerie. En outre, nous présenterons les résultats des tests effectués durant et après la construction.

# Chapitre 1 : Données conceptuelles et techniques

## 1.1 Le concept

Suivant l'étude de cas 2, nous avons choisi notre concept de génération du flux d'air qui consistait en l'utilisation d'un moteur d'aéromodélisme et d'une hélice pour générer le flux d'air, d'un nid d'abeille pour le linéariser, d'un anémomètre pour mesurer la vitesse du flux d'air et sa température et d'un baromètre pour mesurer la pression de l'air. Ensuite, il fallait se coordonner avec les équipes 3 et 5 pour discuter de l'interaction entre les différents sous-systèmes, soit la génération du flux d'air, la structure et la mesure de portance. Heureusement, les trois systèmes étaient entièrement compatibles.

Initialement, au niveau de la structure, les dimensions de la veine d'essai allaient être de 40 cm par 40 cm, avec une section convergente à l'avant, et une autre section divergente à l'arrière où serait placé le moteur qui tirerait l'air. Pour ce qui est de la mesure de portance, le support en Y servant à mesurer la portance allait être placé en dessous de la soufflerie, elle-même supportée par des pattes. Le flux d'air n'allait donc pas être affecté par le système de mesure de portance.

Cependant, après discussion, nous avons identifié certains problèmes :

1. Nous voulions brancher le moteur dans une prise électrique du mur. Par contre, les prises électriques sont au courant alternatif (AC) et le moteur fonctionne avec le courant continu (DC).
2. La force d'aspiration du moteur n'était pas suffisante.
3. Si on décidait plutôt de pousser l'air pour avoir plus de puissance, cela allait créer plus de turbulences.
4. La combinaison de la section convergente et divergente alourdit la soufflerie beaucoup trop.
5. Le baromètre et le nid d'abeille sont très dispendieux.

Alors on a trouvé des solutions à chaque problème, respectivement;

1. Les transformateurs de AC à DC pour notre moteur n'étaient pas assez puissants, donc la soufflerie est alimentée par des piles lithium.
2. Le moteur est placé dans la section convergente à l'avant, afin de pousser l'air dans la soufflerie au lieu de l'aspirer.

3. Le linéarisateur d'air est plus épais et contient des alvéoles plus petites afin d'éliminer la turbulence générée par le moteur.
4. Le moteur est placé dans la section convergente afin d'éliminer la section divergente du produit et ainsi réduire le poids total.
5. Nous avons décidé de faire un linéarisateur d'air à la main, pour réduire le coût, et de ne pas installer de baromètre. Une relation mathématique lie la vitesse à pression, donc il sera possible pour les élèves de mesurer la pression à l'aide des mesures de vitesse prises par l'anémomètre. Toutes les informations sur cette relation mathématique se retrouvent à l'annexe I.

Finalement, les dimensions de la veine d'essai ont aussi été modifiées. La veine d'essai mesure donc 30 cm X 30 cm X 60 cm.

## 1.2 Du concept au technique

Une fois la conception finale de la soufflerie adoptée, nous avons fait le choix de nos composants. Pour en arriver à un choix, nous avons comparé le prix, le poids, la qualité et la résistance des matériaux ainsi que la facilité de se les procurer. Nous avons pris en compte ces critères, car les besoins du client, définis lors de l'étude de cas 1, étaient notamment d'avoir une soufflerie non dispendieuse, légère mais robuste, facilement transportable et sécuritaire.

En ce qui concerne le linéarisateur d'air, celui-ci est fait à la main avec du contreplaqué de merisier russe de 1/8 de pouce d'épaisseur. Nos recherches nous ont fait découvrir que l'épaisseur du linéarisateur d'air doit être six fois plus grande que le diamètre des alvéoles<sup>1</sup>. Alors, ayant décidé que nos alvéoles allaient mesurer 1.5 cm par 1.5 cm, l'épaisseur du linéarisateur d'air devait être de 3 pouces et demi.

Ensuite, le support du moteur est constitué de deux barres d'aluminium de 1/8 de pouce d'épaisseur et de 1 pouce de largeur. La longueur nécessaire pour construire le support se retrouve à l'annexe D, dans les dessins détaillés. Ce type de barre d'aluminium se retrouve dans les quincailleries comme Réno Dépôt, Rona, etc. De plus, nous nous sommes procuré un

---

<sup>1</sup>Hernandez, M., Lopez, A., Jazarbek, A. – Design Methodology for a Quick and Low-Cost Wind Tunnel, [En ligne]. Disponible : <http://www.intechopen.com/books/wind-tunnel-designs-and-their-diverse-engineering-applications/design-methodology-for-a-quick-and-low-cost-wind-tunnel> [Consulté le 05-04-2014]

anémomètre mesurant à la fois la vitesse de l'air et sa température par l'entremise du site internet de HobbyKing.

Finalement, pour ce qui est du moteur choisi, ses composantes sont les suivantes :

1. Un moteur Rimfire de diamètre de 5 cm avec un kv de 500 (rpm/V)
2. Une hélice de 15 pouces de diamètre avec un pas de 7 pouce
3. Un ESC (Electronic control system) de 60 à 70 Ampères de Hobby King
4. Un servo tester (potentiomètre) pour contrôler la vitesse du moteur de Hobby King
5. Une pile de type LiPo de 6 cellules à 3000 mA

Tous ces composants ont été achetés et livrés via internet, sur les sites de HobbyKing et de TowerHobbies. Une fois reçus, nous avons rencontré certains problèmes avec quelques-uns des éléments :

1. Les câbles connecteurs du ESC pour le moteur et la pile, n'avaient pas de connecteur attaché, il fallait les souder (connecteurs type bullet).
2. Le ESC n'alimentait pas le servo tester, il fallait un une source d'alimentation supplémentaire (pas de BEC inclus).
3. Les câbles entre le moteur et le ESC n'étaient pas assez longs pour sortir le ESC de la tuyère pour réduire le nombre d'obstacles au flux d'air.

Heureusement, en collaborant avec les autres équipes de la compagnie, nous avons pu régler ces problèmes à l'aide d'un fer à souder d'étain et d'une petite pile pour alimenter le servo tester, deux éléments appartenant à un membre de la compagnie. Pour la longueur des câbles, nous avons construit nous-mêmes les rallonges avec des câbles électriques et des attaches supplémentaires. Une fois tout intégré, le sous-système du flux d'air a fonctionné sans problème.

### **1.3 Liste de composante**

Avec les imprévus des composantes électriques, l'équipe a créé une liste d'éléments qui ont été achetés pour le prototype ainsi qu'une liste finale révisée pour un produit final construit par le client. Le tableau 1 montre la liste des composantes achetées par l'équipe pour le prototype tandis que le tableau 2 démontre les ajouts pour le produit final de façon à ce que la soufflerie

fonctionne parfaitement sans problème de construction. Le ESC a été changé pour qu'il alimente le servo tester, et les connecteurs et les rallonges sont quelques-uns des éléments ajoutés.

**Tableau 1. Composantes pour le prototype**

Nom	poids	dimensions	autre information	Nombre	prix (avant taxe et frais de poste)(\$)
Great Planes Rimfire .80 50-55-500 Outrunner Brushless	298 g (11,5 oz)	50 mm ø 55 mm Long axe 8mm ø axe 20 mm long	65 Ampères max 1154 W constant 18,5 à 22,2 V (5-6S LiPo) 500 RPM/V	1	99,98
APC 15x7 Thin Electric Propeller	69 g	15 po (38 cm) Pas de 7 po	trou d'axe ajustable, 3,2 à 8 mm	1	5,19
Hobbyking SS Series 60-70A ESC	63g	55x35x8 mm	4 à 8S LiPo Max 60 A constant	1	16,51
Hobbyking LED Servo Tester	14 g	50x12x30 mm	4,8 à 6 V DC	1	5,92
Turnigy 3000mAh 6S 35C Lipo Pack	514 g	139x43x39 mm	3000mA 22.2v 6cell connecteur de charge: JST-XH	au choix (environ 10 minutes par charge)	51,66
Hobbyking Digital Anemometer	146 g	S/D	0 à 30 m/s -10 à 45 Celsius m/s, km/h, ft/min, Knots, mph	1	17,16
Hobbyking ECO SIX 80W 6A 2-6S Battery Balance Charger AC/DC w/PSU	490 g	135x61x112 mm	jusqu'à 6 Cells LiPo à partir d'une prise AC normale équilibre de la charge des cellules	1	29,4
MERISIER RUSSE 1/8" X 30" X 60" (3 PLIS)	S/D	1/8x30x60 po	Magasin Montréalais	1	5,95
Barre plat aluminium		1X1/8 po	Réno Dépôt	1	12,59
Equerre angle		3/4" X 1/2"	Réno Dépôt	9	2,61
Vis		6/32 " X 1/2"	Réno Dépôt	6	0,48
Écrous		6/32"	Réno Dépôt	6	2,4
Vis		8/32" X 5/8"	Réno Dépôt	10	0,8
Écrous		8/32"	Réno Dépôt	10	1,9

**Tableau 2. Liste révisée, composantes à acheter**

Nom	poids	dimensions	autre information	Nombre	prix (avant taxe et frais de poste)(\$)
Great Planes Rimfire .80 50-55-500 Outrunner Brushless	298 g (11,5 oz)	50 mm ø 55 mm Long axe 8mm ø axe 20 mm long	65 Ampères max 1154 W constant 18,5 à 22,2 V (5-6S LiPo) 500 RPM/V	1	99,98
APC 15x7 Thin Electric Propeller	69 g	15 po (38 cm) Pas de 7 po	trou d'axe ajustable, 3,2 à 8 mm	1	5,19
Hobbyking Digital Anemometer	146 g	S/D	0 à 30 m/s -10 à 45 Celsius m/s, km/h, ft/min, Knots, mph	1	17,16
Hobbyking ECO SIX 80W 6A 2-6S Battery Balance Charger AC/DC w/PSU	490 g	135x61x112 mm	jusqu'à 6 Cells LiPo à partir d'une prise AC normale équilibre de la charge des cellules	1	29,4
MERISIER RUSSE 1/8" X 30" X 60" (3 PLIS)	S/D	1/8x30x60 po	Magasin Montréalais	1	5,95
Turnigy Servo Tester		49x43x29 mm	4,8 à 6v fait moins cheap que l'autre	1	5,99
4mm Male/Female Bullet Brushless Motor Extension Lead 250mm	26g	250 mm	extension entre moteur et ESC	1 pack de 3	3,32
hobbico Soldering Iron 60 Watt			pour souder	1	7,99
Turnigy 5mm Heat Shrink Tube Yellow (1mtr)		1 m	jaune	1	0,35
Turnigy 5mm Heat Shrink Tube - RED (1mtr)		1m	rouge	1	0,35
Turnigy 5mm Heat Shrink Tube - BLACK (1mtr)		1m	noir	1	0,35
De-soldering Braid 2.5mm/1.5m		1,5m x 2,5mm	metal à souder	1	1,36
Turnigy 3000mAh 6S 35C Lipo Pack	514 g	139x43x39 mm	3000mA 22.2v 6cell connecteur de charge: JST-XH	au choix (environ 10 minutes par charge)	51,66
HXT 4mm Gold Connector w/ Protector (10pcs/set)			avec Turnigy 3000mAh 6S 35C Lipo P	1 pack de 10	4,46
Hobbyking SS Heli Series 70-80A ESC w/UBEC	80 g	90x39x17 mm	UBEC 5A	1	17,15
Barre plat aluminium		1X1/8 po	Réno Dépôt	1	12,59
Equerre angle		3/4" X 1/2"	Réno Dépôt	9	2,61
Vis		6/32 " X 1/2"	Réno Dépôt	6	0,48
Écrous		6/32"	Réno Dépôt	6	2,4
Vis		8/32" X 5/8"	Réno Dépôt	10	0,8
Écrous		8/32"	Réno Dépôt	10	1,9

Le budget concernant le système générateur du flux d'air se trouve à l'annexe A. Le montant total, avant taxes, nécessaires à la construction de ce système est de 321, 67\$, ce qui nous semble raisonnable compte tenu que notre client, M. Morissette, nous avait mentionné un montant maximal de 1000\$ pour la soufflerie complète.

Tous les croquis et dessins détaillés du système générateur du flux d'air se retrouvent aux annexes C, D, E et K.

## Chapitre 2 : Calcul des efforts internes et externes

Cette partie vise à étudier les efforts internes et externes dans les composants responsables de la génération du flux d'air de la soufflerie et dans leurs interfaces avec la structure générale.

D'abord, nous avons posé l'hypothèse selon laquelle les pièces susceptibles d'avoir des contraintes normales et de cisaillement plus grandes sont celles qui tiennent le moteur en place et qui le fixent à la structure générale. L'étude de la résistance des matériaux portera donc sur ce sous-ensemble structural. Tous les calculs détaillés se retrouvent à l'annexe J.

Hypothèse : la force maximale créée par le moteur et appliquée sur les composants sera d'au plus 9 livres, soit environ 40 Newtons. Cette hypothèse provient de certaines expérimentations faites par la société *Avion Cargo*, dans le cadre de leur projet.

- **Contraintes normale et de cisaillement sur les barres d'aluminium, dues à l'effort tranchant et au moment fléchissant**

Hypothèse : la force est appliquée un point, au centre des barres d'aluminium.

De plus, après avoir consulté Monsieur Denis Julien, professeur de l'École Polytechnique de Montréal qui enseigne la matière « Résistance des matériaux », nous avons décidé d'analyser le problème à l'image d'une poutre soumise à des efforts tranchants et des moments fléchissants. Pour nos calculs, nous n'avons considéré qu'une seule barre d'aluminium.

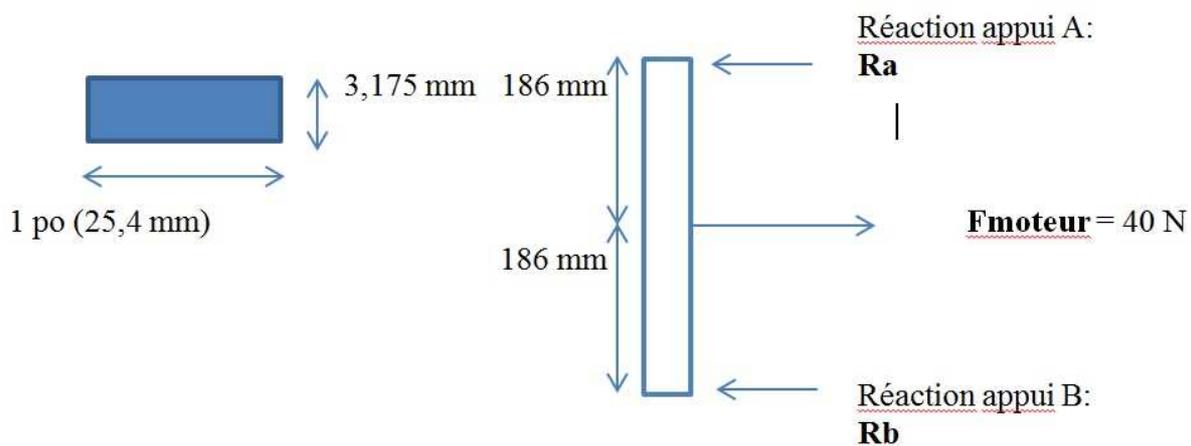


Fig 1. DCL d'une barre d'aluminium et sa section

La longueur de la poutre est d'environ 37 cm. Il s'agit d'une longueur moyenne, car les extrémités réelles de la barre sont en angle, de manière à s'ajuster à la tuyère.

1- Réactions aux appuis Ra et Rb :

Les réactions aux appuis ont été trouvées grâce aux équations d'équilibre suivantes : somme des moments de force au point A et somme des forces en x. Les forces Ra et Rb valent toutes deux 20 N, et leur sens est contraire à celui de la force du moteur.

Avec ces valeurs, nous avons pu tracer le diagramme des efforts tranchants et des moments fléchissants (voir annexe J). Il est possible de constater que l'effort tranchant maximal auquel la barre d'aluminium pourra être soumise, selon nos hypothèses, est 20 N. En ce qui concerne le moment fléchissant maximal, il est de 3,1 Nm.

2- Contrainte normale et contrainte de cisaillement maximales

Après avoir calculé le second moment de la section ( $I_z = 4335,7 \text{ mm}^4$ ), nous avons pu calculer les contraintes maximales de la section.

$$\sigma_{\text{max}} = 10,8 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\text{max}} = 0,372 \text{ MPa}$$

Ces deux valeurs sont nettement inférieures aux valeurs permises dans l'aluminium Al 6061-T6. En effet, la contrainte normale permise est d'environ 310 MPa ('Ultimate tensile strength')<sup>2</sup>. Nous avons posé l'hypothèse selon laquelle la contrainte de cisaillement de 0,372 MPa était aussi inférieure aux limites de l'aluminium, compte tenu de sa très faible valeur. Nous n'avons pu trouver la documentation donnant le chiffre exact de la contrainte maximale en cisaillement de l'aluminium Al 6061-T6.

• **Contraintes normales sur les vis parallèle à la force du moteur (vis A)**

$$\sigma_{\text{vis max}} = \frac{F_{\text{max}}}{A} = \frac{40 \text{ N}/4}{5,03} = 1,99 \text{ MPa}$$

<sup>2</sup> [En ligne]. Disponible : <http://www.Asm.matweb.com/Search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA6061t6> (Consulté le 25 mars 2014)

La contrainte normale permise des vis du moteur est de 419,48 MPa, tel qu'indiqué à l'Annexe F, alors nous voyons que la force générée par le moteur est beaucoup plus petite que la force requise pour casser la vis.

- **Contraintes de cisaillement sur les vis perpendiculaires à la force du moteur (vis B)**

Après avoir calculé le premier moment de la section ( $Q_{Z,A} = 256,048 \text{ mm}^3$ ) et ensuite le flux maximal pour une vis ( $q_{zx \text{ max}} = 0,59 \text{ N/mm}$ ) et finalement la force maximale ( $q_{zx \text{ max}} \times S = F_{\text{max}} = 29,527 \text{ N}$ ) où  $S$  est la distance entre les vis, nous avons pu calculer la contrainte de cisaillement sur la vis.

$$\tau_{\text{max}} = \frac{F_{\text{max}}}{A} = \frac{29,527 \times 4}{9,03} = 13,07 \text{ MPa}$$

La contrainte de cisaillement maximale permise pour les vis perpendiculaires à la force du moteur est de 251,6 MPa, tel qu'indiqué à l'annexe F, alors nous voyons que la force générée par le moteur n'est pas assez forte pour casser la vis utilisée.

Finalement, nous n'avons pas jugé nécessaire d'étudier les efforts sur le linéarisateur d'air, compte tenu du fait que la surface exposée à la pression de l'air n'est pas très grande. En effet, il s'agit d'une surface composée d'alvéoles.

## Chapitre 3 : Fabrication de la Soufflerie

### 3.1 Fiche technique du produit

#### 3.1.1 Génération du flux d'air

Système composé d'un moteur électrique fonctionnant à batterie (voir Fig 2) :

Pièces	Données techniques
Moteur électrique	Great Planes Rimfire .80 50-55-500 Outrunner Brushless
ESC	Hobbyking SS Heli Series 70-80A ESC w/UBEC
« Servo tester »	Turnigy Servo Tester
Batterie	Turnigy 3000mAh 6S 35C Lipo Pack
Hélice	APC 15x7 Thin Electric Propeller



Fig 2. Moteur Électrique et ses composants

#### 3.1.2 Support du moteur

Support servant à centrer le moteur dans la tuyère (voir Fig 3).

Tableau 3. Liste de composants pour le support du moteur

Pièces	Observations	Nb
Barre*	Aluminium, Épaisseur : 3.175 mm	2
Équerre	Acier 3/4 po x 1/2 po	8
Support en « X »	Aluminium (inclus avec le moteur)	1
Vis	8/32 x 5/8 po	12
Écrou	8/32	12
Rondelle	8/32	8

\*Se référer à l'annexe D pour les dimensions complètes

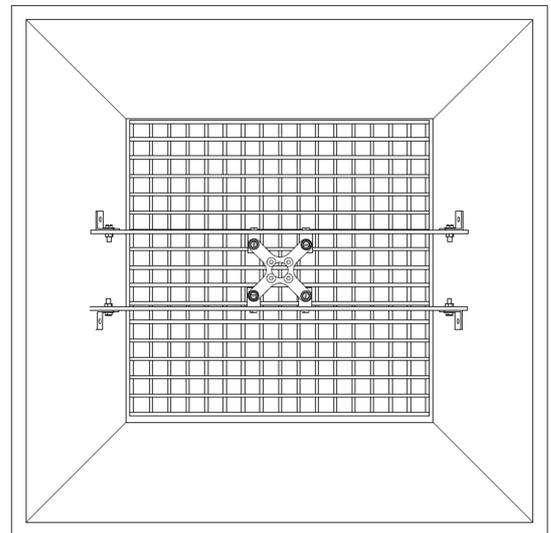


Fig 3. Support du moteur électrique dans la tuyère

### 3.1.3 Laminarisation du flux d'air

Section alvéolaire (voir Fig 4a) composée de plusieurs languettes (voir Fig 4b) qui sert à laminer le flux d'air et à le diriger vers la veine d'essai.

Tableau 4. Composantes de la section alvéolaire

Pièce	Matériau	NB
Languette*	Contreplaqué (merisier)	34

\*Se référer à l'annexe E pour les dimensions complètes

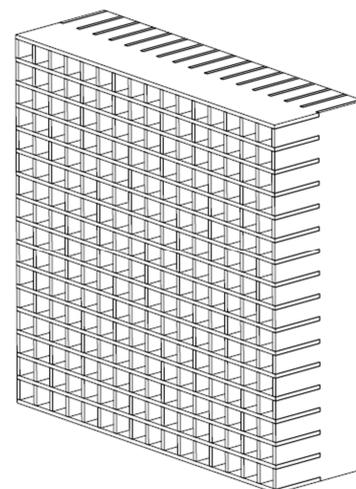


Fig 5a. Section alvéolaire

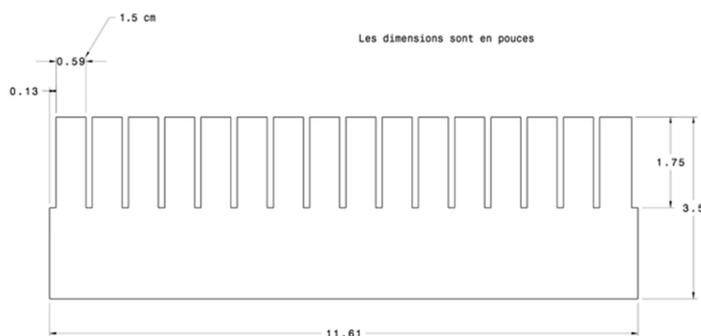


Fig 4b. Languette de la section alvéolaire

## 3.2 Fabrication de la soufflerie

### 3.2.1 Fabrication de la section alvéolaire

Pour fabriquer la section alvéolaire, nous avons eu besoin des composants suivants :

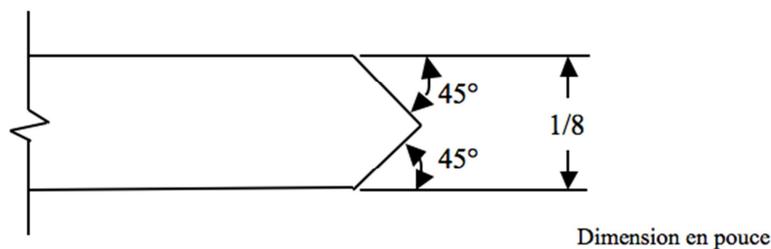
- 1 feuille de contreplaqué en merisier 30 po x 60 po de 1/8 po d'épaisseur
- Époxy
- Sableuse/papier sablé
- Imprimante/feuille de papier
- Banc de scie
- Scie à ruban
- Crayon
- Règle
- Équerre
- 1 poignée

### Mesurage et découpage

Nous avons tout d'abord tracé les 34 languettes sur la feuille de contreplaqué, en respectant le dessin de détail (voir annexe E), à l'aide d'un crayon, d'une règle et d'une équerre, puis nous les avons découpées avec une scie à ruban. Pour découper les fentes, nous avons imprimé le dessin de détail de la languette grandeur réelle pour le coller sur une languette n'ayant pas encore de fentes. Nous avons ensuite découpé, avec un banc de scie, chacune des fentes en suivant les lignes qui se trouvaient sur le papier. Cette languette complétée nous a servi de gabarit pour découper les fentes des 33 languettes restantes.

### Sablage

Pour tenter de réduire les turbulences à l'entrée de la section alvéolaire, nous avons sablé les côtés des languettes sur le sens de la longueur en forme de pointe à 90° (voir Fig 6) à l'aide d'une sableuse à courroie. En inclinant le plateau de la sableuse à 45° et en effectuant une passe de chaque côté de la languette, nous avons pu former la pointe. Étant donné que les languettes s'emboîtent les unes dans les autres, nous avons formé la pointe sur le côté « peigne » de 17 languettes et sur le côté plein des 17 autres.



**Fig 6. Pointe de la languette vue du profil**

### Assemblage

Nous avons ensuite assemblé les languettes pour former la section alvéolaire en les rentrant les unes dans les autres et en s'assurant que toutes les pointes se trouvaient du même côté. Nous avons collé à l'époxy les 4 languettes extérieures, ceinturant la section alvéolaire, pour solidifier l'ensemble. Nous avons également collé à l'époxy une poignée sur le dessus de la section pour faciliter la manipulation.

### 3.2.2 Assemblage du circuit du moteur

La réalisation du circuit électrique du moteur a nécessité les éléments suivants :

- 1 ESC
- 2 protections HXT de 4mm
- 2 connecteurs HXT de 4mm
- 3 connecteurs « bullet » femelles (inclus avec le moteur)
- Soudeuse à étain
- Étain
- 3 tubes thermorétractables (1 rouge, 1 noir et 1 jaune)
- Source de chaleur (briquet)
- 3 rallonges avec connections de 4mm
- 1 batterie
- 1 « servo tester »
- 1 moteur électrique

#### Soudage

Pour la première étape de l'assemblage du circuit électrique, nous avons placé les deux protecteurs HXT de 4mm sur chacun des 2 câbles de l'ESC (+, -) servant à le relier à la batterie (voir annexe C pour la gamme de fabrication). Nous avons placé le protecteur avec le plus gros diamètre sur le câble noir et celui avec le plus petit diamètre sur le câble rouge. Ensuite, nous avons soudé le connecteur HXT femelle de 4mm au câble noir de l'ESC et le connecteur HXT male de 4mm au câble rouge avec la soudeuse à étain. Pour protéger les connecteurs, nous avons glissé les protecteurs, que nous avons placés sur les fils plus tôt, sur les connecteurs jusqu'à ce que nous entendions un « clic »; nous indiquant que les connecteurs étaient bien en place. Par la suite, nous avons soudé les 3 connecteurs « bullet » femelles aux 3 fils de l'ESC (A, B, C) servant à alimenter le moteur à l'aide de la soudeuse à étain. Le moteur étant alimenté par 3 fils de couleur rouge, noire et jaune, nous devons faire correspondre la couleur des fils aux phases A, B et C de l'ESC. Nous avons donc ajouté les tubes thermorétractables au bout de chacun des 3 connecteurs « bullet » femelles, en faisant correspondre les couleurs des tubes aux phases A, B et C (voir Fig 7), et les avons fait se rétracter avec la chaleur du briquet pour épouser la forme des connecteurs et ainsi les protéger.

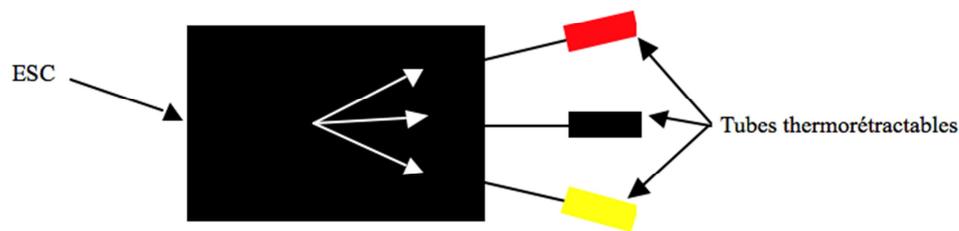


Fig 7. Couleurs correspondantes des phases de l'ESC

### Assemblage

Une fois toutes les soudures complétées, nous avons pu effectuer les connexions des différents éléments du circuit électrique en commençant par brancher les 3 fils du moteur aux rallonges qui elles-mêmes sont branchées au 3 fils de l'ESC. Ensuite nous avons branché le BEC au « servo tester » pour l'alimenter et pour pouvoir contrôler la vitesse du moteur. Nous avons par la suite branché l'ESC à la batterie.

### **3.2.3 Fabrication du support du moteur**

Pour fabriquer le support, nous avons eu besoin des composants suivants :

- 1 barre d'aluminium de 1 pouce de largeur et de 3,175mm d'épaisseur
- 8 Équerres Acier 3/4 po x 1/2 po
- 12 Vis 8-32 x 5/8 po
- 8 Rondelles 8-32
- 12 Écrous 8-32
- Scie à ruban
- Crayon
- Équerre combinée ou règle
- Ruban à mesurer
- Lime
- Perceuse à colonne
- Tournevis
- Clé à molette

### Mesurage et découpage

Pour commencer, nous avons tracé deux longs trapèzes sur la barre d'aluminium en respectant le dessin de détails (voir annexe D) à l'aide d'un crayon, d'une règle et d'une équerre,

puis nous les avons découpées avec une scie à ruban. Nous avons ensuite limé les coins coupés à l'aide d'une lime pour que les arrêtes du support soient lisses et pour ne pas se blesser.

#### Limage

Pour que les arrêtes du support soient lisses et pour ne pas se blesser, nous avons limé les coins coupés à l'aide d'une lime.

#### Perçage

Nous avons ensuite percé les deux plaques d'aluminium en respectant le dessin de détails (voir annexe D) à l'aide de la perceuse à colonne et d'un foret 9/64 po.

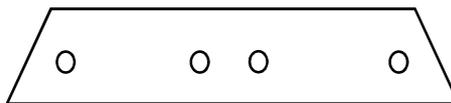


Fig 8. Exemple de trapèze troué

#### Assemblage

Nous avons ensuite assemblé les deux plaques sur le support en « X » du moteur à l'aide d'un tournevis, d'une clé à molette, des vis et des équerres comme indiqué sur le dessin isométrique du support du moteur (voir annexe D). Nous avons utilisé des rondelles sur le support en « X » et sur les équerres servant à fixer le support à la tuyère.

## Chapitre 4 : Utilisation et sécurité

### 4.1 Utilisation

Les étapes suivantes décrivent comment utiliser la soufflerie :

1. Recharger la batterie
2. Retirer la veine d'essai
3. Placer le modèle réduit ou le profil d'aile à l'intérieur
4. Replacer la veine d'essai
5. Allumer l'anémomètre
6. Retirer la section alvéolée pour avoir un écoulement d'air turbulent ou la laisser en place pour un écoulement laminaire
7. Brancher les bornes positives et négatives de la batterie aux bornes correspondantes du moteur
8. Utiliser le « servo tester » pour augmenter la vitesse de l'air
9. Ajuster la vitesse de l'air en se référant à l'anémomètre (attendre quelques secondes pour laisser le temps à la vitesse de se stabiliser)

### 4.2 Sécurité

Pour éviter tout accident, il est important de **TOUJOURS** vérifier ces quelques points lors de l'utilisation de la soufflerie :

1. S'assurer que l'hélice est bien fixée sur le moteur avant chaque utilisation
2. Vérifier que les deux grillages sont bien en place
3. Mettre le potentiomètre du « servo tester » en position fermée (tourné au maximum dans le sens anti horaire) avant de brancher le moteur à la batterie
4. Se trouver dans la zone sécuritaire lorsque la soufflerie fonctionne (voir Fig 9)

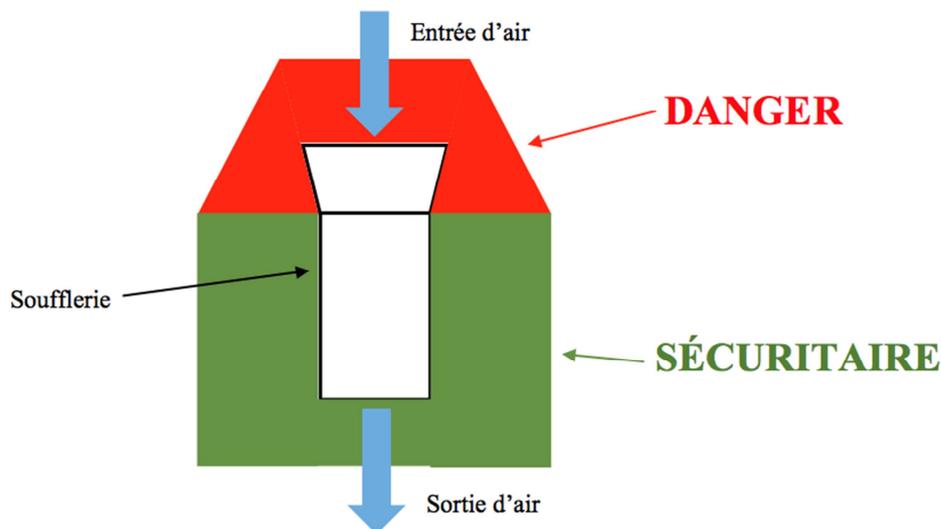


Fig 9. Zones dangereuse et sécuritaires de la soufflerie

## Chapitre 5 : Tests et analyse du flux d'air

### 5.1 Valeur théorique et prétest

L'analyse du flux d'air généré dans une soufflerie constitue une étape importante afin de pouvoir comprendre les phénomènes aérodynamiques affectant le modèle qui est étudié dans la veine d'essai.

Une des caractéristiques les plus importantes est la linéarité du flux. En effet, un écoulement turbulent se traduit par un mouvement instable des molécules d'air dans de nombreuses directions à l'intérieur de la zone d'essai. Ces vecteurs, de grandeur et direction différentes, produisent des gradients de pression à l'intérieur du flux. Des tourbillons peuvent également être présents, entraînant des rotations de l'air. Un écoulement laminaire se rapproche davantage des conditions normales lors du vol d'un avion.<sup>3</sup>

Pour linéariser l'air, nous avons utilisé une structure alvéolaire afin de réduire les turbulences produites par l'hélice. Chaque alvéole est très longue comparativement à son ouverture, ce qui force l'air dans une seule direction pour une plus grande durée.

La sonde d'un anémomètre est installée à l'intérieur de la veine d'essai, près du modèle à étudier. Dans le cas où des tourbillons seraient présents, la vitesse mesurée par l'anémomètre ne cesserait pas de changer en raison des vecteurs irréguliers. Or, si l'écoulement est laminaire, cette variation devient nulle. Un écoulement laminaire est plus facile pour les études faites par les élèves de 4<sup>e</sup> et 5<sup>e</sup> secondaire, car à ce stade, les notions de turbulence et la théorie qui les entoure ne font pas partie du programme d'enseignement. Toutefois, notre soufflerie retient la capacité de produire un écoulement plus turbulent grâce à la modularité des alvéoles, qui peuvent être retirées du système.

Il est important de pouvoir analyser les caractéristiques aérodynamiques de l'écoulement de façon théorique, notamment la vitesse théorique produite par l'hélice et le nombre de Reynolds.

D'abord, nous devons établir les relations entre le moteur, sa source d'énergie, l'hélice et le flux d'air que la combinaison de ceux-ci produit. La nature de l'hélice est très complexe, et chaque type d'hélice contient plusieurs paramètres qui influencent la poussée que l'hélice est

---

<sup>3</sup> <http://www.tomcarlone.com/WindTunnelProject/WindTunnelReport.pdf> Building a Wind Tunnel: It Will Blow Your Mind, Goldberg, Carleone, 21

capable de produire. La poussée du moteur est calculée en premier (voir Annexe H). Le moteur que nous utilisons à l'intérieur de la soufflerie a un rapport de 500kV, soit 500 rpm par volt de tension ajouté, et notre batterie nous limite à une tension maximale de 22V, mais nous allons calculer une valeur théorique pour 20V, en supposant qu'on veut une meilleure durée de vie des batteries. Cela représente 10000 rpm, et nous utilisons la table du fournisseur de l'hélice pour la constante de poussée.

Nous établissons plusieurs hypothèses quant au flux d'air généré :

- La poussée produite par le moteur est entièrement transférée au flux d'air, sans aucune perte aérodynamique dans les composantes qui se trouvent entre la zone d'essai et l'hélice.
- On considère que la distance entre la zone d'essai et l'hélice est suffisamment longue pour que la distribution du flux soit égale en tout point.
- Le flux a été linéarisé grâce à la structure de nid d'abeille, donc nous allons traiter l'écoulement comme étant laminaire.

Avec ces hypothèses, nous obtenons une poussée de 69.98 N, qui se traduit à une vitesse à l'intérieur de la veine d'essai de 35.63 m/s. Nous avons fait un test avec la puissance maximale du moteur disponible selon le testeur servo, et mesuré un écoulement de 25.6 m/s.

## 5.2 Analyse du prétest

Nous pouvons faire le chemin à l'envers pour trouver la rotation de l'hélice. Toutefois, nous n'avons pas été capables de mesurer la rotation actuelle de l'hélice ou la tension actuelle fournie au moteur. Cela implique que deux variables sont inconnues dans l'équation de la poussée, soit le coefficient de poussée et la vitesse de rotation. Or, une inspection des valeurs du coefficient montre que la variation de celui-ci est très petite, passant de 0.0930 à 1000 rpm à 0.0976 pour 10000 rpm. Nous allons prendre la valeur moyenne entre les deux, soit de 0.0953.

Nous appliquons les mêmes hypothèses sur le flux que celles utilisées dans le calcul théorique, avec une distribution égale de la pression dynamique et l'absence d'obstructions. En partant de la vitesse, il est possible d'obtenir la pression dynamique grâce à l'équation suivante :

$$P_{dynamique} = \frac{\rho * V^2}{2}$$

Cela permet d'obtenir une pression dynamique de 401.4 Pa. Nous pouvons calculer la poussée grâce à l'isolation de la poussée de la pression dynamique, soit :

$$T = P_{dynamique} * A$$

Or, sachant que l'aire est constante à 0.09 m<sup>2</sup>, la poussée obtenue est de 36.13 N. Nous pouvons maintenant isoler la vitesse de rotation (rps) et la calculer :

$$N = \sqrt{\frac{T}{k_T \rho D^4}}$$

La vitesse de rotation serait de 121.2 rps, qui correspond à 7272 rpm. Cette valeur ne tient pas compte des pertes considérables qui ont été observées qualitativement autour de certaines ouvertures de la soufflerie. En effet, dans l'absence des alvéoles, une vitesse de 28.1 m/s a été mesurée. Cette valeur se rapprocherait davantage de la vitesse maximale estimée, mais l'absence d'alvéoles pourrait entraîner un écoulement turbulent qui ne concorde pas aux hypothèses utilisées.

Le nombre de Reynolds permet d'estimer le degré d'agitation de l'écoulement d'un fluide, soit la turbulence dans celui-ci. Il existe plusieurs formules qui permettent de le calculer, mais toutes dépendent de la viscosité du fluide, de la section à travers l'écoulement se fait et la vitesse ou le débit de l'écoulement. Ces formules sont détaillées en Annexe G.

Pour le calcul, la vitesse mesurée avec les alvéoles a été utilisée. Bien que cette vitesse soit inférieure à celle mesurée sans alvéoles, et que la friction de l'écoulement dans les alvéoles contribue grandement à la réduction de la vitesse, ce cas permet de supposer que la structure a linéarisé l'écoulement. L'écoulement laminaire demeure une propriété recherchée pour l'analyse du modèle aérodynamique dans la zone d'essai.

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu}$$

Une valeur de 479217.6 a été trouvée pour le nombre de Reynolds. Celle-ci a été comparée avec la littérature scientifique, qui classifie un nombre en dessous de 500000 comme étant bas pour une soufflerie.<sup>4</sup>

En bref, il est possible d'établir un lien entre les caractéristiques de l'hélice et du moteur pour calculer une valeur théorique de la vitesse de l'air. Toutefois, cela nécessite plusieurs hypothèses afin que les calculs puissent se faire. Il est également possible de faire le chemin à l'envers pour trouver la vitesse de rotation actuelle de l'hélice. En effet, puisque les caractéristiques du testeur de servo ne sont pas entièrement expliquées par le fabricant ou connues, il est possible que celui-ci limite la vitesse maximale de rotation. Par la suite, le calcul du nombre de Reynolds a obtenu une valeur acceptable pour une soufflerie, qui suggère que les turbulences n'affectent pas de manière significative l'écoulement de l'air.

### 5.3 Analyse et résultats du test officiel

Lors de nos essais expérimentaux de la soufflerie, nous avons prédit des valeurs théoriques du flux d'air généré par celle-ci à une vitesse de rotation connue. Nous avons identifié des sources qui peuvent réduire la vitesse de l'écoulement à l'intérieur de la soufflerie dans l'analyse de l'écoulement. Afin de confirmer les trouvailles théoriques et les premières trouvailles expérimentales, qui s'étaient faites sans modèle aérodynamique à l'intérieur, nous avons fait une seconde série de tests, étudiant l'écoulement, la portance générée par un profil d'aile et le poids et centre de masse de l'ensemble.

Nous allons seulement nous concentrer sur le flux d'air, car c'était l'élément qui faisait partie du mandat de notre équipe. Les 4 essais se sont faits à deux vitesses d'écoulement, soit une vitesse pour 2 essais. Nous avons mesuré les valeurs suivantes :

-20.5 m/s

-15 m/s

Les deux vitesses mesurées n'ont eu aucun écart des vitesses prédites (20.5 m/s et 15 m/s respectivement, puisque ce paramètre a été tenu constant lors de chaque essai, c'est-à-dire que nous testé pour une vitesse spécifique d'air et réglé notre moteur pour que le flux corresponde au nombre voulu.

---

<sup>4</sup> <http://aerospace.illinois.edu/m-selig/pubs/SeligDetersWilliamson-2011-AIAA-2011-875-LRN-AirfoilWindTunnelTesting.pdf> Wind Tunnel Testing Airfoils at Low Reynolds Numbers, Selig et al., 1

L'anémomètre a été placé après la structure alvéolaire, ce qui nous permet de supposer que l'air a été linéarisé. Pour la vitesse de 20.5 m/s, celle-ci a été mesurée avec le testeur servo au maximum, c'est-à-dire que la puissance maximale permise par celui-ci alimentait le moteur. Cette vitesse est différente de la valeur mesurée dans la première série de tests, faite également avec le testeur servo au maximum, qui avait obtenu une valeur de 25.6 m/s au centre de la zone d'essai. Ces deux résultats différents impliquent que la distribution du flux est inégale, contredisant l'hypothèse émise précédemment pour les calculs théoriques.

Une distribution inégale se rapproche davantage des conditions réelles, et il s'agit d'un facteur important à considérer pour la mesure de l'écoulement d'un fluide à travers une section. Le débit volumique  $Q$  est calculé par la formule suivante :

$$Q = v * A$$

La formule dépend de la vitesse et de la surface. Or, la surface de la veine d'essai étant constante, seulement la vitesse varie. Une valeur moyenne doit être mesurée pour donner une estimation de l'écoulement total. Cela permet d'éliminer les effets de friction et la vitesse inférieure aux parois. Pour ce faire, les mesures de vitesse. La section carrée est divisée en quatre quadrants, et en fonction du nombre de points à mesurer, une échelle de distances est établie. Cette méthode implique que la vitesse au centre sera la plus grande.

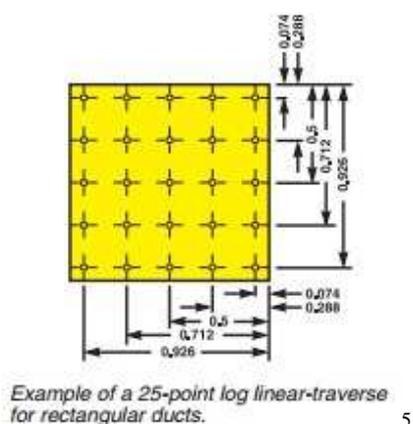


Figure 1 : distribution des points de mesure

Dans le cas de notre soufflerie, l'emplacement de la sonde se situe à moins de 10 cm de la paroi. La sonde est stationnaire, donc il faudrait une autre sonde pour pouvoir effectuer des

<sup>5</sup> [http://www.omega.ca/Green/pdf/AIRFLOW\\_MEAS\\_REF.pdf](http://www.omega.ca/Green/pdf/AIRFLOW_MEAS_REF.pdf) Measuring Air Flow, Omega

mesures selon un grillage prédéterminé. En l'absence d'une autre sonde, il n'est pas possible de créer un graphique tridimensionnel contenant toutes les mesures et leur magnitude selon la position. La mesure précédente de 25.6 m/s serait donc correcte à un emplacement spécifique, et à cause de la présence de l'anémomètre, nous n'avons pas pu confirmer la première valeur. Or, il n'est également pas possible de dire que la vitesse d'écoulement en contact avec notre profil d'aile a été de 20.5 m/s, car le profil était placé au milieu de la surface. Il est aussi impossible de déterminer avec l'information disponible le type de distribution du flux, soit la manière dont l'écoulement diminue en fonction de la position, qui pourrait être de type:

-linéaire

-inversement proportionnel

-autre type de relation

Un facteur à considérer est la possibilité que les bouts de notre profil d'aile étaient éloignés du centre, et par conséquent l'écoulement était inférieur à celui au centre. Cela se traduirait par une valeur de portance diminuée en raison de la vitesse de l'air qui vient en contact avec le profil.

## Conclusion

Ce rapport présente les résultats de la troisième étude de cas, effectuée dans le cadre du projet intégrateur I en génie aérospatial. Il communique les calculs qui ont été faits avant la construction de la soufflerie, ainsi il présente les résultats des tests effectués durant les essais du moteur.

L'installation de la combinaison qui a été retenue après la deuxième étude de cas, qui consistait en un moteur électrique équipé d'une hélice qui pousse l'air et qui fonctionne à l'aide d'une batterie, a pu générer une vitesse de flux d'air avant l'utilisation de la section alvéolaire de 28.18 m/s. Cette vitesse a diminué à 25.6 m/s après l'utilisation de la section alvéolaire. Ces vitesses ont été enregistrées à l'aide d'un anémomètre sans fil placé à l'intérieur de la soufflerie. Le moteur est fixé, à l'aide des vis, sur deux plaques en aluminium qui seront placées horizontalement à l'intérieur de la tuyère. En outre, les calculs des efforts internes et externes ont montré que les contraintes maximales normales et de cisaillement qui seront générées dans la plaque du support du moteur, après le chargement, sont respectivement 10.8 MPa et 0.372 MPa. De plus, la valeur des contraintes normales sur les vis parallèles à la force du moteur est de 1.99 MPa, alors que la valeur des contraintes de cisaillement dans les vis perpendiculaires à la force du moteur augmente à 13.07 MPa. En ce qui concerne la sécurité, il est important de ne pas se mettre aux alentours de la tuyère, car cette dernière contient l'hélice qui tourne à de grandes vitesses.

Enfin, cette soufflerie répond aux besoins du client qui ont été étudiés et analysés lors de la première étude de cas. De plus, elle permet aux étudiants du 4<sup>e</sup> et 5<sup>e</sup> secondaire de visualiser certains concepts physiques dans leur programme, tel que la portance et la pression.

## Références

- Hernandez, M., Lopez, A., Jazarbek, A. – Design Methodology for a Quick and Low-Cost Wind Tunnel, [En ligne]. Disponible : <http://www.intechopen.com/books/wind-tunnel-designs-and-their-diverse-engineering-applications/design-methodology-for-a-quick-and-low-cost-wind-tunnel> [Consulté le 05-04-2014]
- <http://www.tomcarlone.com/WindTunnelProject/WindTunnelReport.pdf> Building a Wind Tunnel: It Will Blow Your Mind, Goldberg, Carleone, 21
- <http://aerospace.illinois.edu/m-selig/pubs/SeligDetersWilliamson-2011-AIAA-2011-875-LRN-AirfoilWindTunnelTesting.pdf> Wind Tunnel Testing Airfoils at Low Reynolds Numbers, Selig et al., 1
- [En ligne]. Disponible : <http://www.Asm.matweb.com/Search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA6061t6> (Consulté le 25 mars 2014)

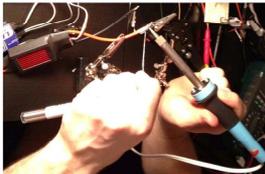
## ANNEXE A : BUDGET

Composants	Nombre	prix (avant taxe et frais de poste)(\$)	Sous-total
Great Planes Rimfire .80 50-55-500 Outrunner Brushless	1	99,98	99,98
APC 15x7 Thin Electric Propeller	1	5,19	5,19
Hobbyking Digital Anemometer	1	17,16	17,16
Hobbyking ECO SIX 80W 6A 2-6S Battery Balance Charger AC/DC w/PSU	1	29,4	29,4
MERISIER RUSSE 1/8" X 30" X 60" (3 PLUS)	1	5,95	5,95
Turnigy Servo Tester	1	5,99	5,99
4mm Male/Female Bullet Brushless Motor Extension Lead 250mm (Pack de 3)	1	3,32	3,32
Turnigy 5mm Heat Shrink Tube Yellow (1mtr)	1	0,35	0,35
Turnigy 5mm Heat Shrink Tube - RED (1mtr)	1	0,35	0,35
Turnigy 5mm Heat Shrink Tube - BLACK (1mtr)	1	0,35	0,35
Turnigy 3000mAh 6S 35C Lipo Pack (nombre au choix)	1	51,66	51,66
HXT 4mm Gold Connector w/ Protector (10pcs/set)	1	4,46	4,46
Hobbyking SS Heli Series 70-80A ESC w/UBEC	1	17,15	17,15
Barre plat aluminium	1	12,59	12,59
Equerre angle	9	2,61	23,49
Vis	6	0,48	2,88
Écrous	6	2,4	14,4
Vis	10	0,8	8
Écrous	10	1,9	19
<b>321,67</b>			<b>Total</b>

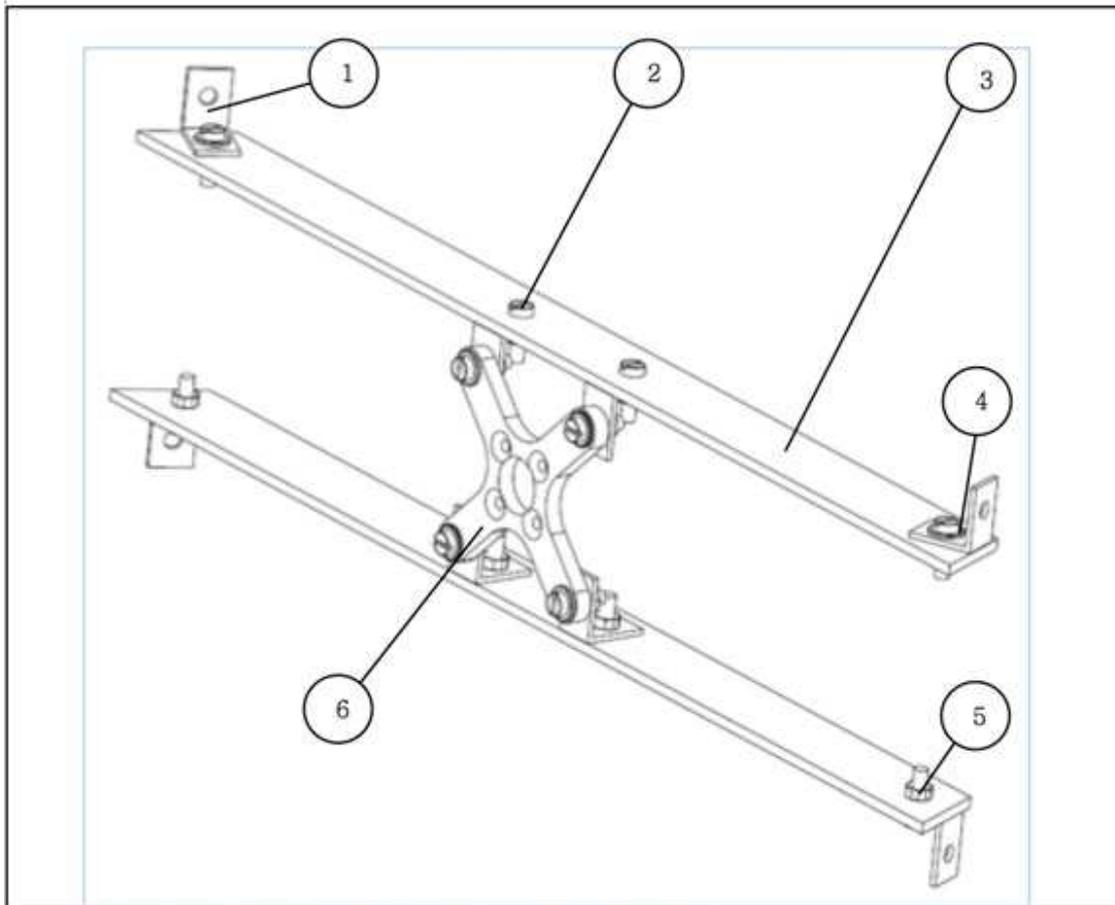
## ANNEXE B : COMPOSANTES

Nom	poids	dimensions	autre information	hyperlink
Great Planes Rtmire .80-50-500 Outrunner Brushless	298 g (11.5 oz)	50mm Ø 55mm Long axe 8mm Ø axe 20mm long	65 Ampères max 115A W constant 18.5 à 22.2 V (5-5S LiPo)	<a href="http://www3.towerhobbies.com/cgi-bin/wf0001p28?cid=1211W78&amp;ml">http://www3.towerhobbies.com/cgi-bin/wf0001p28?cid=1211W78&amp;ml</a>
APC 15x7 Thin Electric Propeller	69 g	15 po (38 cm) Pas de 7 po	trou d'axe ajustable, 3.2 à 8 mm	<a href="http://www3.towerhobbies.com/cgi-bin/wf0001p28?cid=1211487&amp;ml">http://www3.towerhobbies.com/cgi-bin/wf0001p28?cid=1211487&amp;ml</a>
Hobbyking Digital Avionometer	146 g	SD	0 à 30 ml/s -10 à 45 Celsius m/s, km/h, ft/min, knots, mph	<a href="http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/_17800_Hobbyking_Digital_Avionometer.html">http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/_17800_Hobbyking_Digital_Avionometer.html</a>
Hobbyking ECO SIX 80W 6A 2-6S Battery Balance Charger AC/DC w/PSU	490 g	135x61x112 mm	jusqu'à 6 Cels LiPo à partir d'une prise AC normale équilibre de la charge des cellules	<a href="http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/_22287_Hobbyking_ECO_SIX_80W_6A_2_6S_Battery_Balance_Charger_AC_DC_w_PSU.html">http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/_22287_Hobbyking_ECO_SIX_80W_6A_2_6S_Battery_Balance_Charger_AC_DC_w_PSU.html</a>
MERSIER RUSSE 1/8" X 30" X 60" (3 PLS)	SD	1/8x30x60 po	Magasin Montrebas	<a href="http://www.langevinouest.com/fr/produits/bois/mersier-russe/mersier-russe-30x60/mersier-russe-1-8x30x60-3-pls">http://www.langevinouest.com/fr/produits/bois/mersier-russe/mersier-russe-30x60/mersier-russe-1-8x30x60-3-pls</a>
Turnigy Servo Tester	49x49x29 mm		4,9 à 6v fait moins cher que l'autre	<a href="http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/_8296_Turnigy_Servo_Tester.html">http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/_8296_Turnigy_Servo_Tester.html</a>
4mm Male/Female Brushless Motor Extension Lead 250mm	26g	250 mm	extension entre moteur et ESC	<a href="http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/_43869_4mm_Male_Female_Brushed_Motor_Extension_Lead_250mm_USA_Warehouse_.html?srSearch=4mm%2B50l">http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/_43869_4mm_Male_Female_Brushed_Motor_Extension_Lead_250mm_USA_Warehouse_.html?srSearch=4mm%2B50l</a>
Turnigy 5mm Heat Shrink Tube Yellow (1mtr)	1 m	jaune		<a href="http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/_11422_Turnigy_5mm_Heat_Shink_Tube_Yellow_1mtr_.html">http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/_11422_Turnigy_5mm_Heat_Shink_Tube_Yellow_1mtr_.html</a>
Turnigy 5mm Heat Shrink Tube - RED (1mtr)	1m	rouge		<a href="http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/_5278_Turnigy_5mm_Heat_Shink_Tube_RED_1mtr_.html">http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/_5278_Turnigy_5mm_Heat_Shink_Tube_RED_1mtr_.html</a>
Turnigy 5mm Heat Shrink Tube - BLACK (1mtr)	1m	noir		<a href="http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/_3833_Turnigy_5mm_Heat_Shink_Tube_BLACK_1mtr_.html">http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/_3833_Turnigy_5mm_Heat_Shink_Tube_BLACK_1mtr_.html</a>
Turnigy 3000mAh 3S 36C Lipo Pack	514 g	139x63x39 mm	3000mAh 22.2V cell connecteur de charge JST-AH	<a href="http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/_10101_Turnigy_3000mAh_3S_36C_Lipo_Pack.html">http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/_10101_Turnigy_3000mAh_3S_36C_Lipo_Pack.html</a>
HXT 4mm Gold Connector w/ Protector (10pcs/set)			avec Turnigy 3000mAh 6S 35C Lipo Pack	<a href="http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/_31921_HXT_4mm_Gold_Connector_w_Protector_10pcs_set_US_Warehouse_.html?srSearch=HXT%2B4mm">http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/_31921_HXT_4mm_Gold_Connector_w_Protector_10pcs_set_US_Warehouse_.html?srSearch=HXT%2B4mm</a>
Hobbyking SS Heli Series 70-80A ESC w/UBEC	80 g	90x39x17 mm	UBEC 5A	<a href="http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/_10015_Hobbyking_SS_Heli_Series_70_80A_ESC_w_UBEC.html">http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/_10015_Hobbyking_SS_Heli_Series_70_80A_ESC_w_UBEC.html</a>
Barre plat aluminium		1x1/8 po	Reno Dépôt	
Équerre angle		3/4" X 1/2"	Reno Dépôt	
Vis		6/32" X 1/2"	Reno Dépôt	
Écrous		6/32"	Reno Dépôt	
Vis		8/32" X 5/8"	Reno Dépôt	
Écrous		8/32"	Reno Dépôt	

## ANNEXE C : GAMME DE FABRICATION, CIRCUIT DU MOTEUR

GAMME DE FABRICATION			
ÉLÉMENT : Circuit du Moteur ENSEMBLE : SOUFFLERIE			
GAMME: 02 FEUILLE:			
DESSIN: 02 REPÈRE: FLUX D'AIR			
MATÉRIAU: fil électrique, moteur, servotester			
NOMBRE: 1			
ÉTAPE	OPÉRATION	CROQUIS	MACHINE / OUTIL
1	prendre ESC, le coté des deux cables (pour la connection avec la batterie) mettre le plastique de protections sur les cables (plus gros diamètre sur le cable noir)		protection HXT 4mm, ESC
2	souder connecteur HXT 4mm femelle au cable noir et male au cable rouge du ESC		Soudeuse à étain, étain, ESC, connecteurs HXT 4mm
3	pousser sur la protection par dessus les connecteurs jusqu'à un petit clic pour fixer la protection et avoir un fini comme la photo à l'étape 1		
4	Du coté de ESC avec trois cable rouge, souder les connecteurs femelle qui viens avec le moteur au cables		soudeuse à étain, étain, ESC, Connecteur bullet femelle du moteur.
5	Ajouter du Heat Shrink tube de différente couleur (pour différencier les cables A, B ou C) et faire réduire à la chaleur		Heat Shrink tube rouge, noir et jaune, source de chaleur (briquet, sechoir à cheveux)
6	Toutes les connections sont prêtes, attacher les ralonges avec connecteurs de 4mm entre le moteur et le ESC, brancher la connection BEC entre le ESC et le servo tester, et finalement brancher la batterie avec le ESC en dernier		Ralonges avec connections 4mm
7	si le moteur tourne du mauvais côté, inverser les connections B et C entre le moteur et le ESC		

## ANNEXE D : GAMME DE FABRICATION, SUPPORT DU MOTEUR



TITRE : DESSIN ISOMÉTRIQUE DU SUPPORT DU MOTEUR

NOM : DONOVAN VANDAL

DATE : 4 AVRIL

ÉCHELLE : Non à l'échelle

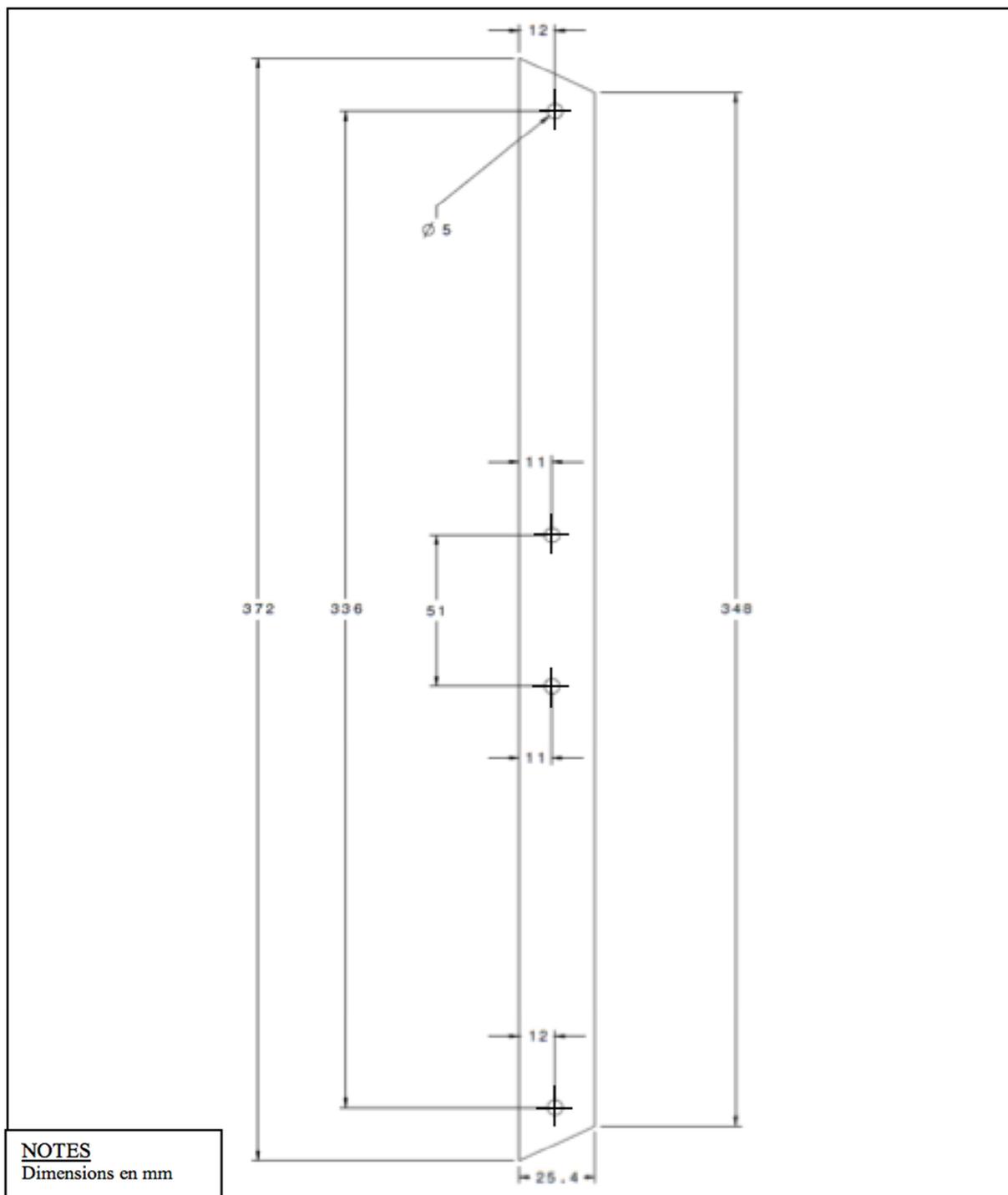
N°1

REF	DÉSIGNATION	NB	OBSERVATIONS
1	Équerre	8	Acier 3/4 po x 1/2 po
2	Vis	12	8-32 x 5/8 po
3	Barre	2	Aluminium, Épaisseur : 3.175 mm
4	Rondelle	8	8-32, À utiliser sur le support en « X » et sur les équerres servant à fixer le support à la tuyère
5	Écrou	12	8-32
6	Plaque support en « X »	1	Aluminium (inclus avec le moteur)

TITRE : NOMENCLATURE

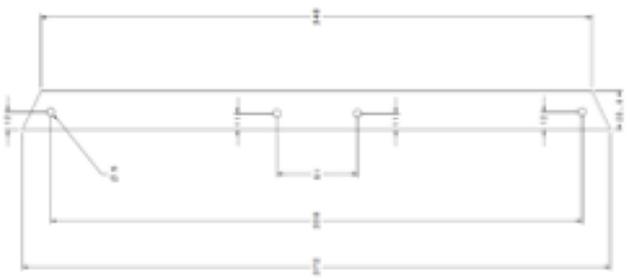
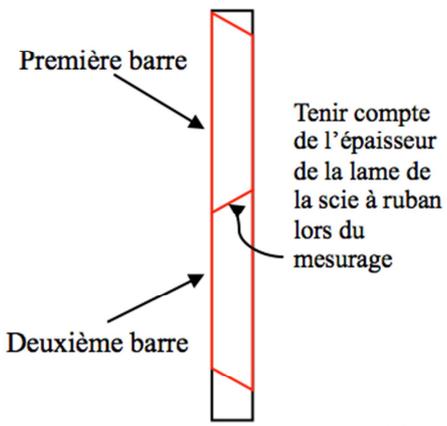
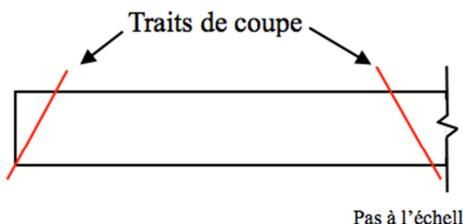
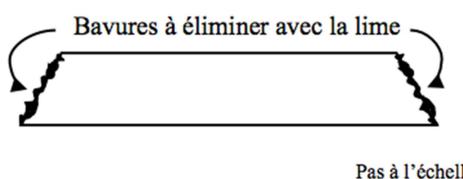
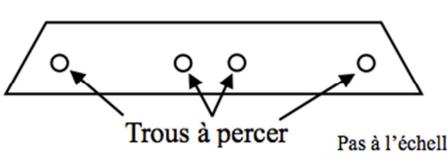
DATE : 4 AVRIL

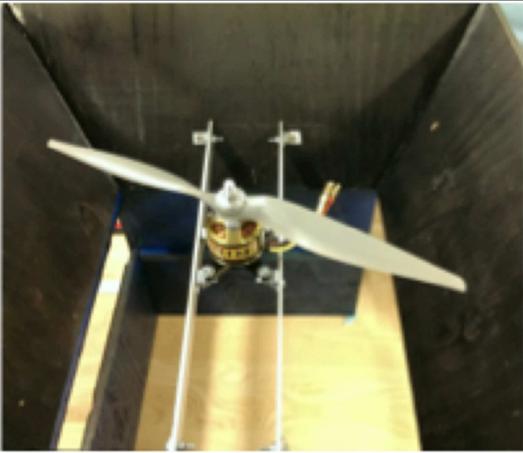
N°2



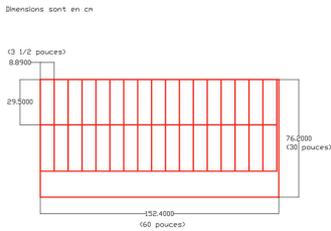
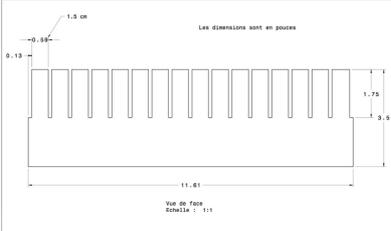
**NOTES**  
Dimensions en mm

REF	NB	DÉSIGNATION	MATÉRIAUX	OBSERVATIONS
3	2	Barre	Aluminium	Épaisseur : 3.175 mm
TITRE : DESSIN DE DÉTAILS D'UNE BARRE DU SUPPORT				
NOM : DONOVAN VANDAL				
DATE : 4 AVRIL			ÉCHELLE : Non à l'échelle	N°3

<b>GAMME DE FABRICATION</b>			
ÉLÉMENT : Barre			
ENSEMBLE : Support du moteur			
GAMME N°1	FEUILLE : 1 de 2		
DESSIN : N°3	REPÈRE : 3		
NOMBRE : 2	MATÉRIAU : Aluminium		
Étape N°	PHASE, SOUS-PHASE OU OPÉRATION	CROQUIS OU PHOTO	MACHINE-OUTIL, OUTILLAGE
<b>10</b>	<b>MESURAGE</b>		
11	En respectant le dessin de détails, tracer sur la barre d'aluminium de 3.175 mm d'épaisseur les lignes de coupe.	 <p>Pas à l'échelle</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Crayon</li> <li>- Ruban à mesurer</li> <li>- Équerre combinée ou règle</li> </ul>
<b>20</b>	<b>SCIAGE</b>		
21	Utiliser la scie à ruban pour découper les plaques d'aluminium.	 <p>Pas à l'échelle</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Scie à ruban</li> <li>- Lunettes de sécurité</li> </ul>
<b>30</b>	<b>LIMAGE</b>		
31	À l'aide de la lime, limer les coins coupés par la scie à ruban.	 <p>Pas à l'échelle</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lime</li> <li>- Lunettes de sécurité</li> </ul>
<b>40</b>	<b>PERÇAGE</b>		
41	À l'aide de la perceuse à colonne et en respectant le dessin de détails, percer les trous sur les plaques d'aluminium.	 <p>Pas à l'échelle</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Perceuse à colonne</li> <li>- Lunettes de sécurité</li> </ul>

<b>GAMME DE FABRICATION DU SUPPORT DU MOTEUR</b>			<b>FEUILLE : 2 de 2</b>
Étape N°	PHASE, SOUS-PHASE OU OPÉRATION	CROQUIS OU PHOTO	MACHINE-OUTIL, OUTILLAGE
<b>50</b>	<b>ASSEMBLAGE</b>		
51	Assembler les 2 barres sur le support en « X » du moteur, comme indiqué sur le dessin isométrique, et visser le support dans la tuyère. (Placer le support au centre de la tuyère à l'horizontal lorsque la tuyère est regardée de face)		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Équerres</li> <li>- Vis</li> <li>- Écrous</li> <li>- Rondelles</li> <li>- Tournevis</li> <li>- Clé à molette</li> <li>- Lunettes de sécurité</li> <li>- Vis à bois</li> <li>- Perceuse</li> </ul>
52	Installer l'hélice sur le moteur sous la <u>rondelle d'appui</u> .		<ul style="list-style-type: none"> <li>-Clé à molette</li> <li>- Lunettes de sécurité</li> </ul>
<b>60</b>	<b>RÉSULTAT</b>		
61	Une fois la section convergente assemblée, elle devrait ressembler à ceci.		

## ANNEXE E : GAMME DE FABRICATION, LINÉARISATEUR DE L'AIR

GAMME DE FABRICATION			
ÉLÉMENT : LINÉARISATEUR DE L'AIR ENSEMBLE : SOUFFLERIE			
GAMME: 01 FEUILLE: DESSIN: 01 REPÈRE: FLUX D'AIR			
NOMBRE: 1 MATÉRIAU: CONTREPLAQUÉ DE MERISIER			
			
ÉTAPE	OPÉRATION	CROQUIS	MACHINE / OUTIL
1	En respectant le dessin de détail ci-joint, tracer les languettes de bois sur la plaque de merisier de 30 par 60 pouces. Il devrait en y avoir 34 de désiné	<p>Dimensions sont en cm</p> 	Crayon, règle, équerre
2	Découper les languettes afin d'en avoir 34 identiques	<p>Dimensions sont en cm</p> 	scie quelconque avec guide
3	Découpe des fentes dans les languettes	<p>Les dimensions sont en pouces</p>  <p>Vue de face Echelle 1 : 1</p>	imprimante, cole, scie (on recommande un banc de scie)
3,1	Imprimer le plan de la languette à grandeur réelle (mesurer pour vous en assurer)		
3,2	Coller l'image sur une languette		
3,3	découper les fentes et utilise cette languette comme gabaris pour couper les autres languettes		sableuse / papier sablé
3,4	sabler la longueur à un angle de 45 degrés pour avoir une pointe (17 languettes sur le coté "peigne" et 17 languettes sur le coté plein)		
4	Entrer les languettes les unes dans les autres via les fentes découpé, s'assurer que toutes les cotés avec une pointe sont du même coté. Sauf 4 languettes		
5	Coller les dernières languettes sur les rebords aligné avec les fentes de les rebords		colle à bois ou epoxy

## ANNEXE F : CONTRAINTES VIS

### Contraintes maximales permises des vis

L'attache de plastique en croix du moteur incluait des vis M3 de 3mm. Pour intégrer ce support à notre croix métallique, nous avons utilisé des vis de type « Machine Screw » de 8-32. Celles-ci sont compatibles avec les trous préexistants dans le support en plastique, ce qui permet d'épargner du temps dans le cas où de l'usinage aurait été requis pour utiliser des vis plus grandes.

Vis moteur = 3 mm M3 Class 4.8

$$A = 5.03 \text{ mm}^2$$

Tension

$$F_{\max}^6 = 2110 \text{ N}$$

$$\sigma_{x,\max} = \frac{F_{\max}}{A} = 419.48 \text{ MPa}$$

Cisaillement

En général, la contrainte maximale de cisaillement se situe autour de 60% de la valeur maximale de tension. Il est à noter que les fabricants ne sont pas obligés de fournir la valeur de cisaillement maximale pour une vis, seulement celle de la tension.<sup>7</sup>

$$\tau_{\max} = 0.6 * \sigma_{x,\max} = 251.688 \text{ MPa}$$

Vis attachées à la croix en métal : 8-32 Machine Screws<sup>8</sup>

$$A : 0.0140 \text{ in}^2 * 645.16 \text{ mm}^2/\text{in}^2 = 9.032 \text{ mm}^2$$

Tension

$$\text{Tensile strength} = 850 \text{ lbs}^{(2)}$$

$$\text{Tensile Strength} = 850 \text{ lbs} * 4.448 \text{ N/lbs} = 3780.8 \text{ N}$$

$$\sigma_{x,\max} = \frac{\text{Tensile strength}}{A} = 418.6 \text{ MPa}$$

Cisaillement

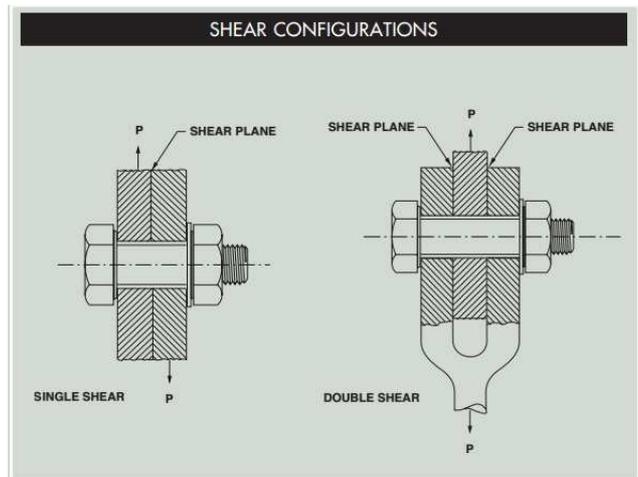
$$\tau_{\max} = 0.6 * \sigma_{x,\max} = 251.16 \text{ MPa}$$

Notation anglaise: Single Shear Stress, Double Shear Stress

<sup>6</sup> <http://www.fastenersuperstore.com/productSheets/MetricMSThread.pdf> Machine Screws -Metric-

<sup>7</sup> <http://www.portlandbolt.com/faqs/bolt-shear-strength-considerations/> Bolt Shear Strength Considerations, Greg Lindsay

<sup>8</sup> <http://www.smithfast.com/msthreaddims.html> External Thread Dimensions for Machine Screws, Smith Fastener



Tel qu'illustré, le cisaillement simple comporte un seul plan de cisaillement, tandis que le cisaillement double a deux plans. Dans le cas d'un cisaillement double, la force permise est deux fois plus grande, car la surface sur laquelle la contrainte de cisaillement est appliquée est doublée.<sup>10</sup> Dans notre cas, une seule cornière est attachée à la plaque d'aluminium par vis, ce qui signifie que nous sommes en présence de cisaillement simple.

<sup>9</sup> [http://nucor-fastener.com/Files/PDFs/TechDataSheets/TDS\\_013\\_Shear\\_Strength.pdf](http://nucor-fastener.com/Files/PDFs/TechDataSheets/TDS_013_Shear_Strength.pdf) Shear Strength, Nucor Fastener

<sup>10</sup> [http://coefs.uncc.edu/mwhelan3/files/2010/10/ICD\\_Single\\_V\\_Double\\_Shear.pdf](http://coefs.uncc.edu/mwhelan3/files/2010/10/ICD_Single_V_Double_Shear.pdf) In-Class Demonstration, Single Shear vs Double Shear, Dr. Whelan

## ANNEXE G : NOMBRE DE REYNOLDS

Le nombre de Reynolds permet de déterminer la nature de l'écoulement (laminaire ou turbulent). Dans le cas d'un nombre bas, l'écoulement sera laminaire, et turbulent si le nombre est trop grand. Cette caractéristique est importante pour déterminer l'efficacité des dispositifs à linéariser l'écoulement du fluide.

Il est à noter que ce nombre n'est pas défini par une unité de mesure particulière. Le calcul du nombre de Reynolds se fait grâce à l'équation suivante :

$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu} = \frac{v D_h}{\nu} = \frac{Q D_h}{\nu A}$$

Où

$D_h$  est le diamètre hydraulique de la section (en m)<sup>12</sup>

$Q$  est le débit volumique du fluide (en m<sup>3</sup>/s)

$A$  est l'aire de la section (en m<sup>2</sup>)

$v$  est la vitesse du fluide (en m/s)

$\mu$  est la viscosité dynamique du fluide (en Pa\*s)

$\nu$  est la viscosité cinématique (en m<sup>2</sup>/s)

$\rho$  est la densité du fluide (en kg/m<sup>3</sup>)

Le diamètre hydraulique d'un polygone régulier est défini par le diamètre d'un cercle qui peut être inscrit à l'intérieur. Dans le cas de notre zone d'essai, qui est de forme carrée, ce diamètre est de 0.30 m. Avec la vitesse de l'air obtenue dans l'annexe H, il est possible d'obtenir le nombre de Reynolds de l'écoulement à l'intérieur de la soufflerie.

Nous allons utiliser la première équation, et il faut donc rechercher la viscosité cinématique de l'air à la température de la chambre.<sup>13</sup> Puisqu'il n'y a pas de valeur pour 298K, nous devons interpoler une valeur approximative, grâce à la formule suivante :

$$slope = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} = \frac{1.983 - 1.488}{300 - 250} = 0.0099 * 10^{-5} \frac{kg * m}{Ks}$$

Cela nous permet d'utiliser la pente pour calculer la valeur interpolée :

$$v = (slope * \Delta x + 1.488) * 10^{-5} = 1.9632 * 10^{-5} \frac{kg * m}{s}$$

Nous pouvons maintenant calculer le nombre de Reynolds avec la vitesse qu'on a mesurée avec la structure alvéolaire en place. La densité de l'air demeure 1.225 kg/m<sup>3</sup>. Nous obtenons environ 479217.6. Ce nombre de Reynolds est considéré comme étant bas.<sup>14</sup>

<sup>11</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Reynolds\\_number](http://en.wikipedia.org/wiki/Reynolds_number) Reynolds Number

<sup>12</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Hydraulic\\_diameter](http://en.wikipedia.org/wiki/Hydraulic_diameter) Hydraulic Diameter

<sup>13</sup> [http://www.engineeringtoolbox.com/air-absolute-kinematic-viscosity-d\\_601.html](http://www.engineeringtoolbox.com/air-absolute-kinematic-viscosity-d_601.html) Air - Absolute and Kinematic Viscosity

<sup>14</sup> <http://aerospace.illinois.edu/m-selig/pubs/SeligDetersWilliamson-2011-AIAA-2011-875-LRN-AirfoilWindTunnelTesting.pdf> Wind Tunnel Testing Airfoils at Low Reynolds Numbers, Selig et al., 1

## ANNEXE H : VITESSE DU MOTEUR

La poussée produite par un moteur et une hélice dépendent d'un grand nombre de facteurs. D'abord, les dimensions de base de l'hélice, soit son diamètre et son pas, vont influencer les caractéristiques du flux d'air qui est généré. À cela s'ajoutent l'angle d'attaque et la torsion (« twist »), qui auront une influence sur la portance produite par le profil. Ces caractéristiques sont regroupées sous une seule constante de portance qui varie également selon la vitesse de l'hélice dans le fluide (stationnaire et diverses vitesses de déplacement).

L'efficacité électrique du moteur a aussi un effet, mais nous supposons qu'il n'y a pas de pertes énergétiques. Il n'y a pas de variation dans les paramètres électriques de celui-ci, soit le voltage et l'ampérage, outre la relation directe entre la puissance fournie et le voltage.

$$T = k_T \rho N^2 D^{4.15}$$

Où

$k_T$  = constante de l'hélice selon les tables du fabricant à une condition précise (pour  $V=0$  m/s et 10000 rpm)<sup>16</sup>

$\rho$  = densité de l'air (en kg/m<sup>3</sup>)

$N$  = vitesse de rotation de l'hélice (en rps)

$D$  = diamètre de l'hélice (en m)

À  $N=10000$  rpm,  $T = 69.98$  N

Il reste à convertir cette poussée en vitesse. Il n'y a pas de formule directe qui permet de passer entre les deux valeurs. Toutefois, nous pouvons faire quelques hypothèses pour dériver une équation qui permettrait de le faire.

- La poussée produite par le moteur est entièrement transférée au flux d'air, sans aucune perte aérodynamique dans les composantes qui se trouvent entre la zone d'essai et l'hélice.
- On considère que la distance entre la zone d'essai et l'hélice est suffisamment longue pour que la distribution du flux soit égale en tout point.
- Le flux a été linéarisé grâce à la structure de nid d'abeille, donc nous allons traiter l'écoulement comme étant laminaire.

Grâce à ces hypothèses, nous calculons premièrement la pression dynamique à l'intérieur de la zone d'essai, avec l'équation suivante :

$$P_{dynamique} = \frac{T}{A_{essai}}$$

Où

$P_{dynamique}$  est la pression dynamique du flux d'air (en Pa)

$T$  est la poussée du moteur et de l'hélice (en N)

$A$  est l'aire de la zone d'essai (en m<sup>2</sup>)

<sup>15</sup> <http://web.mit.edu/16.unified/www/FALL/thermodynamics/notes/node86.html> Performance of Propellers, MIT

<sup>16</sup> [http://www.apcprop.com/v/downloads/PERFILES\\_WEB/PER3\\_15x7.dat](http://www.apcprop.com/v/downloads/PERFILES_WEB/PER3_15x7.dat) Performance Data, APC. NOTE: Notre hélice est un 15"x7" APC. Dans le cas où l'hélice est différente, se référer au tableau approprié.

L'aire de la zone d'essai demeure une forme rectangulaire constante, soit de 30cmX30cm. Cela est converti en mètres pour une aire de 0.09 m<sup>2</sup>. Avec une poussée de 69.98N, nous obtenons une pression dynamique d'environ 777.56 Pa.

Connaissant la grandeur de la pression dynamique à l'intérieur de la zone d'essai, nous pouvons utiliser l'équation mettant en relation la pression dynamique et la vitesse de l'écoulement :

$$P_{dynamique} = \frac{\rho * V^2}{2}$$

En isolant la vitesse, nous obtenons :

$$V = \sqrt{\frac{2 * P_{dynamique}}{\rho}}$$

Nous allons supposer que la soufflerie se trouve au niveau de la mer (0m) à une température ambiante (15°C), et on utilise une table aérodynamique pour trouver sa densité. Pour une pression dynamique de 777.56 Pa et une densité de l'air 1.225 kg/m<sup>3</sup>,<sup>17</sup> la vitesse de l'écoulement d'air correspond à environ 35.63 m/s.

Cette méthode d'approximation est loin d'être parfaite, car de nombreuses hypothèses ont été nécessaires pour son usage. Plusieurs sources d'erreur peuvent se trouver dans le système, soit :

- Les pertes d'écoulement à travers des ouvertures dans la soufflerie
- Les pertes d'énergie de l'écoulement en contact avec les parois intérieures et le nid d'abeille.
- Les pertes énergétiques dans le moteur (moment d'inertie de l'hélice, effets électromagnétiques).
- Présence d'obstacles (supports, grillages, vis, etc.) entre l'hélice et la zone d'essai; l'écoulement pourrait être détourné et n'arriverait pas dans la zone d'essai
- L'hélice pousse de l'air; des turbulences hélicoïdales pourraient être générées aux bouts des pales.

18

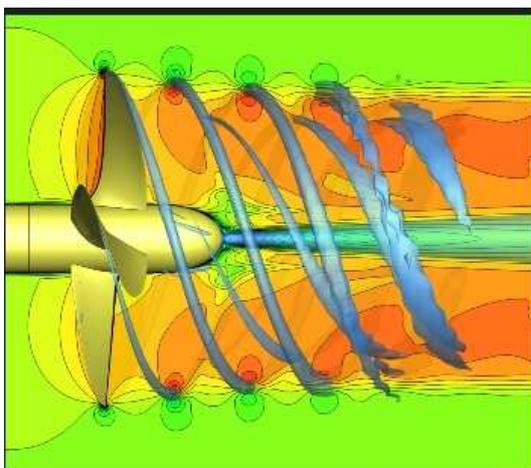


Figure 1 : Turbulence de l'écoulement d'une hélice sous-marine

<sup>17</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Density\\_of\\_air](http://en.wikipedia.org/wiki/Density_of_air) Density of Air, Wikipedia

<sup>18</sup> <http://www.marin.nl/web/Facilities-Tools/CFD/ReFRESCO.htm> ReFRESCO

## ANNEXE I : PRESSION DYNAMIQUE

La pression est une propriété des gaz qui se traduit par une force appliquée sur une surface. À l'échelle moléculaire, cette force provient des interactions entre les molécules gazeuses, plus précisément les collisions aléatoires élastiques qui surviennent entre ceux-ci. En se heurtant à une paroi, ces molécules transfèrent une partie de leur élan, qui se transforme en une force appliquée à la surface de cette paroi.

Il importe de distinguer deux types de pression : la pression statique et la pression dynamique. La pression statique est répartie de manière uniforme, de telle manière que chaque force mesurée sur une paroi est la même. Dans le cas de la pression dynamique, cette situation ne s'applique pas, et dépend de la direction du déplacement. Le vent constitue un bon exemple de la pression dynamique. Il pousse dans une seule direction, soit celle du vent.

Nous simplifions le cas pour un flux d'air linéaire, et constant. Cela élimine la présence de turbulences dans lesquelles la vitesse du flux n'est pas constante. On suppose que la vitesse se trouve en dessous de la zone transsonique, donc le fluide peut être considéré comme étant incompressible. L'équation de la pression dynamique est la suivante<sup>19</sup> :

$$P_{dynamique} = \frac{\rho * V^2}{2}$$

Où

$P_{dynamique}$  est la pression dynamique (en Pa)

$\rho$  est la densité du fluide (en  $kg/m^3$ )

$V$  est la vitesse mesurée (en m/s)

En aéronautique, l'appareil le plus utilisé pour mesurer la pression dynamique est le tube de Pitot; toutefois, si les hypothèses précédentes demeurent encore vraies, il est également possible de mesurer la vitesse de l'air avec un anémomètre et obtenir la densité à travers une table aérodynamique à une pression statique et température mesurées. Combinant les deux effets de pression, nous obtenons :

$$Pression_{stagnante} = Pression_{environnante} + Pression_{dynamique}$$

Le tube de Pitot mesure la pression stagnante (totale) au bas de la sonde grâce à un capteur de pression. Une autre sonde capte la pression statique (environnante). La valeur statique est par la suite soustraite de la valeur stagnante pour isoler la valeur de la pression dynamique<sup>20</sup>.

<sup>19</sup> <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/dynpress.html> Dynamic Pressure, NASA

<sup>20</sup> <http://tomroud.owni.fr/2009/06/10/mais-au-fait-comment-ca-marche-une-sonde-pitot/> Mais au fait, comment ça marche une sonde Pitot?, Tom Roud

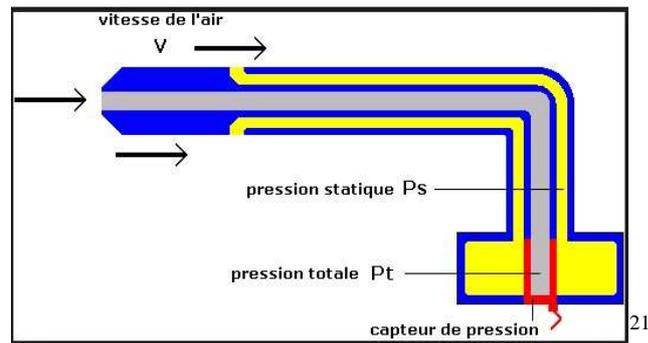


Figure 1 : Schéma d'un tube de Pitot

Dans un avion, l'équation de la pression dynamique est inversée pour isoler la vitesse, ce qui nous permet d'obtenir :

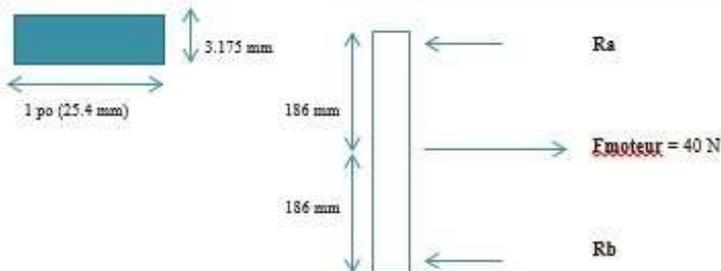
$$V = \sqrt{\frac{2 * P_{dynamique}}{\rho}}$$

<sup>21</sup> <http://sitelec.org/cours/abati/anemo.htm> Mesure de la vitesse du vent – Anémomètres, Patrick Abati

## ANNEXE J : FICHE ANALYSE EFFORTS INTERNES

### FICHE ANALYSE:

#### 1. DIAGRAMME DU CORPS LIBÉRÉE:



#### Définition des symboles :

Ra : Réaction à l'appui A.

Fmoteur : Force générée par le moteur.

Rb : Réaction à l'appui B.

#### 2. EQUATIONS:

$$\sum M_A = F_{\text{moteur}} * (186) + R_b * (186 + 186) = 0 \longrightarrow R_b = 20\text{N}$$

$$\sum F_x = F_{\text{moteur}} - R_b - R_a = 0 \longrightarrow R_a = 20\text{N}$$

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{-Mb}{I_x} \longrightarrow \sigma_{\text{max}} = 10.8 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\text{max}} = \frac{VQ}{I_x t} \longrightarrow \tau_{\text{max}} = 0.372 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{vis max}} = \frac{F_{\text{max1}}}{A_1} \longrightarrow \sigma_{\text{vis max}} = 1.99 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\text{vis max}} = \frac{F_{\text{max2}}}{A_2} \longrightarrow \tau_{\text{vis max}} = 13.07 \text{ MPa}$$

#### Valeurs des termes utilisés dans les équations:

Fmoteur = 40 N

M = 3.72 Nm (moment fléchissant maximal)

b = 1,5875 mm ; t = 3.175 mm

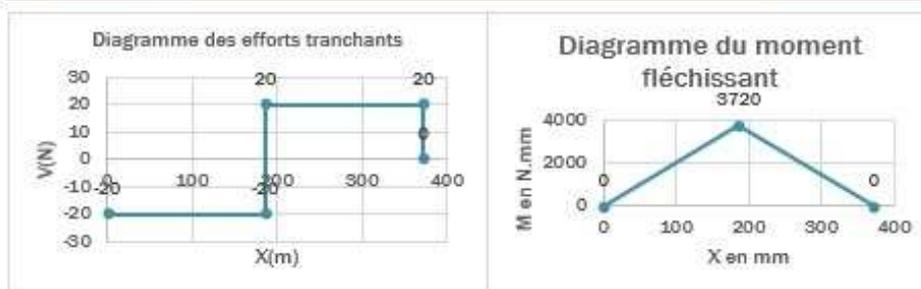
I<sub>x</sub> = 4335,744 mm<sup>4</sup> (second moment).

V = 20 N (Effort tranchant maximal)

F<sub>max1</sub> = 40/4 N ; F<sub>max2</sub> = 29.527\*4 N

A<sub>1</sub> = 5.03 mm<sup>2</sup> ; A<sub>2</sub> = 9.03 mm<sup>2</sup>

#### 3. GRAPHIQUE :



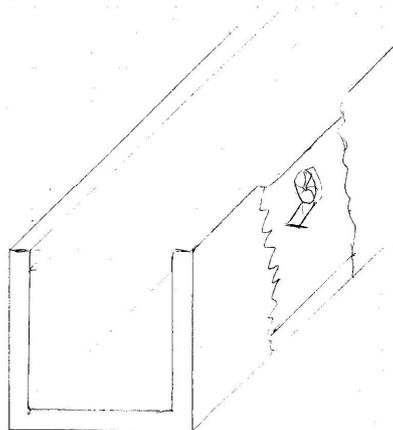
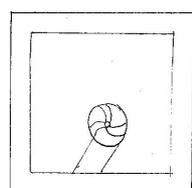
#### 4. INTERPRETATION:

Nous constatons que les vis utilisés pourront supporter les efforts des chargements y appliqués car la contrainte normale permise pour

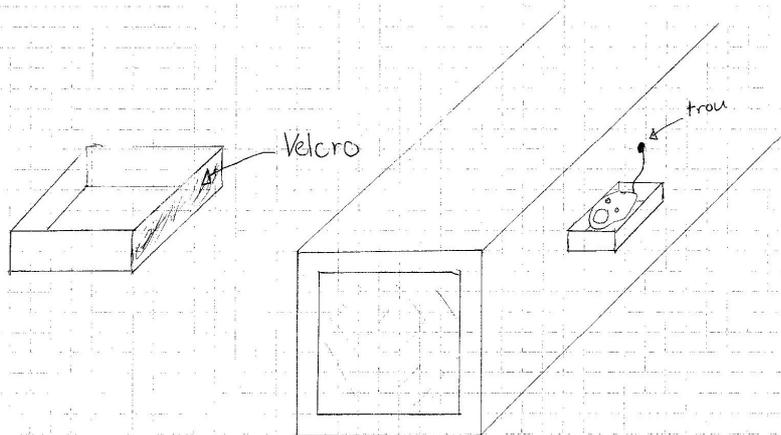
les vis est de 419,48 MPa >  $\sigma_{\text{vis max}} = 1,99 \text{ MPa}$  et la contrainte de cisaillement permise pour les vis est de

251,6 MPa >  $\tau_{\text{vis max}} = 13,07 \text{ MPa}$ .

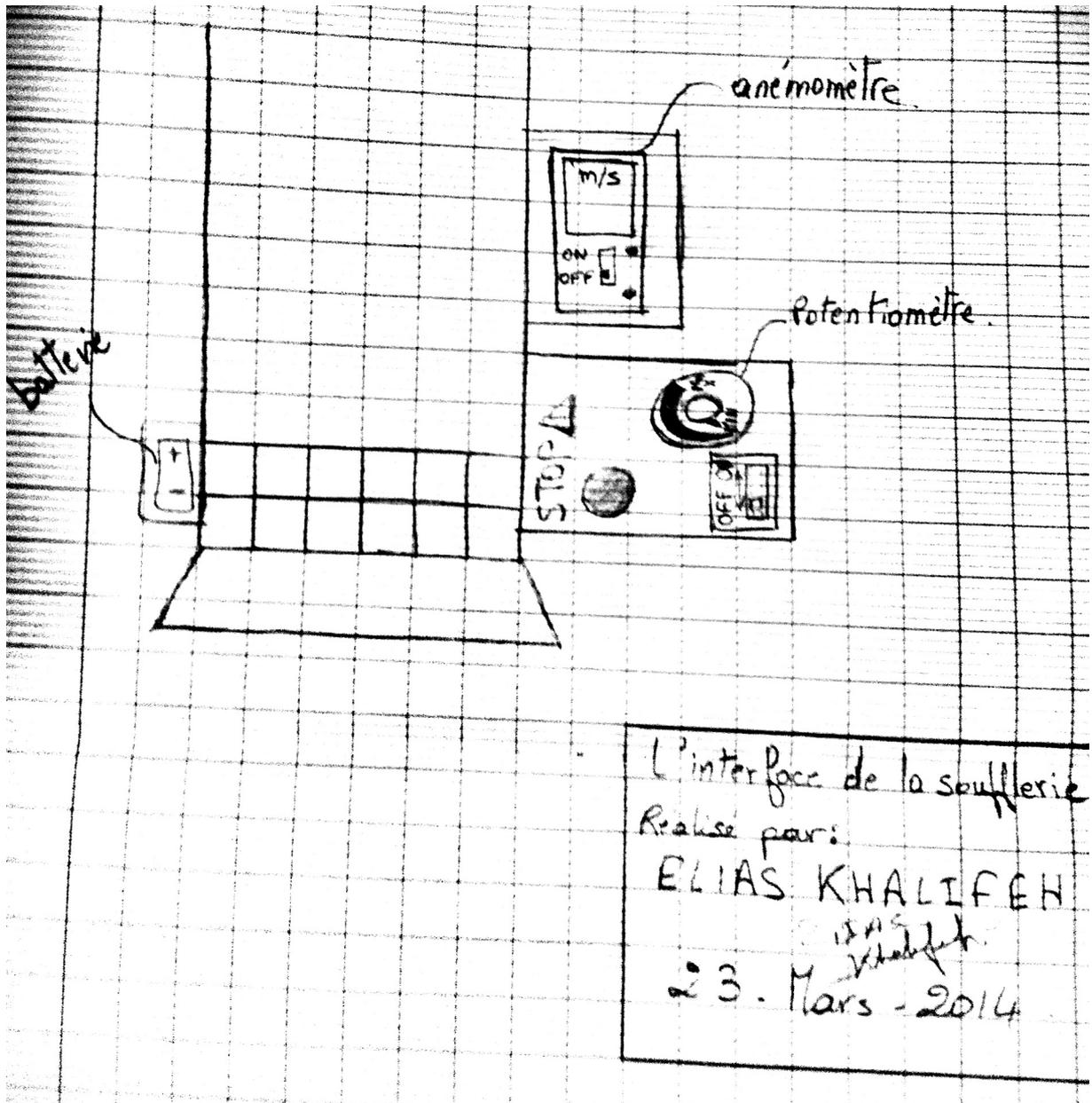
## ANNEXE K : CROQUIS INITIAUX

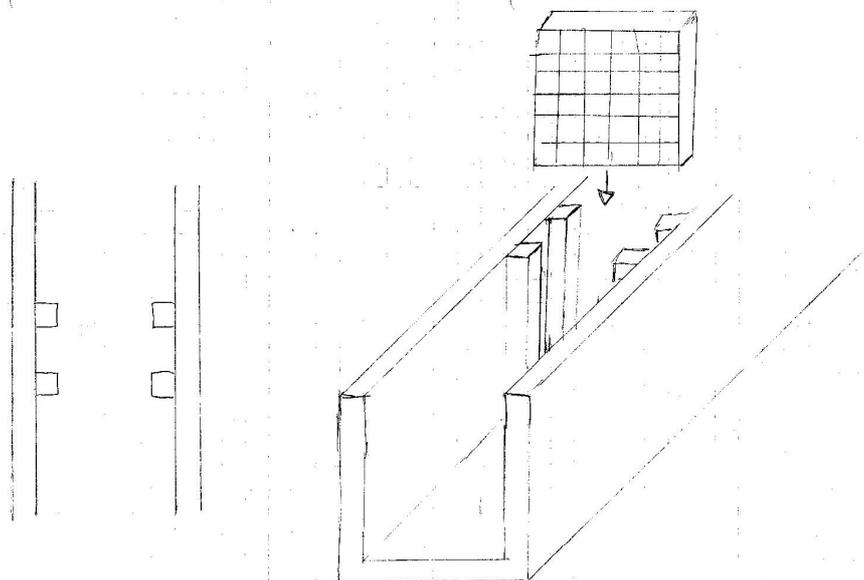


Anémomètre intérieur  
 Dessiné par  
 Danny Huynh  
 22 mars 2014

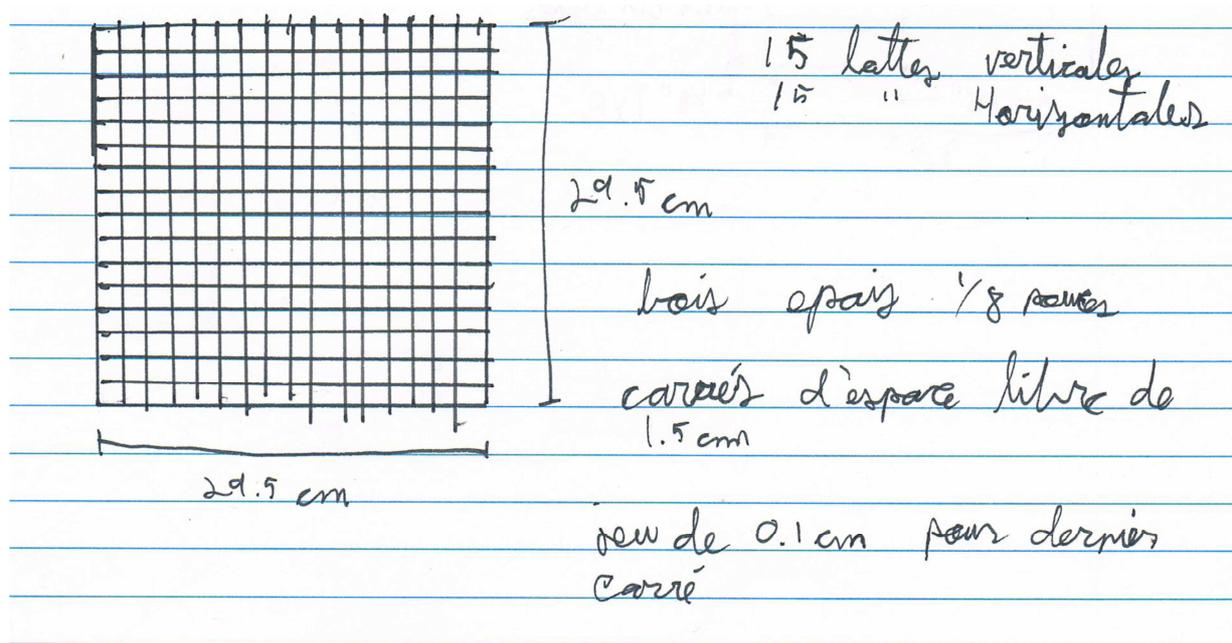


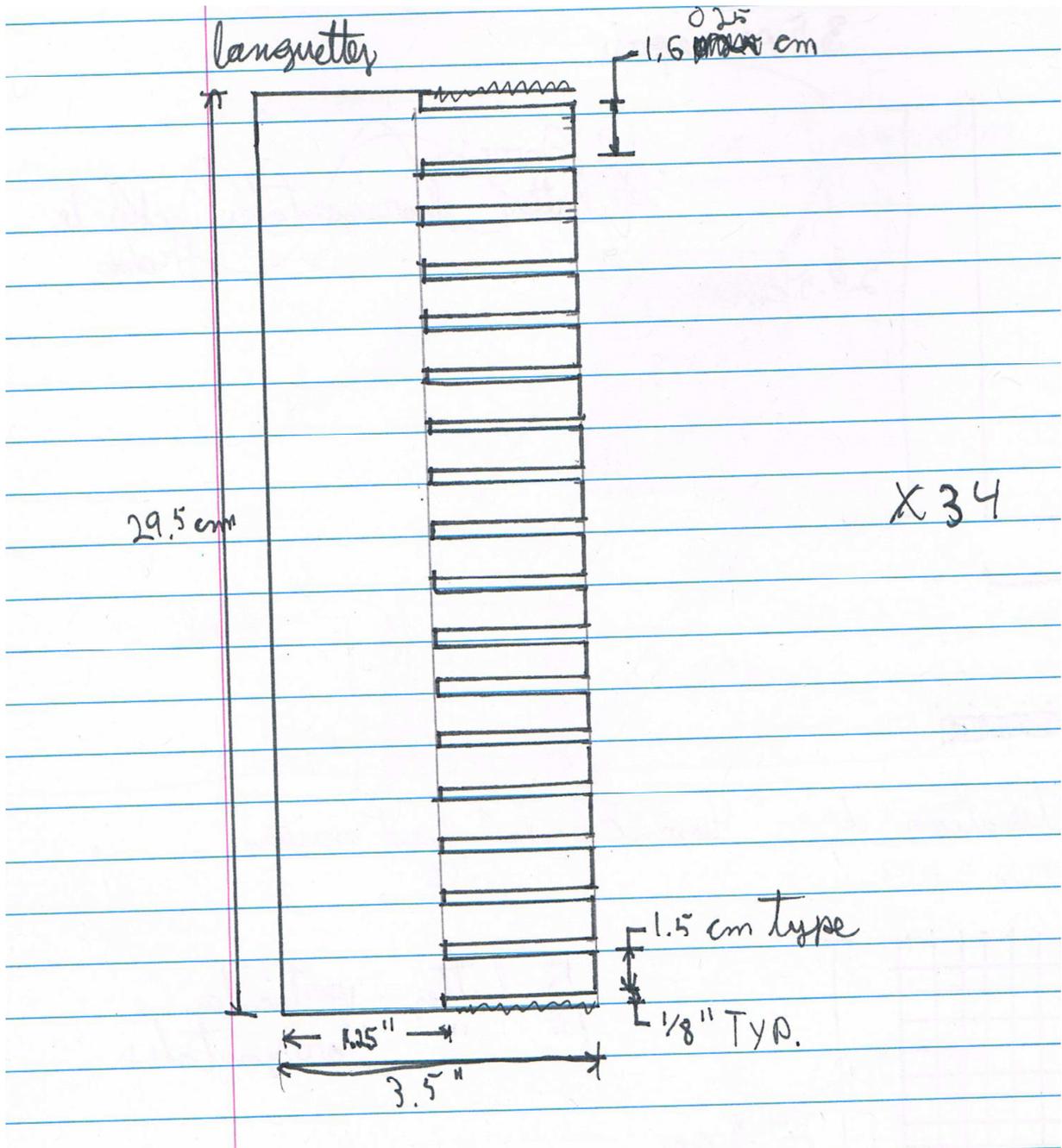
Support pour anémomètre  
 Dessiné par  
 Danny Huynh  
 22 mars 2014

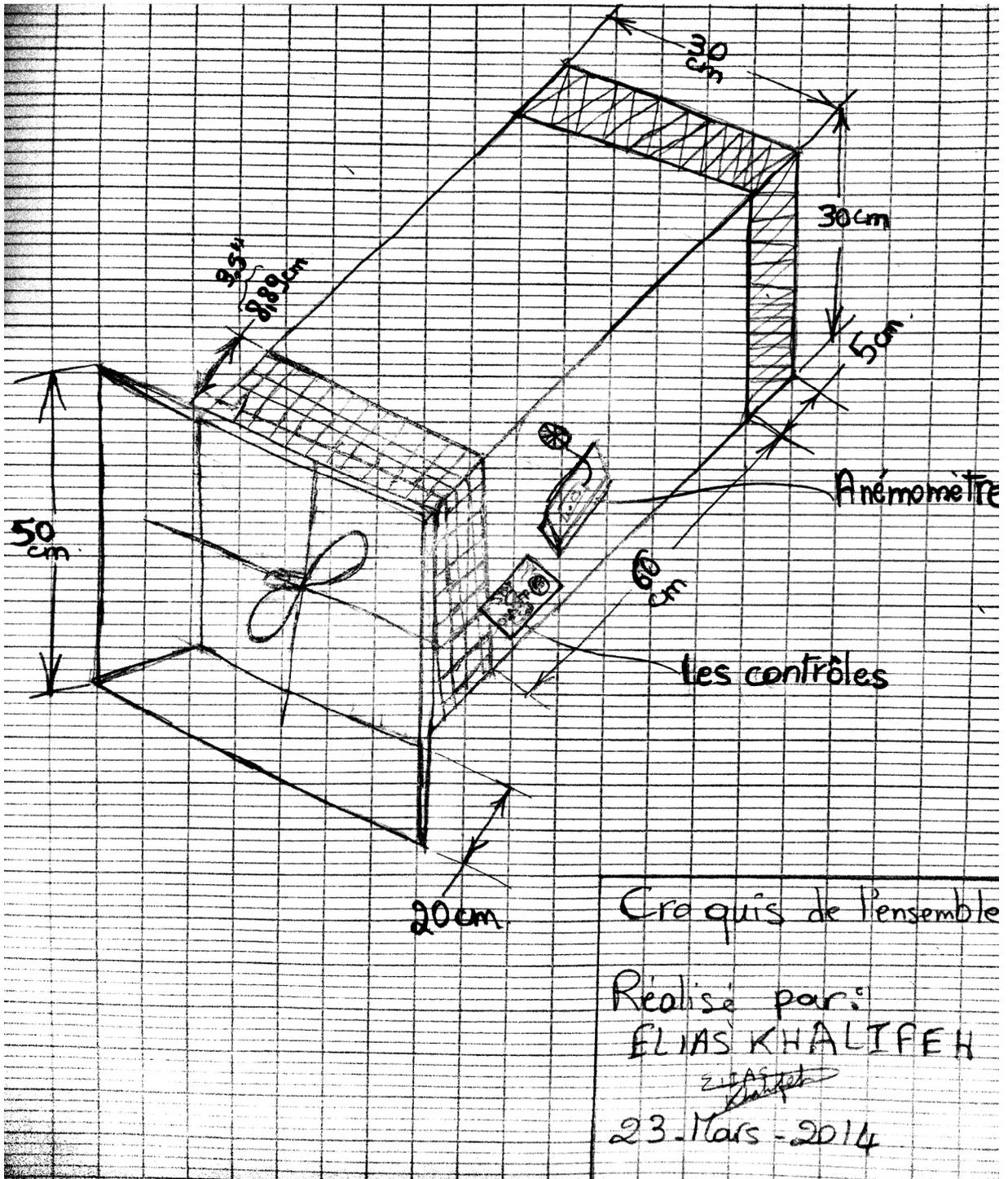




Assemblage du nid  
d'oiseille  
Dessiné par  
Danny Hünzler  
Edmore 2014







## ANNEXE L : ÉCHÉANCIER

### SEMAINE 8 (11/03/2014)

- Discussion avec la compagnie pour orienter le projet et définir la solution finale
- Recherche pour choisir les composants

### SEMAINE 9 (18/03/2014)

- Choix des composants (marques, modèles)
- Croquis général de la soufflerie avec les autres équipes de la compagnie
- Croquis des composants responsables de la génération du flux d'air

### SEMAINE 10 (25/03/2014)

- Achat des composants
- Fabrication de la soufflerie
- Calculs sur la résistance des matériaux et sur les flux d'air
- Élaboration des hypothèses
- Modélisation du système générateur du flux d'air

### SEMAINE11 (01/04/2014)

- Fabrication de la soufflerie
- Tests
- Gammes de fabrication
- Finition des dessins détaillés
- Fiche technique du système générateur du flux d'air
- Écriture du rapport

## ANNEXE M : FACTURE

**ÉQUIPE NO. 8**



**Facture 03**

**Date :** 7 avril 2014

**Pour :** Centre de développement pédagogique

**Destinataire :** Eric Morissette

300, rue Sicard, bureau 1.55\*  
Sainte-Thérèse (Québec) J7E 3X5

Membre de l'équipe	DESCRIPTION DES TÂCHES	COÛT
René Léveillé	Réunions d'équipe et de compagnie (recherche, achat des matériaux, négociation avec la compagnie)	1275\$
	Écriture du rapport final et modélisation (dessins détaillés)	675\$
	Fabrication de la soufflerie	1250\$
Claudiu Oltean	Réunions d'équipe et de compagnie (recherche, négociation avec la compagnie, choix des composants)	1275\$
	Recherche sur le flux d'air et calculs	450\$
	Écriture du rapport final, croquis	300\$
	Recherche sur la pression dynamique et les contraintes max des vis	550\$
Donovan Vandal	Réunions d'équipe (recherche, choix des composants)	950\$
	Recherche (résistance des matériaux, moteur AC)	200\$
	Écriture du rapport final, croquis, dessins détaillés	1375\$
	Fabrication de la soufflerie	600\$
Danny Huynh	Réunions d'équipe (recherche, choix des composants)	950\$
	Écriture du rapport final, croquis	400\$
	Recherche sur la relation moteur-flux d'air	100\$
	Fabrication de la soufflerie	600\$
Elias Khalifeh	Réunions d'équipe (recherche, choix des composants)	975\$
	Écriture du rapport final, croquis	500\$
	Fabrication de la soufflerie	400\$
Catherine Lemay	Réunions d'équipe (recherche choix des composants)	950\$
	Achat des matériaux	400\$
	Recherche : composants d'une soufflerie et règlements de sécurité	100\$
	Calculs sur la résistances des matériaux	300\$
	Écriture du rapport final	200\$
	<b>MONTANT AVANT TAXES</b>	<b>14 775\$</b>
	TPS (5%)	738,75
	TVQ (9.975%)	1473,81
	<b>MONTANT TOTAL</b>	<b>16 987,56\$</b>

\* Tarif horaire : 100

