



AER1110 – PROJET INITIAL EN GÉNIE AÉROSPATIAL

RAPPORT - ÉTUDE DE CAS N°3 CONCEPTION DE LA SOUFFLERIE – GÉNÉRATION DU FLUX D’AIR

présenté à
J.-Paul Lemarquis, ing. & Patrice Rémy, ing.

par
l'équipe n°6

Florentin Anne, 1679758
Pascale Berthiaume, 1688916
Wafaa Hana, 1687836
David Leblanc, 1688589
Cédric Leblond-Ménard, 1681918
Philippe Major, 1690705
Anthony Salconi, 1679938

le 14 avril 2014
à Montréal

Résumé

Ce rapport présente le raisonnement et les résultats de la troisième étude de cas effectuée dans le cadre du cours *AER1110 - Projet initial en génie aérospatial*. Il aborde ainsi la réflexion pour la conception et la réalisation d'un projet en réponse à la demande d'un client et de ses besoins mis en avant lors des précédentes études de cas. Il est constitué de l'approche utilisée pour déterminer les éléments de la génération du flux d'air, des éléments sélectionnés et du processus de la réalisation du produit.

Le rapport traite de l'étude de cas de la section génération de flux d'air d'une soufflerie qui sera utilisée par des élèves de secondaire IV et V. Il traite des critères de sélection des différents éléments qui composent chaque section et de la réflexion quant aux performances de la soufflerie liées à ces éléments. Chaque élément est alors étudié dans le rapport pour expliquer son apport au produit. Ce rapport insiste sur le matériel utilisé et sur les liens qui existent entre eux et qui influencent les résultats obtenus par la soufflerie.

Le choix du moteur a un aspect déterminant dans le processus de conception de la soufflerie, parce qu'il définit l'ordre de grandeur du poids et les performances du flux d'air. Il détermine aussi si le différentiel de pression a une grande incidence ou pas sur la circulation de l'air. Nous avons donc décidé de choisir un moteur de type *blower fan*, car il permet de supporter un plus grand différentiel de pression qu'un moteur à hélice.

Ce choix de moteur a aussi influencé le type de tuyère qui est convergente selon l'axe vertical et divergente selon l'axe horizontal. La tuyère ayant une géométrie particulière, le matériau choisi pour elle est l'aluminium qui est plus malléable que le bois. Le support a aussi été influencé par le moteur, car il a fallu en trouver un plus résistant que s'il s'agissait d'un petit moteur électrique.

Mots-clés: Soufflerie; Génération du flux d'air; Conception; Performances; Influence; Blower fan.

Abstract

The results and reflective process that came out of the third case study made for the *AER1110 - Projet initial en génie aérospatial* course are expose in this report. This report develop three main aspects: the process that brings us to the final choice of the airflow generation components, the components themselves and the construction phase. It also explain the main ideas that lead us to the chosen design and how it respects of the client's needs that we had determine in the previous studies.

While putting emphasis on the airflow generation system of a wind tunnel designed for high school students, this account describe the reasoning process under the choice of each components, including: requirements they must satisfied, expected performances, contribution to the airflow generation and also the interactions between the main components that will influence the wind tunnel efficiency.

We made the decision to use a blower fan for several reasons discussed in this report. The final choice of which engine will be used was taken while considering the potential pressure differential that will be created at the entrance of the tunnel and the blowing fan was judged the best alternative to solve this issue in opposition with a propeller.

The components surrounding the blower were especially chosen and designed to simplify the integration of this component with the rest of the wind tunnel. For example, the nozzle was made of aluminium, due to its excellent malleability, because the shape needed to fit the blower to the wind tunnel was unconventional. Also the choice of the structure that maintain the engine at the desired height was based on its ability to support heavy load.

Key words: Wind tunnel; Airflow generation; Design; Performing; Influence; Blower fan.

Table des matières

| | |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| Résumé | iii |
| Abstract | v |
| Introduction | 1 |
| Chapitre 1 SOMMAIRE DES REQUIS CONCEPTUELS ET TECHNIQUES | 3 |
| 1.1 Description, données et restrictions | 3 |
| 1.1.1 Détermination des aspects importants | 3 |
| 1.1.2 Restrictions et données | 3 |
| 1.1.3 Description de la soufflerie | 3 |
| 1.2 Suppositions, hypothèses de départ et interprétation | 4 |
| 1.2.1 Pression | 4 |
| 1.2.2 Débit et densité | 4 |
| 1.2.3 Laminarisation | 4 |
| 1.2.4 Vitesse du flux | 4 |
| 1.3 Références pertinentes | 4 |
| 1.3.1 Clients | 4 |
| 1.3.2 Professeurs | 4 |
| Chapitre 2 ANALYSE – EFFORTS EXTERNES | 7 |
| 2.1 Confirmation des hypothèses et suppositions nouvelles | 7 |
| 2.1.1 Rencontre avec Huu Duc Vo | 7 |
| 2.1.2 Rencontre avec Bruno Detuncq | 8 |
| 2.1.3 Suppositions nouvelles | 8 |
| 2.2 Description des charges | 9 |
| 2.2.1 Poids | 10 |
| 2.2.2 Normale | 10 |
| 2.2.3 Poussée du moteur | 10 |
| 2.2.4 Force de frottement statique | 11 |
| Chapitre 3 EFFORTS INTERNES | 13 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.1 Débit du moteur..... | 13 |
| 3.1.1 Vitesse dans la zone utilisable..... | 13 |
| 3.1.2 Vitesse à la sortie du moteur | 14 |
| 3.2 Perte de charge | 14 |
| 3.3 Choix du moteur..... | 15 |
| 3.4 Support du moteur..... | 15 |
| Chapitre 4 REALISATION DES SOUS-SYSTEMES ET DES COMPOSANTS..... | 17 |
| 4.1 Justifications des choix..... | 17 |
| 4.1.1 Le moteur | 17 |
| 4.1.2 Les redresseurs | 18 |
| 4.1.2.1 Huu-Duc-Vo..... | 18 |
| 4.1.2.2 Bruno Detuncq | 18 |
| 4.1.3 La tuyère..... | 19 |
| 4.2 Conséquences des choix..... | 19 |
| 4.2.1 Le moteur | 19 |
| 4.2.2 Les redresseurs | 19 |
| 4.2.3 La tuyère..... | 19 |
| Chapitre 5 REALISATION DU SYSTEME DE MESURE ET DES COMPOSANTS | 21 |
| 5.1 Centralisation, intégration et interprétation..... | 21 |
| 5.1.1 Microcontrôleur..... | 21 |
| 5.1.2 Affichage et interaction..... | 21 |
| 5.2 Prise de mesures et données | 22 |
| 5.2.1 Pression | 22 |
| 5.2.2 Température | 22 |
| 5.2.3 Anémomètre | 22 |
| 5.3 Programmation..... | 23 |
| Chapitre 6 FABRICATION ET ESSAIS..... | 25 |
| 6.1 Sous-ensemble artisanal réalisé & système de mesure | 25 |
| 6.1.1 Redresseurs..... | 25 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| 6.1.2 Tuyère..... | 25 |
| 6.1.3 Support du moteur..... | 25 |
| 6.1.4 Système de mesure..... | 26 |
| 6.1.4.1 Assemblage du circuit électrique..... | 26 |
| 6.1.4.2 Assemblage de l'anémomètre..... | 26 |
| 6.1.4.3 Installation du programme dans l'Arduino..... | 28 |
| 6.2 Interfaçage avec les autres sous-systèmes..... | 29 |
| 6.2.1 Redresseurs et veine d'essai..... | 29 |
| 6.2.2 Moteur et la veine d'essai..... | 29 |
| 6.2.3 Système de mesure et veine d'essai..... | 29 |
| 6.3 Essais..... | 30 |
| 6.3.1 Moteur..... | 30 |
| 6.3.2 Redresseurs..... | 30 |
| 6.4 Sensibilité du système de mesure réalisé..... | 30 |
| Chapitre 7 TABLEAU SYNTHÈSE DES PIÈCES ET DU PRODUIT..... | 31 |
| 7.1 Tableau synthèse..... | 31 |
| 7.2 Échéancier révisé..... | 32 |
| 7.3 Facture..... | 32 |
| Chapitre 8 TESTS, ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS..... | 33 |
| 8.1 Protocole de mesure..... | 33 |
| 8.2 Écart entre la valeur calculée et la valeur obtenue..... | 34 |
| 8.3 Interprétation des écarts..... | 35 |
| 8.3.1 Interprétation des écarts..... | 35 |
| 8.3.2 Intégration avec les autres départements..... | 35 |
| 8.3.2.1 Aspects positifs..... | 35 |
| 8.3.2.2 Éléments à améliorer..... | 36 |
| 8.3.2.3 Leçons retenues..... | 36 |
| Conclusion..... | 39 |
| ANNEXES..... | 41 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| Annexe A FICHE DU MOTEUR | 42 |
| Annexe B FACTURE | 43 |
| Annexe C DESSINS DE DÉTAILS ET D'ASSEMBLAGE DES REDRESSEURS | 44 |
| Annexe D ÉCHÉANCIER | 48 |
| Annexe E | 49 |
| Annexe F | 50 |
| Annexe G | 51 |
| Annexe H FICHES SYSTÈME DE MESURE | 54 |
| Fiche H.1 – Arduino | 54 |
| Fiche H.2 – LCD Shield | 55 |
| Fiche H.3 – BMP180 | 56 |
| Fiche H. 4 – Capteur effet hall | 57 |
| Fiche H.5 – Programmation du code | 58 |
| Fiche H.6 – Schéma électrique | 62 |
| Annexe I GAMME DE FABRICATION DES REDRESSEURS | 63 |

Liste des tableaux

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 2.1 – Conclusions de la rencontre avec Huu Duc Vo..... | 8 |
| Tableau 2.2 – Conclusions de la rencontre avec Bruno Detuncq..... | 8 |
| Tableau 2.3 – Comparaison entre un ventilateur centrifuge industriel et un <i>blower fan</i> | 9 |
| Tableau 3.1 – Caractéristiques de l'aile lors de la mesure de la portance | 13 |
| Tableau 6.1 – Vitesse du flux d'air en fonction du nombre de redresseurs | 30 |
| Tableau 7.1 – Tableau synthèse | 31 |
| Tableau 7.2 – Facture | 32 |
| Tableau 8.1 – Mesures prises le 8 avril 2014 lors des tests effectués sur la soufflerie | 34 |
| Tableau 8.2 – Vitesses d'écoulement théoriques et réelles ainsi que l'écart..... | 35 |

Liste des figures

| | |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 2.1 – Ventilateur centrifuge industriel | 9 |
| Figure 2.2 – <i>Blower fan</i> de type « séchoir à tapis » | 9 |
| Figure 2.3 – DCL du moteur | 10 |
| Figure 3.1 – Tuyère divergente | 14 |
| Figure 5.1 – Démonstration anémomètre | 22 |
| Figure 6.1 – Schéma de la fiche 6 | 26 |
| Figure 6.2 – Retrait du circuit imprimé du boîtier de l'hélice..... | 27 |
| Figure 6.3 – Retrait de l'anneau magnétique | 27 |
| Figure 6.4 – Collage du transistor à effet Hall | 28 |
| Figure 6.5 – Assemblage final de l'anémomètre..... | 28 |
| Figure 7.1 – Notre moteur | 31 |
| Figure 7.2 – Nos redresseurs | 31 |
| Figure 7.3 – La tuyère | 31 |
| Figure 7.4 – Notre système Arduino | 32 |
| Figure 7.5 – La soufflerie finale | 32 |

Introduction

Suite aux deux études de cas que nous avons réalisé préalablement, nous avons établi les besoins des clients, puis nous avons trié les besoins qui étaient en lien avec la génération du flux d'air qui représentait l'aspect de la soufflerie dont nous étions en charge. Lors de la deuxième étude de cas, nous avons également imaginé une soufflerie et réalisé des croquis.

Le but de la troisième et dernière étude de cas était de réaliser une soufflerie. Pour cela, nous avons été regroupés avec deux autres équipes (portance et structure). Il fallait donc mettre en commun nos idées afin d'avoir une soufflerie la plus performante tout en répondant aux besoins du client. Ce rapport est divisé en 9 parties distinctes et le tout représente notre cheminement vers notre soufflerie finale.

Tout d'abord, le premier chapitre portera sur le sommaire des requis conceptuels et techniques. Ensuite, le deuxième chapitre consistera en l'analyse des efforts internes. Puis, le troisième chapitre représentera les systèmes de mesure sous forme d'analyse des efforts internes. Le quatrième chapitre montrera la réalisation des sous-systèmes et ses composants à l'aide de calculs et de justifications. Pour ce qui est du cinquième chapitre, il montrera, de la même manière que le quatrième, la réalisation des systèmes de mesures et ses composants. Puis, le sixième chapitre expliquera notre fabrication et nos essais pour ensuite expliquer les tests, l'analyse et l'interprétation des résultats dans le septième chapitre. Le huitième chapitre réunira les pièces et le produit dans un tableau synthèse et finalement, le dernier chapitre portera sur la performance de notre soufflerie.

Chapitre 1

SOMMAIRE DES REQUIS CONCEPTUELS ET TECHNIQUES

Ce chapitre permet de démontrer l'idée générale de la soufflerie ainsi que les hypothèses générales ou encore les suppositions qui ont été soumises.

1.1 DESCRIPTION, DONNEES ET RESTRICTIONS

1.1.1 Détermination des aspects importants

Premièrement, il nous a fallu déterminer l'idée générale de notre soufflerie. Pour cela, il a fallu déterminer les données les plus importantes en lien avec les besoins des clients que chaque équipe avait contactés. De plus, comme des points peuvent être enlevés ou ajoutés aux équipes ayant la vitesse la plus grande (1 point), le poids le moins élevé (2 points) ou encore la portance la plus grande (3 points), il a également fallu tenir compte de ce facteur. Tous ces points nous ont donc permis, par la suite, de déterminer certaines restrictions.

1.1.2 Restrictions et données

Dans notre cas, comme la génération de portance est ce qui impliquait le plus de points et qu'elle avait un lien direct avec la génération d'une grande vitesse ($3+1 = 4$ points), nous avons décidé qu'il était plus important de se concentrer sur ces deux aspects plutôt que de se concentrer sur le poids de notre soufflerie (2 points). Il a donc été conclu que l'importance principale était d'avoir un moteur permettant d'obtenir une grande vitesse, mais ayant un poids plus élevé. Ensuite, les rencontres avec les clients ont permis d'établir une soufflerie ayant une zone utilisable de 30 x 30 x 60 centimètres et ayant un coût ne dépassant pas les 1000 \$. Aussi, le poids de la soufflerie n'était pas considéré comme l'un des facteurs les plus importants, tant qu'il était possible de la transporter d'une classe à l'autre.

1.1.3 Description de la soufflerie

Grâce aux restrictions que nous nous sommes données, il nous a été possible d'établir vaguement l'aspect de notre soufflerie. Celle-ci est ouverte et possède une zone utilisable de 30 x 30 x 60 centimètres. Un système Arduino permettrait la prise de données et il y aurait des fils ou rubans ainsi que de la fumée qui permettraient de visualiser l'écoulement.

1.2 SUPPOSITIONS, HYPOTHESES DE DEPART ET INTERPRETATION

1.2.1 Pression

Lors de la conception de la soufflerie, nous avons considéré un moteur qui permettait de négliger le différentiel de pression. Soit la différence entre la pression à la entrée du moteur et celle à la sortie du moteur. Par contre, si nous choisissons un moteur à hélice, cela pourrait causer un différentiel de pression et donc une perte de charge.

1.2.2 Débit et densité

Afin de rendre les calculs plus simples et ainsi pouvoir déterminer une portance approximative, nous avons supposé que le débit et la densité de l'air étaient constants dans toute la soufflerie. Cela a donc permis de déterminer la portance associée à une certaine vitesse de flux.

1.2.3 Laminarisation

Au départ, nous pensions que la tuyère aiderait à la laminarisation du flux d'air, mais pour avoir un bel écoulement, nous avons pensé à un filtre à alvéole. Par contre, la création d'un filtre à alvéole peut prendre du temps.

1.2.4 Vitesse du flux

Avant de déterminer le choix du moteur, nous savions dès le départ qu'un grand débit d'air allait être associé à des coûts plus élevés. Nous avons donc conclu qu'il faudrait se fixer une limite de prix pour ne pas dépasser le budget de chacun.

1.3 REFERENCES PERTINENTES

1.3.1 Clients

Pour déterminer l'aspect général de la soufflerie, nous avons utilisé les références des clients de chaque équipe. Nous nous sommes donc échangés nos deux premières études de cas afin de voir les aspects importants de tous clients. Il nous a été possible de voir que les besoins du client d'une équipe à l'autre étaient semblables.

1.3.2 Professeurs

Pour avoir de plus amples informations sur l'écoulement d'air et sa laminarisation, nous avons rencontré deux professeurs de thermodynamique, soit Huu Duc Vo et Bruno Detuncq, qui ont su nous informer davantage. Par exemple, M. Vo a pu nous informer sur le différentiel de

pression qui serait causé par un moteur à hélice alors que M. Detuncq a pu nous informer en ce qui concerne l'écoulement d'air.

Chapitre 2

ANALYSE – EFFORTS EXTERNES

Les efforts externes associés à la génération du flux d'air dans la soufflerie concernent le moteur et ses interactions avec son environnement immédiat. Plusieurs aspects importants quant à la caractérisation du flux d'air ont été pris en compte pour le choix du moteur et c'est pourquoi nous avons finalement opté pour un *blower fan* de type « séchoir à tapis ». Ce type de moteur a été confirmé par plusieurs experts et son analyse détaillée de même que les explications entourant son choix seront développées dans le présent chapitre.

2.1 CONFIRMATION DES HYPOTHÈSES ET SUPPOSITIONS NOUVELLES

Afin de vérifier si les hypothèses de départ que nous avons faites étaient valides, nous avons rencontré deux experts dans le domaine de l'aérothermique et de la mécanique des fluides, soit Huu Duc Vo, professeur agrégé du Département de génie mécanique, ainsi que Bruno Detuncq, professeur adjoint du Département de génie mécanique. Nous avons contacté ces deux professeurs, qui enseignent à l'École Polytechnique de Montréal, afin de connaître leur avis sur nos hypothèses et sur la façon dont nous voulions générer le flux d'air dans la soufflerie.

2.1.1 Rencontre avec Huu Duc Vo

Tout d'abord, nous avons rencontré M. Vo le 17 mars 2014 de 13h à 13h30 afin de valider si nos hypothèses concernant la tuyère et le redressement du flux d'air étaient valides. Il nous a alors expliqué que dans la majorité des souffleries commercialisées, le redressement du flux d'air se fait à l'aide de moustiquaires en série et non avec un filtre à alvéole. Selon lui, l'utilisation de moustiquaires est plus simple et plus efficace. Aussi, nous lui avons demandé si l'emploi d'une tuyère nous aiderait à laminariser le flux d'air et il nous a répondu que ce n'était pas son rôle. En effet, la tuyère sert à accélérer les particules d'air et non à les redresser. Nous lui avons aussi expliqué notre design de soufflerie, qu'il a approuvé, et nous lui avons fait part du type de moteur à utiliser et il nous a recommandé de rencontrer M. Detuncq pour ce sujet. Le tableau 2.1 ci-dessous résume les conclusions de notre rencontre avec M. Vo.

Tableau 2.1 – Conclusions de la rencontre avec Huu Duc Vo

| Hypothèses | Conclusions |
|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Utilisation d'un filtre à alvéole pour redresser le flux d'air. | Hypothèse valide, mais il serait plus simple et plus efficace d'utiliser des moustiquaires en série. |
| Utilisation d'une tuyère pour redresser le flux d'air. | Hypothèse invalide, car le rôle d'une tuyère est d'accélérer le flux d'air et non de le redresser. |

2.1.2 Rencontre avec Bruno Detuncq

Ensuite, nous avons rencontré M. Detuncq le 18 mars 2014 de 14h à 14h30 afin de discuter du type de moteur à utiliser. Notre principal questionnement concernait la source du flux d'air, c'est-à-dire la façon dont nous voulions générer le flux d'air. Nous avons le choix entre une *fan* ou un *blower fan* et bien que nos hypothèses pointaient dans la direction de ce dernier, nous voulions l'avis d'un expert en la matière afin de valider notre choix. M. Detuncq a confirmé qu'une *fan* ne supporterait pas le différentiel de pression dans la soufflerie tandis qu'un *blower fan* est fait pour le supporter. Il nous a conseillé d'utiliser un ventilateur centrifuge de type cage d'écureuil et nous a fourni une liste d'entreprises montréalaises vendant de tel ventilateurs. Enfin, il nous a aussi conseillé de calculer le débit volumique (CFM) que nous avons besoin selon la vitesse que nous voulons dans la zone utilisation. Le tableau 2.2 ci-dessous résume les conclusions de notre rencontre avec M. Detuncq.

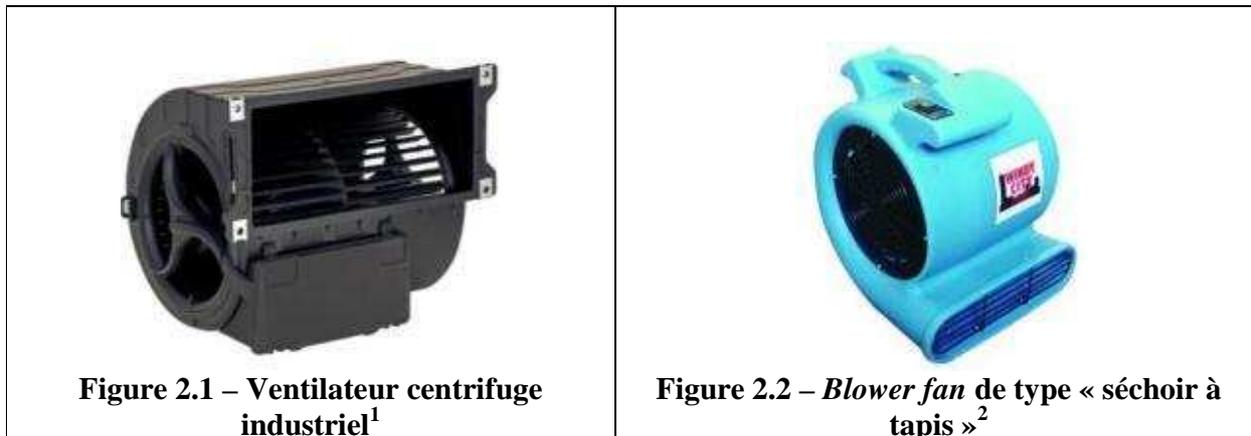
Tableau 2.2 – Conclusions de la rencontre avec Bruno Detuncq

| Hypothèses | Conclusions |
|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Utilisation d'un <i>blower fan</i> plutôt qu'une <i>fan</i> . | Hypothèse valide, de même que recommandation pour un ventilateur centrifuge de type cage d'écureuil. |

2.1.3 Suppositions nouvelles

Ces deux rencontres nous ont permis de concentrer sérieusement nos recherches sur les ventilateurs centrifuges de type cage d'écureuil. Ainsi, les entreprises que M. Detuncq nous avait conseillées de jeter un coup d'œil s'avéraient être trop industrielles pour nous. Idem pour les ventilateurs centrifuges de type cage d'écureuil, qui était tout simplement hors de prix. Toutefois, nous avons remarqué que plusieurs détaillants comme Home Depot vendaient des *blower fan* pour sécher les tapis et ces types de moteur correspondaient à ce que nous cherchions, puisqu'ils sont des ventilateurs centrifuges, mais ils sont beaucoup plus abordables et plus adaptés à nos besoins. Le tableau 2.3 ci-dessous présente ces deux types de moteur.

Tableau 2.3 – Comparaison entre un ventilateur centrifuge industriel et un *blower fan*



2.2 DESCRIPTION DES CHARGES

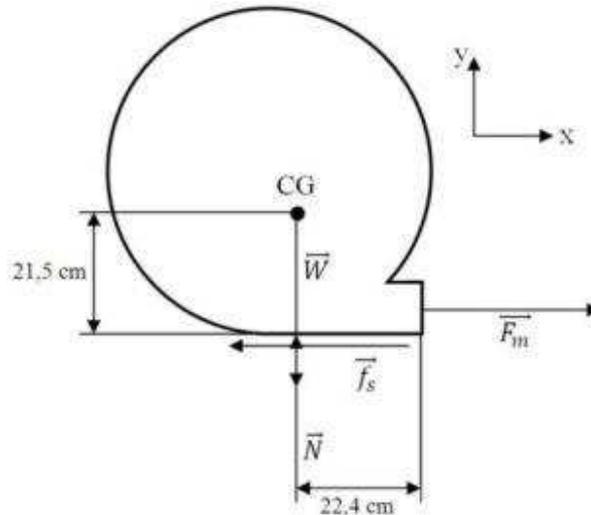
Lorsque le moteur est assemblé avec les autres éléments de la soufflerie, deux principales charges sont exercées. D’abord, comme le moteur repose sur un support, une force est exercée sur ce dernier, soit le poids du moteur. Par la troisième loi de Newton, une force réactionnelle apparaît dans le support dans le même sens que le poids, mais de direction opposée ; c’est la force normale. Ces deux forces agissent selon un axe vertical et sont de valeur égale, car le système est équilibré. En effet, si le système n’était pas équilibré, cela voudrait dire que le moteur briserait le support. Une analyse de résistance des matériaux effectuée par le département du maintien structurel de notre compagnie a permis de conclure que le support est assez résistant pour soutenir le poids du moteur et donc, que le système est équilibré.

Ensuite, le but de notre moteur étant de générer le flux d’air, il va de soit que le moteur exerce une force à sa sortie sur les particules d’air : la poussée du moteur. Pour empêcher le moteur de se mouvoir selon un plan horizontal, une force de frottement statique agit entre le moteur et son support de la même façon que la normale, c’est-à-dire dans le même sens que la poussée, mais de direction opposée. Ces deux forces agissent selon un axe horizontal et sont de même valeur puisque le système est équilibré selon cet axe aussi. La figure 2.2 ci-dessous résume le diagramme de corps libre (DCL) du moteur, où sont représentées les forces exercées par le moteur et agissant sur ce dernier.

¹ Direct Industry, (2012). Ventilateur centrifuge. Tiré de http://img.directindustry.fr/images_di/photo-g/ventilateurs-centrifuges-9357-2812065.jpg

² Equip Supply, (2013). Carpet blower. Tiré de http://assets.equipsupply.com/vendors/BCI_%20BRIDGE%20CONSULTING_%20INC%20-%20100373/FANS%20-%20306/FAN%20PB1200/pics/PB12001-carpet%20blower.big.jpg

Figure 2.3 – DCL du moteur



2.2.1 Poids

Comme notre moteur possède une masse de 15,68 kg (les caractéristiques complètes de notre moteur seront données dans le chapitre 4), un petit calcul nous a permis de déterminer que son poids est de 153,82 N. Voici comment nous avons procédé :

$$W = m \cdot g = 15,68 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 153,82 \text{ N}$$

Cette force est appliquée à partir du centre de gravité CG du moteur (voir le DCL du moteur, figure 2.2 ci-dessus, pour sa position) et est dirigée vers le bas.

2.2.2 Normale

Comme expliquée plus tôt, la normale possède la même valeur que le poids, donc la force normale est de 153,82 N. Elle est appliquée sur la base du moteur qui repose sur le support et elle est dirigée vers le haut.

2.2.3 Poussée du moteur

Pour calculer la poussée du moteur, nous n'avons à priori aucune équation à utiliser. Nous nous sommes donc servis de notre raisonnement mathématique et physique pour développer une équation permettant de la calculer. Ainsi, nous avons :

$$F = m \cdot a$$

Nous savons que $a = \frac{dv}{dt}$, donc pour une masse constante et une vitesse variable, nous avons :

$$F = m \cdot \frac{dv}{dt}$$

Et pour une variation de la masse et pour une vitesse constante, ce qui correspond à notre cas, nous avons :

$$F = \frac{dm}{dt} \cdot v = \dot{m} \cdot v$$

Nous avons donc que la poussée est fonction du débit massique et de la vitesse de l'air à la sortie du moteur. Toutefois, sachant que le débit massique est égal au produit du débit volumique par la densité de l'air et que le débit volumique est égal au produit de la vitesse du flux par l'air de sortie du moteur, nous avons :

$$F = \dot{V} \cdot \rho \cdot v = (v \cdot A) \cdot \rho \cdot v = \rho \cdot A \cdot v^2$$

Pour que cette équation soit valide, nous avons fait la supposition que la densité de l'air reste constante et qu'elle est égale à la densité au niveau de la mer à 15 °C. Cette supposition est plausible, car la soufflerie ne change pas d'altitude lors de son utilisation et la variation de température de l'air sur un petit laps de temps est négligeable. De plus, afin de valider notre équation, nous avons cherché à vérifier si elle existait déjà. Ainsi, voici l'équation utilisée pour calculer la poussée des moteurs à réaction³ :

$$F = \dot{m} \cdot v + A \cdot (P_{out} - P_{in})$$

Toutefois, nous avons fait la supposition que la différence de pression entre la sortie et l'entrée du moteur est négligeable, donc que $P_{out} \approx P_{in}$. Ainsi, l'équation permettant de calculer la poussée du moteur correspond à celle que nous avons trouvé et donc, sachant que nous avons mesuré une vitesse de sortie de 27 m/s, que la densité de l'air⁴ au niveau de la mer à 15 °C est de 1,225 kg/m³ et que l'aire de la zone de sortie du moteur est de 0,0537 m², la poussée du moteur est de 47,955 N :

$$F_m = \rho \cdot A \cdot v^2 = (1,225 \text{ kg/m}^3)(0,0537 \text{ m}^2)(27 \text{ m/s})^2 = 47,955 \text{ N}$$

2.2.4 Force de frottement statique

Afin de compenser la poussée du moteur, la force de frottement statique doit être de la même valeur que la poussée. Ainsi, la force de frottement statique est de 47,955 N. Toutefois, pour valider si les conditions d'équilibre sont respectées, il faut vérifier si cette force est plus petite que la force de frottement statique maximale permise, qui est fonction de la normale et du coefficient de frottement statique des matériaux utilisés. Comme la base du moteur est en matières plastiques et que le support est aussi en matières plastiques, nous savons que le coefficient de frottement statique pour une interface plastique/plastique est de 0,5. Donc, la force de frottement statique maximale est :

$$f_{s,max} = \mu_s \cdot N = 0,5 \cdot 153,82 \text{ N} = 76,91 \text{ N}$$

Comme la force de frottement statique calculée à partir de la poussée du moteur est plus petite que la valeur maximale, alors le système est en équilibre :

$$f_s < f_{s,max} \rightarrow 47,955 \text{ N} < 76,91 \text{ N}$$

³ Poussée, (s.d.) Dan *Wikipédia*. Consulté le 5 avril 2014, tire de <http://fr.wikipedia.org/wiki/Pouss%C3%A9e>

⁴ Density of air. (s.d.). Dans *Wikipédia*. Consulté le 1^{er} avril 2014, tiré de http://en.wikipedia.org/wiki/Density_of_air

Chapitre 3

EFFORTS INTERNES

Le choix du moteur étant un élément déterminant pour la génération du flux d'air, des critères de sélections précis, c'est-à-dire ses caractéristiques, permettent de déterminer le type du moteur. Le moteur qui répond le mieux à ces critères est alors sélectionné. Le débit généré par le moteur et sa capacité à pousser l'air malgré un différentiel de pression sont deux critères importants.

3.1 DEBIT DU MOTEUR

3.1.1 Vitesse dans la zone utilisable

Pour déterminer le débit désiré pour le moteur, il faut d'abord connaître la vitesse voulue dans la zone utilisable. Pour ce faire, quelques caractéristiques doivent être connues, puisque le but principal de la soufflerie est de créer de la portance sur une aile. Les caractéristiques de l'aile sont fournies dans le tableau 3.1 ci-dessous par l'équipe s'occupant de la mesure de la portance.

Tableau 3.1 – Caractéristiques de l'aile lors de la mesure de la portance

| | |
|--------------------------|--------|
| α : Alpha (degré) | 13 |
| C_L | 2,2919 |
| E: Envergure (m) | 0,183 |
| C: Corde (m) | 0,3 |

La portance étant liée à la vitesse, mais pouvant varier, il a été décidé de la fixer à une valeur typique et réaliste de 15 N pour ainsi donner un ordre de grandeur pour la vitesse du flux d'air dans la zone utilisable.

La vitesse de l'air dans la zone utilisable peut être trouvée, pour une densité de l'air ρ de 1,225 kg/m³ et avec les caractéristiques de l'aile données, par l'équation (voir Annexe E) :

$$v_2 = \sqrt{\frac{2L}{\rho \cdot C_L \cdot E \cdot C}} = 14 \text{ m/s} \quad (3.1)$$

La vitesse dans la zone utilisable doit donc être d'au moins 14 m/s pour générer une force de portance de 15 N avec l'aile fabriquée par l'équipe s'occupant de mesurer la portance. Puisqu'en pratique les résultats ne sont pas exactement les mêmes qu'en théorie, nous avons conservé une précision minimale dans les résultats.

3.1.2 Vitesse à la sortie du moteur

Pour déterminer la vitesse que doit atteindre le moteur, il faut trouver le débit dans la zone utilisable. Par conservation du débit massique dans l'écoulement, le débit d'air dans la zone utilisable est le même qu'à la sortie du moteur. La vitesse à la sortie du moteur est donnée par l'équation :

$$\text{---} \quad (3.2)$$

L'aire de la sortie du moteur étant plus petite que celle de la zone utilisable et tournant autour de $0,05 \text{ m}^2$, la vitesse à la sortie du moteur est de l'ordre de 25 m/s .

3.2 PERTE DE CHARGE

Puisque l'aire de la coupe transversale de la zone utilisable n'est pas égale à l'aire de la sortie du moteur, l'air doit passer par une tuyère divergente pour se rendre du moteur jusqu'à la zone utilisable. Lorsque l'air rencontre les parois de la tuyère, une petite partie de cet air est freiné, créant ainsi une accumulation de matière sur les parois. Cela crée alors une perte de pression qu'on appelle perte de charge et notée Δp . Pour le cas idéal où la tuyère est divergente, comme illustré par la figure 3.1 ci-dessous, la formule⁵ de la perte de charge est :

$$\text{---} \quad (3.3)$$

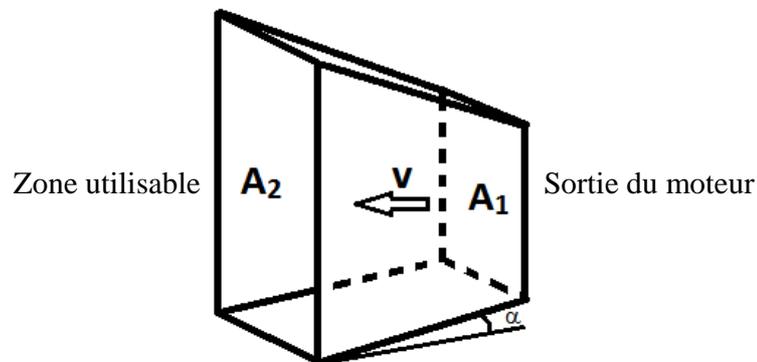


Figure 3.1 – Tuyère divergente

La perte de charge avec l'aire de la sortie du moteur à $0,05 \text{ m}^2$ et de la zone utilisable de $0,09 \text{ m}^2$ avec une vitesse à la sortie de 25 m/s avec un angle de $5,5^\circ$ est de $7,2 \text{ Pa}$. Le moteur devra donc combattre cette augmentation de pression pour faire avancer l'air à la vitesse désirée.

⁵ CHAUSSEDENT, Stéphane. *Université d'Angers* (page consultée le 6 avril 2014), [en ligne], http://res-nlp.univ-lemans.fr/NLP_C_M02_G02/co/Contenu_32.html.

3.3 CHOIX DU MOTEUR

Le moteur devra donc pouvoir pousser l'air à au moins 25 m/s pour créer la portance de 15 N dans la zone utilisable. Il devra aussi résister à une augmentation de la pression dans la tuyère de l'ordre de 7,2 Pa. De plus, d'autres pertes de pression peuvent arriver durant l'expérimentation que nous ne pouvons calculer. Par contre, nous pouvons estimer qu'il y aura d'autres pertes quand l'air va passer dans le redresseur.

En faisant des recherches, nous avons constaté qu'un moteur à hélice ne pouvait pas supporter un trop grand différentiel de pression qui est créé par les pertes de charge. Nous en avons discuté avec Huu Duc Vo et Bruno Detuncq, deux professeurs de l'École Polytechnique, et ils nous ont conseillé de considérer l'option d'une soufflante à cage d'écureuil.

Le principe de ce type de moteur est qu'il agit comme un compresseur centrifuge. Donc les aubes poussent parallèlement l'air à sa direction. Ce moteur peut donc supporter une augmentation de la pression en continuant de pousser l'air. Il n'a donc pas la même limite de différentiel de pression que les moteurs à hélice.

Un des inconvénients de la soufflante à cage d'écureuil est son poids qui tourne généralement autour de 15 kg ce qui le rend beaucoup plus massif qu'un moteur électrique. Mais nous avons considéré que la soufflante était cependant plus avantageuse que le moteur à hélice.

3.4 SUPPORT DU MOTEUR

Pour le support du moteur, nous utilisons une caisse à lait, car très résistant et facilement accessible. Il peut supporter au moins 18 kg, soit 176,6 N, de lait en compression dans le fond et en cisaillement dans la jonction entre le fond et les côtés (voir Annexe G). Le moteur ne pesant pas plus que 18 kg, il peut facilement être soutenu par la caisse à lait.

La poussée du moteur étant de 48 N (à valider au chapitre 2) la force de cisaillement engendrée (voir Annexe G) ne dépasse pas 176,6 N, donc la caisse ne cédera pas lorsque la soufflante sera en marche.

La caisse à lait pourra donc supporter la soufflante à cage d'écureuil sans danger de bris. De plus, elle est disponible dans les écoles et n'est pas très dispendieuse.

Chapitre 4

RÉALISATION DES SOUS-SYSTÈMES ET DES COMPOSANTS

4.1 JUSTIFICATIONS DES CHOIX

Nous allons voir dans cette section les raisons pour lesquelles nous avons décidé d'utiliser le moteur que nous avons choisi, le type de redresseur que nous avons pris ainsi que la tuyère dont nous avons inventé le concept.

4.1.1 Le moteur

Nous avons choisi de générer le flux d'air avec un sècheur à tapis. Les calculs de vitesse, de pression et de portance ont déjà été réalisés dans les chapitres 2 et 3. Ils donnent des résultats semblables aux autres types d'alimentation de flux d'air auxquelles nous avons pensés. Pour avoir d'autres informations concernant le moteur, voir la fiche du moteur à l'Annexe A.

Notre sècheur à tapis nous a été prêté par la direction d'une école secondaire, ce qui nous a permis de réduire les coûts totaux entourant la soufflerie, un critère qui s'est avéré très important lorsque nous avons sondé les écoles lors de la première étude de cas. Ceci réduit également la difficulté à se procurer le matériel, puisque le moteur était, selon notre équipe, le composant de la soufflerie le plus difficile à se procurer.

Nous avons quand même trouvé des fournisseurs de moteurs semblables à celui que nous avons choisi, tous générant entre 2000 et 3000 CFM, comme notre modèle, donc si une école n'a pas accès à son propre souffleur, ils pourront en louer un ou bien en acheter un.

Le souffleur à tapis est également très sécuritaire. Il n'y a aucune façon d'avoir accès à l'intérieur, peu importe le souffleur choisi. Nous n'avons donc pas besoin de rajouter de systèmes de sécurité, contrairement à une hélice. Le bruit engendré par notre moteur est aussi beaucoup plus raisonnable que celui fait par un moteur d'aéromodélisme, par exemple, ce qui permet de bien expliquer les phénomènes lors des démonstrations.

En conclusion, nous avons choisi ce moteur, car c'est celui qui répondait le mieux aux besoins du client. Le fait qu'il soit sécuritaire, très facile d'accès, économique dans la plupart des cas et que ses performances ressemblent beaucoup à ceux des autres types de moteurs nous ont fait choisir le souffleur à tapis.

4.1.2 Les redresseurs

Nous avons choisi, pour notre soufflerie, d'opter pour un grillage fait de moustiquaire pour redresser notre flux d'air. Tous les dessins de détails et les dessins d'assemblages se retrouvent à l'Annexe C tandis que la gamme de fabrication est à l'Annexe I. La principale raison expliquant ce choix est que deux professeurs de l'École Polytechnique de Montréal, soit Huu Duc Vo et Bruno Detuncq nous avaient suggéré cette méthode.

4.1.2.1 *Huu-Duc-Vo*

Même s'il n'est pas un spécialiste des souffleries, M. Vo nous a donné de bons conseils pour construire notre soufflerie puisqu'il en a déjà fait lors de projets antérieurs. Il pensait qu'une moustiquaire était la solution la plus simple plutôt qu'un filtre à alvéole, mais il nous a référé à Bruno Detuncq, son collègue, qu'il considérait plus compétent que lui concernant les souffleries.

4.1.2.2 *Bruno Detuncq*

M. Detuncq est un spécialiste des écoulements d'air et donc, une bonne source concernant la génération de flux d'air. Il avait également approuvé notre idée de prendre un souffleur à tapis pour générer le flux d'air, une idée qu'il trouvait très adéquate pour le prix d'un tel produit. Concernant les redresseurs, il a confirmé que la moustiquaire était la meilleure solution à bas prix et il nous a conseillé de mettre trois ou quatre moustiquaires en série.

Nous avons choisi de prendre un cadre en bois, encore une fois pour des raisons économiques et de disponibilité du matériel. Comme notre cadre ne supporte aucune contrainte, car c'est la structure qui prend toute la charge, nous n'avons pas besoin d'un bois très résistant. Nous avons rencontré Denis Julien, professeur du cours de résistance des matériaux à l'École Polytechnique de Montréal, pour savoir si la pression interne allait générer des contraintes axiales dans notre cadre. Il nous a dit que non puisque nous ne développons pas une vitesse assez élevée.

Pendant les tests, nous avons décidé de changer le concept pour pouvoir changer entre un, deux ou trois étages de moustiquaires. En effet, nous avons vu expérimentalement que nous perdions à peu près 2 m/s à chaque étage rajouté. Cette amélioration nous permet d'être plus versatile dans l'utilisation de notre soufflerie. Nous avons donc cinq cadres, trois équipés d'une moustiquaire et deux vides. Nous pouvons facilement interchanger des cadres pleins avec ceux vides et voir la différence de vitesse.

4.1.3 La tuyère

La tuyère a été un composant difficile à réaliser et elle a été construite en partenariat avec l'équipe de structure. Comme notre sortie d'air à une forme presque ovale et que la zone utilisable a une zone carré, il nous fallait une tuyère capable de prendre cette forme. Nous avons choisi l'aluminium, car c'est un métal ductile qui est facilement pliable et qu'en forçant quelque peu, il est possible d'y donner une forme moins commune. Les dessins de détails et d'assemblages de la tuyère se retrouvent dans l'Annexe C. La tôle d'aluminium achetée coûtait un peu moins de 50\$, ce qui est raisonnable, mais, à cause de la forme spéciale de notre tuyère (voir dessin à l'Annexe C), il a été difficile de lui donner la forme désirée.

Les vis étaient la solution la plus simple pour lier les différentes parties de la tuyère entre elles. Pour ce qui est de la rattacher à notre moteur, nous ne faisons que l'insérer autour du souffleur de tapis puisque celui-ci sera peut-être loué ou fourni par l'école et par conséquent, nous ne pouvons rien attacher à ce dernier.

4.2 CONSEQUENCES DES CHOIX

4.2.1 Le moteur

Avec le moteur que nous avons choisi, nous allons avoir un poids assez élevé contrairement aux autres types de système de génération d'air. Tous les modèles que nous avons choisis ont un poids d'environ 15 kg.

La sortie de chaque souffleur à tapis étant ovale, il implique que notre tuyère devra avoir une forme particulière et que sa construction sera plus difficile.

4.2.2 Les redresseurs

En étant interchangeable, le transport des redresseurs sera un peu plus compliqué. En effet, il faudra transporter cinq cadres au lieu d'une seule partie, il y a plus de risque de perte ou de possibilités d'endommager les redresseurs.

Cette idée étant arrivée tard dans notre projet, nous avons dû adapter la soufflerie dans la dernière semaine pour que cela fonctionne. Ceci a donc causé quelques troubles à l'équipe qui s'occupait de la structure.

4.2.3 La tuyère

Comme elle est faite en aluminium, beaucoup d'arêtes vives ont dû être cassées, car il aurait été dangereux de laisser ça ainsi et la sécurité est un de nos besoins primaires. De plus, l'aluminium est plus difficile à se procurer que du bois. Il faut contacter plusieurs fournisseurs pour avoir le meilleur prix et le transport de la tôle d'aluminium lors de l'achat est assez fastidieux.

La forme particulière de notre tuyère, qui converge dans un sens et diverge dans l'autre, la rend assez compliquée à fabriquer, ce qui nous a empêchés de la construire à l'école. Pour cette raison, nous avons dû trouver un atelier mieux équipé, soit l'atelier des sociétés techniques de la Polytechnique situé près du Pont Victoria.

Chapitre 5

RÉALISATION DU SYSTÈME DE MESURE ET DES COMPOSANTS

Pour permettre certains calculs théoriques de portance, il est important de connaître les variables de l'environnement dans lequel le profil évolue. En effet, la vitesse de celui-ci dans le milieu (où du milieu par rapport à celui-ci) ainsi que la densité de l'air sont deux données critiques aux calculs de portance théorique (sans prise de mesure directe). C'est pourquoi la prise de mesure de la pression et la température (qui donne la densité) de l'air ainsi que sa vitesse était très pertinente. De plus, il fallait un moyen d'interpréter les données et de les centralisées.

5.1 CENTRALISATION, INTEGRATION ET INTERPRETATION

La centralisation des données permet de faciliter la lecture de celles-ci, l'utilisation de la soufflerie et donne un aspect complet et professionnel à la soufflerie. La solution qui a été mise de l'avant est l'utilisation d'un microcontrôleur programmable qui s'occupe de la réception des données provenant des différents senseurs, du calcul de celles-ci et finalement de l'affichage.

5.1.1 Microcontrôleur

La solution retenue a été l'utilisation d'un microcontrôleur de type *Arduino Uno R3* (voir fiche H.1 de l'Annexe H). Le langage de programmation est simple et répandu (C++) et une panoplie de senseurs est disponible, en plus des bibliothèques de fonctions s'y rattachant.

Le processeur intégré de ce microcontrôleur permet de recevoir les données provenant des différents senseurs, mais aussi d'effectuer des calculs permettant d'obtenir par exemple la vitesse de l'air à partir d'une période de rotation d'une hélice.

5.1.2 Affichage et interaction

Pour permettre l'affichage des données et l'interaction des étudiants avec la soufflerie, nous avons programmé un affichage à cristaux liquide *LCD* avec un interpréteur et microcontrôleur intégré (voir fiche H.2 de l'Annexe H). Ce dernier inclut des touches de sélection et communique avec le microcontrôleur principal par protocole numérique (I²C). Ceci permet de réduire la complexité du code de programmation ainsi que l'assemblage électrique. Des bibliothèques permettant le contrôle sont disponibles sur le site du fabricant et nécessaire dans l'assemblage de la soufflerie (voir fiche H.2 de l'Annexe H et gamme d'assemblage).

Les touches permettent l'affichage d'une donnée à la fois sur l'écran. L'écran présente donc la donnée sélectionnée, la valeur actuelle et l'unité de la donnée.

5.2 PRISE DE MESURES ET DONNEES

La prise de mesures se fait par des senseurs préfabriqués et achetés ainsi qu'un senseur construit à partir de pièces facilement accessibles. La prise de mesure est séparée en trois : la pression, la température et la vitesse de l'air.

5.2.1 Pression

La mesure de pression se fait à partir d'un capteur de pression préconstruit (demande un assemblage simple). Ce dernier communique avec le microcontrôleur principal de manière numérique (par le protocole I²C). Des bibliothèques permettant le contrôle sont disponibles sur le site du fabricant et nécessaire dans l'assemblage de la soufflerie (voir fiche H.3 de l'Annexe H et gamme d'assemblage).

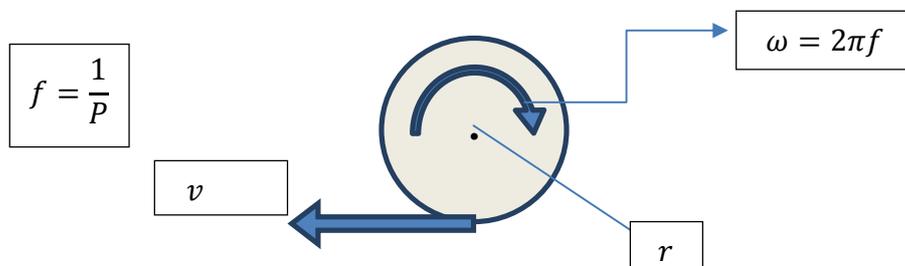
5.2.2 Température

La mesure de température se fait à partir du capteur de pression qui possède aussi un capteur de température intégré (voir fiche H.3 de l'Annexe H).

5.2.3 Anémomètre

L'anémomètre permet de calculer la vitesse de l'air à partir de la rotation d'une petite hélice. L'assemblage se fait à partir d'une hélice de ventilateur d'ordinateur, de son axe de rotation, d'aimants inclus avec l'hélice et d'un transistor à effet Hall acheté (voir fiche H.4 de l'Annexe H). Les aimants, fixés à l'intérieur de l'hélice, induisent un champ magnétique variable qui agit sur le transistor et fait varier la broche de sortie entre 5 et 0 volts de manière périodique. Il est donc possible de calculer le temps entre chaque variation et ainsi de déduire la période de rotation de l'hélice. Cette dernière donne donc la fréquence de rotation. À partir de la fréquence, il est possible de calculer la vitesse angulaire et ainsi la vitesse tangentielle, qui donne la vitesse du vent. La figure 5.1 ci-dessous représente une démonstration de l'anémomètre.

Figure 5.1 – Démonstration anémomètre



Où r est le rayon (en m), f la fréquence (en Hz), P la période déduite à partir du transistor (en secondes), ω la vitesse angulaire (en rad/s) et v la vitesse tangentielle (en m/s).

Ainsi, on en déduit $v(P)$ qui est la vitesse tangentielle exprimée en fonction de la période :

$$v(P) = \frac{2\pi r}{P}$$

C'est de cette manière que le microcontrôleur calcule la vitesse du vent.

5.3 PROGRAMMATION

La programmation du microcontrôleur se fait selon les normes du fabricant du senseur et celui les calculs présentés précédemment. Le langage utilisé est le C++ adapté aux bibliothèques et à l'utilisation du *Arduino Uno R3*, tel que présenté sur le site du fabricant (voir fiches correspondantes pour les contrôleurs et les senseurs). Voir la fiche H.5 de l'Annexe H pour la présentation du code.

Chapitre 6

FABRICATION ET ESSAIS

Une fois la conception des différents sous-ensembles qui composent la soufflerie terminée, la fabrication de ses ensembles peut être commencée. La performance théorique et l'utilité de ces sous-ensembles dépendent maintenant de leur méthode de fabrication et de l'interfaçage avec les autres sous-systèmes.

6.1 SOUS-ENSEMBLE ARTISANAL REALISE & SYSTEME DE MESURE

6.1.1 Redresseurs

L'ensemble des redresseurs est composé de cinq cadres indépendants afin de permettre un ajustement variable dans la laminarité de l'air. Les cadres sont composés de deux tiges horizontales de 12,811 po (30 cm + 1 po) et de deux tiges verticales de 30 cm qui sont coupés à l'aide d'une scie à ruban. Les tiges sont jointes aux deux autres tiges à l'aide de trois agrafes à bois. Par la suite, une moustiquaire d'aluminium est agrafée sur le contour de trois des cinq cadres. Un revêtement de ruban collant est appliqué sur le contour des cadres afin de réduire le risque d'inconfort causé par les moustiquaires coupées.

6.1.2 Tuyère

La tuyère du moteur est composée de quatre feuilles d'aluminium qui ont été tracées à l'aide d'un marqueur dans une plus grande feuille. Les quatre parties ont d'abord été séparées grossièrement à l'aide d'une tranche puis découpées avec plus de précision avec la scie à ruban. Les arrêtes de chaque feuille ont été limées puis poncées afin de réduire le risque de blessure causée par les côtés tranchants. Ensuite, les feuilles ont été courbées à plusieurs reprises afin d'épouser la courbe voulue. Finalement, des lanières d'aluminium ont été découpées sur les côtés et trouées afin de pouvoir relier les quatre feuilles à l'aide de boulons.

6.1.3 Support du moteur

Suite à la construction de la tuyère, la hauteur voulue du moteur a été calculée afin d'être parfaitement positionnée avec le centre de celle-ci. La hauteur a été reportée sur une caisse à lait et elle a été ensuite découpée à l'aide d'une scie pour obtenir un support de la hauteur voulu. Les arrêtes coupées ont ensuite été poncé afin d'obtenir plus de confort lors de la manipulation du support.

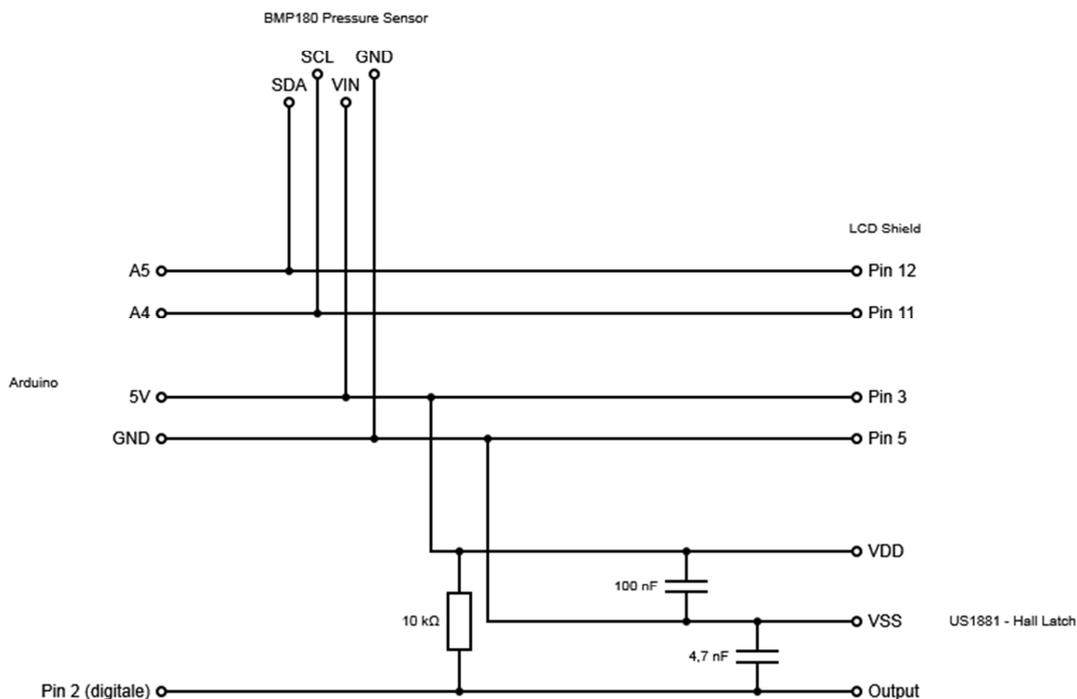
6.1.4 Système de mesure

Tout d'abord, il faut assembler les composantes qui ne sont pas préassemblées, soit l'écran LCD et le senseur BMP180 (voir fiche 5.1.2 et 5.2.1 pour le lien vers les tutoriels d'assemblage).

6.1.4.1 Assemblage du circuit électrique

Il faut assembler le circuit électrique tel que présenté à la fiche H.6 de l'Annexe H. La figure 6.1 ci-dessous représente le schéma de la fiche 6.

Figure 6.1 – Schéma de la fiche 6



Pour assembler ce circuit, il est plus facile d'utiliser une plaque de prototypage pour y fixer les différentes composantes qui ne sont pas dans la veine d'essai, soit la résistance, l'écran LCD, l'Arduino et les condensateurs. Ensuite, on relie simplement les fils des senseurs externes (anémomètre et senseur de pression) à la plaque de prototypage.

6.1.4.2 Assemblage de l'anémomètre

Pour assembler l'anémomètre, on commence par retirer l'hélice du ventilateur à ordinateur (n'importe quel ventilateur d'ordinateur, mais de petite taille, soit en dessus de 10 cm). Pour retirer l'hélice, il faut :

1. Retirer le collant à l'arrière

2. Retirer l'anneau d'arrêt
3. Retirer l'hélice de l'axe

Ensuite, il faut retirer le circuit imprimé du boîtier de l'hélice. Pour ce faire, il faut casser le boîtier. La meilleure façon serait de couper les branches du boîtier pour n'en retirer que le centre. Vous devriez vous retrouver avec cela :

Figure 6.2 – Retrait du circuit imprimé du boîtier de l'hélice



Puis, il faut retirer l'anneau magnétique qui se trouve au centre de l'hélice et la couper en petits bouts aimantés. Ensuite, il faut coller deux bouts de chaque côté, tout en s'assurant qu'ils sont de pôles opposés (ils ne s'emboîtent pas ensemble lorsque rapprochés). La figure 6.3 ci-dessous représente le retrait de l'anneau magnétique.

Figure 6.3 – Retrait de l'anneau magnétique



Sur la plaquette de l'axe, il faut coller le transistor à effet Hall de manière à ce qu'il fasse face aux aimants lors de la rotation. La figure 6.4 ci-dessous représente le résultat de ce collage.

Figure 6.4 – Collage du transistor à effet Hall



Il faut par la suite connecter les trois branches du transistor à des fils, tout en s'assurant qu'ils sont isolés l'un de l'autre.

Une fois toutes ces étapes terminées, réassembler le tout en insérant l'hélice dans l'axe, puis en réinstallant l'anneau d'arrêt. La figure 6.5 ci-dessous représente l'assemblage final de l'anémomètre auquel vous devrez arriver.

Figure 6.5 – Assemblage final de l'anémomètre



6.1.4.3 Installation du programme dans l'Arduino

Tout d'abord, il faut préalablement avoir téléchargé le compilateur *Arduino IDE* sur le site du fabricant ainsi que les bibliothèques des pièces achetées (tel qu'indiqué sur les fiches). Ensuite, voici les étapes à suivre :

1. Connectez l'Arduino à l'ordinateur à l'aide du câble USB fourni.

2. Ensuite, ouvrez le compilateur, allez dans Outils/Port série et sélectionnez le seul port présent.
3. Entrez dans l'invite de commande les lignes de code présentées à la fiche 6.
4. Faites ensuite Fichier/Téléverser. L'Arduino est maintenant programmé.

6.2 INTERFAÇAGE AVEC LES AUTRES SOUS-SYSTEMES

6.2.1 Redresseurs et veine d'essai

L'interfaçage entre les redresseurs et la veine d'essai a été inspiré par le système de rainures proposé par l'équipe de structure. Ainsi, le cadre supportant les moustiquaires a été mesuré afin d'être insérable à l'intérieur de fentes se situant dans la partie supérieure et inférieure de la veine d'essai. Cela permet de ne pas obstruer la circulation de l'air proche des parois de la veine et d'obtenir une surface visible de moustiquaires de 30 x 30 cm.

6.2.2 Moteur et la veine d'essai

L'interfaçage du moteur et de la veine d'essai a été possible grâce à deux sous-systèmes : le support du moteur et la tuyère.

Premièrement, il était important pour l'équipe et la compagnie de positionner la sortie d'air du moteur à la mi-hauteur de la veine d'essai. Ainsi, le support ne sert à rien d'autre que surélevé le moteur pour assurer une meilleure répartition de l'air dans la veine et de faciliter la construction d'une tuyère.

Deuxièmement, il a fallu ajuster la sortie de l'air du moteur aux dimensions de la veine d'essai. Les dimensions de la tuyère ont été choisies seulement afin de relier ces deux dimensions et d'éviter des fuites d'air entre la sortie du moteur et la veine d'essai. La tuyère a pu être construite de façon symétrique grâce au support du moteur qui le positionne au centre de la zone utilisable.

6.2.3 Système de mesure et veine d'essai

Pour permettre au système de mesure de récolter les données, une poche doit être fraisée dans la veine d'essai, en dessous du profil portant. Cela permet au capteur de pression et température ainsi qu'à l'anémomètre de prendre des mesures à la position du profil d'aile. Le trou doit être de 4 cm de long de la soufflerie par 2 cm de large. Il est situé au centre de la veine d'essai. Le trou permet de faire dépasser une partie de l'anémomètre pour qu'elle tourne grâce au vent. De plus, il permet de faire passer les fils du capteur de pression et température pour l'installer à proximité.

6.3 ESSAIS

6.3.1 Moteur

Les essais du moteur ont été faits dans le corridor menant au local de cours. Les mesures ont été prises par Florentin Anne et notées par Pascale Berthiaume après avoir simplement mis le moteur en marche à la puissance maximale. La vitesse maximale à la sortie du moteur a été de 27 m/s. La vitesse à 30 cm de distance dans le vide a été mesurée à 21,5 m/s.

6.3.2 Redresseurs

Les essais sur les redresseurs ont été faits dans le corridor menant au local de cours. Les mesures ont été prises par Anthony Salconi et notées par Florentin Anne après avoir mis le moteur en marche à la puissance maximale et avoir positionnés les redresseurs à la sortie d'air du moteur. Nous avons pu remarquer une relation linéaire entre le nombre de redresseurs et la vitesse du flux d'air ce qui nous a éclairé sur le nombre optimal de redresseur à mettre pour obtenir un redressement adéquat et une vitesse raisonnable. Nous avons finalement choisi de mettre un système à nombre de redresseurs variable dans notre soufflerie. Cette relation linéaire est compilée dans le tableau 6.1 ci-dessous.

Tableau 6.1 – Vitesse du flux d'air en fonction du nombre de redresseurs

| Nombre de redresseurs | Vitesse du flux d'air (m/s) |
|-----------------------|-----------------------------|
| 0 | 20 |
| 1 | 18 |
| 2 | 16 |
| 3 | 14 |
| 4 | 12 |

6.4 SENSIBILITE DU SYSTEME DE MESURE REALISE

Le senseur de pression et de température est très précis, avec une incertitude sur la pression de $\pm 0,06$ hPa et sur la température de $\pm 0,5$ °C. L'incertitude de l'anémomètre, par contre, dépend de plusieurs facteurs ainsi que de la qualité de la fabrication et de la calibration. Il est utilisé à titre indicatif et ne constitue pas un appareil de mesure précis. De plus, son intervalle de mesure dépend de la grosseur de l'hélice.

Chapitre 7

TABLEAU SYNTHÈSE DES PIÈCES ET DU PRODUIT

7.1 TABLEAU SYNTHÈSE

Tableau 7.1 – Tableau synthèse

| # | Nom de la pièce | Coûts-matière | Poids | Dimensions | Justifications |
|---|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Moteur : Kleen-Jet Blower Figure 7.1 – Notre moteur  | Le moteur nous a été prêté par l'école secondaire Polyvalente Deux-Montagnes de la Commission scolaire de la Seigneurie-des-Milles-Îles. | 16 kg | Hauteur : 17po longueur : 18po largeur : 17.7po | Ce genre de moteur est disponible dans toutes les écoles et répond à nos attentes. Voici les spécifications qui ont capté notre attention. Flux d'air : 2500 CFM Fan : 10 3/4" type sirocco Vitesse : 3/4 HP avec 3 vitesses |
| 2 | 4 Redresseurs Figure 7.2 – Nos redresseurs  | Moustiquaires : rouleaux 84 po x 36 po à 18,99\$ 24 morceaux de bois: 18.88\$ | 100 g/ch | Cadre de chaque redresseur : 32cmx32cmx1cm | Selon les experts consultés durant cette étude de cas, une moustiquaire est le redresseur le plus adéquat pour notre soufflerie afin d'avoir un flux d'air laminaire. |
| 3 | Tuyère Figure 7.3 – La tuyère  | Tôle d'aluminium : 50 | 2kg | Longueur : 12 po Hauteur : 4.25po/30cm Largeur : 17.7po/30cm | La tuyère épouse la forme de la sortie du moteur et nous avons choisi l'aluminium pour remplacer le bois dans notre croquis initial et cela afin de minimiser le poids de notre produit final. |
| 4 | Système Arduino | | | | Pour distinguer notre soufflerie de celle des autres compagnies, nous avons choisi d'intégrer un |

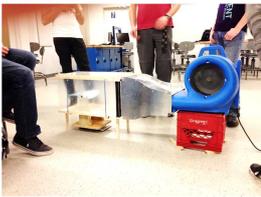
| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Figure 7.4 – Notre système Arduino</p>  | <p>circuit imprimé sur lequel se trouve un microcontrôleur qui est programmé par notre collègue et qui va afficher la vitesse du flux d'air à l'intérieur de la zone utilisable à l'aide de capteurs de pression.</p> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

7.2 ÉCHÉANCIER RÉVISÉ

Notre échéancier révisé se trouve à l'Annexe D.

7.3 FACTURE

Tableau 7.2 – Facture

| Produit | Fournisseur | Prix |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------|
| Moteur : Kleen-Jet Blower | L'école secondaire Polyvalente Deux-Montagnes | Aucun, il nous a été prêté. |
| Moustiquaires : rouleaux 84 po x 36 po | Réno-Dépôt | \$10.69 |
| 24 morceaux de bois | Réno-Dépôt | \$8.40 |
| Système arduino | ABRA Electronics inc. | \$98.99 |
| Tôle d'aluminium | Métaux Russel inc. | \$25.00 |
| Le produit final : Figure 7.5 – La soufflerie finale  | | \$143.08 |
| | | Taxes : \$21.46 |
| | | Total : \$164.54 |

Pour ce qui est de la tuyère, les frais seront partagés avec l'équipe qui se charge de la construction de la structure ce qui porte les coûts de cette partie à 25\$.

Chapitre 8

TESTS, ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Après avoir déterminé tous les aspects de notre soufflerie, dont les détails se trouvent dans les chapitres 1 à 7 du présent rapport, elle a finalement été construite. Ensuite, le 8 avril 2014, nous avons procédé à des tests de performances sur le prototype final de notre soufflerie. Dans le présent chapitre, qui est un ajout au rapport initial déposé le 8 avril 2014, on retrouve le tableau des performances de chaque compagnie, les calculs d'écart entre nos valeurs ainsi qu'une interprétation de ces résultats.

8.1 PROTOCOLE DE MESURE

La prise de mesure a permis de comparer les valeurs calculées (théoriques) avec des données réelles. Malheureusement, lors de la présentation, l'anémomètre développé par notre équipe et intégré à la soufflerie n'était pas suffisamment bien calibré. Pour cette raison, nous avons jugé que les mesures qui auraient été prises avec cet anémomètre ne permettaient pas de comparer adéquatement les valeurs réelles et calculées.

Nous avons donc utilisé un anémomètre commercial pour mesurer la vitesse de l'air directement devant le profil d'aile. Ainsi, nous mesurons d'abord la portance pour être certain que la prise de mesure avec l'anémomètre n'affecte pas le profil portant (dû aux turbulences créées par l'anémomètre). Puis, nous mesurons la vitesse d'écoulement directement devant le profil d'aile sans bloquer l'air.

Il est à noter que la pression interne lors des essais était d'environ 99,4 kPa (petite variation, donc valeur approximative) et la température était d'environ 22°C (valeur approximative due à la variation). Ces valeurs ont été mesurées à l'aide de senseurs intégrés à la même interface qui nous permettait de connecter un anémomètre pour un affichage numérique. Toutefois, les senseurs n'étant pas de fabrication artisanale, leur précision n'était pas en jeu.

8.2 ÉCART ENTRE LA VALEUR CALCULÉE ET LA VALEUR OBTENUE

Durant la conception de la soufflerie, nous avons calculé de façon théorique une vitesse du flux d'air à la sortie de la tuyère. De même, les autres départements ont eux aussi établi ce à quoi devrait correspondre la portance générée ainsi que le centre de masse selon les trois axes conventionnels. Ainsi, nous savions à quoi nous attendre et nous devons vérifier si les valeurs que nous avons calculées étaient justes ou non. Le tableau 8.1 ci-dessous compile toutes les mesures prises durant le test de notre soufflerie le 8 avril 2014, mais aussi des deux autres souffleries.

Tableau 8.1 – Mesures prises le 8 avril 2014 lors des tests effectués sur la soufflerie

| | | | Portance (g) | Vitesse (m/s) | Portance (g) | Vitesse (m/s) | Bruit (dB) | Poids (kg) | Centre de masse | | |
|-------------------|--------------------------|----------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|---------------|---------------|-----------------|--------------|---------------|
| | | | | | | | | | Xmoy (mm) | Ymoy (mm) | Zmoy (mm) |
| Équipe 1, 6, 9 | 1 ^{er} essai | Mesurée | 90 | 11 | 53 | 8,6 | 70 | | 920 | 191 | Pas mesuré |
| | | Calculée | 110 | 10,8 | 35 | 8 | | | 823,1 | 169,2 | 192,6 |
| | 2 ^e essai | Mesurée | 120 | 10,2 | 90 | 8,6 | | | | | |
| | | Calculée | 170 | 10,8 | 80 | 8 | | | | | |
| Équipe 2, 4, 7 | 1 ^{er} essai | Mesurée | 780 | 10 | 360 | 5,9 | | 10,8 | | | |
| | | Calculée | 1300 | 10 | 416 | 5,5 | | 11,4 | | | |
| | 2 ^e essai | Mesurée | | | | | | | | | |
| | | Calculée | | | | | | | | | |
| Équipe 3, 5, 8 | 1 ^{er} essai | Mesurée | 790 | 20,5 | | 15 | 83 | 18,2 | 615,16 | 106,67 | 169,03 |
| | | Calculée | 1050 | 20,5 | 1025 | 15 | | 18 | | | |
| | 2 ^e essai | Mesurée | 694 | 20,5 | 583 | 15 | | | | | |
| | | Calculée | 750 | 20,5 | 650 | 15 | | | | | |

La vitesse théorique à la sortie de la tuyère à la vitesse maximale est de 14 m/s. Théoriquement, la vitesse au bord d'attaque de l'aile devrait aussi être de 14 m/s. Nous la noterons donc $v_{1tmax} = 10,8 \text{ m/s}$.

La vitesse réelle devant le bord de l'aile est, quant à elle, de 11 m/s. Nous la noterons $v_{1rmax} = 11 \text{ m/s}$.

Pour calculer l'erreur, nous utilisons l'équation:

$$\Delta v_1 = \frac{v_{2tmax} - v_{2rmax}}{v_{2tmax}} \quad (8.1)$$

$$\Delta v = 1,8 \%$$

De la même manière, nous pouvons trouver l'autre écart entre la vitesse théorique pour la vitesse minimale et la vitesse réelle. Le tableau 8.1 ci-dessous compile ces valeurs et montre leur pourcentage d'écart.

Tableau 8.2 – Vitesses d'écoulement théoriques et réelles ainsi que l'écart

| | v_t | v_r | Δv |
|------------------|-------|-------|------------|
| | m/s | m/s | % |
| Vitesse maximale | 10,8 | 11 | 1,8 |
| Vitesse minimale | 8 | 8,6 | 7,5 |

8.3 INTERPRÉTATION DES ÉCARTS

8.3.1 Interprétation des écarts

Comme il est possible de constater, les écarts entre les valeurs théoriques et expérimentales de la vitesse maximale et minimale du flux d'air de notre moteur électrique sont des écarts positifs. Donc, les valeurs expérimentales dépassent nos attentes théoriques et cela peut être expliqué par une surestimation du calcul des pertes dans le moteur. Les pertes principales considérées sont les pertes de charge, et comme il a été expliqué au chapitre 3 du présent rapport, la relation utilisée pour calculer ces pertes est la suivante :

$$\Delta P = 12 \cdot \rho \cdot v^2 \cdot (1 - (A1/A2))^2 \cdot \sin \alpha$$

Lors des calculs théoriques, nous avons utilisé les dimensions théoriques pour faire les calculs, mais il est probable que lors de la construction les dimensions soient légèrement différentes. Par exemple, si on prend l'angle alpha, la valeur théorique est 5,5 degrés alors que la valeur réelle était inférieure, ce qui diminue les pertes d'un certain pourcentage ce qui peut influencer positivement la vitesse à la sortie. Cette augmentation de vitesse explique pourquoi les valeurs réelles de la vitesse sont supérieures aux valeurs attendues théoriquement. De plus, il est possible de remarquer que les écarts ne dépassent pas les 10%, ce qui est excellent compte tenu des circonstances.

8.3.2 Intégration avec les autres départements

8.3.2.1 Aspects positifs

- Au sein de la compagnie il y a vingt personnes, donc vingt façons différentes de voir les choses. Cela nous a permis d'apprendre et d'enrichir nos connaissances en discutant avec nos coéquipiers;
- Le travail en compagnie nous a aidé à acquérir des connaissances organisationnelles exceptionnelles et nous a appris comment gérer des situations de conflits;

- Nous avons pu profiter des forces et des idées diversifiées et ingénieuses de toutes les équipes, ce qui a rendu notre soufflerie unique en son genre;
- L'implication de tous les membres de l'équipe d'une façon efficace nous a motivé à nous surpasser et la compétition entre toutes les compagnies nous a poussé à déployer des efforts exceptionnels.

8.3.2.2 *Éléments à améliorer*

- Un contact de compagnie a été commencé, mais il est incomplet. Donc, nous n'avons pas eu de normes de travail ni de répartition de rôles, ce qui a créé une désorganisation tout au long du projet;
- Les objectifs n'ont pas été précisés clairement, seulement implicitement;
- Chaque équipe doit faire un plan de travail et garder le contact avec les autres équipes de la compagnie afin d'avancer à la même cadence;
- Des échéanciers hebdomadaires représentent la clé de l'avancement du projet au sein de la compagnie, nous aurions dû adopter cette initiative;
- Aucune équipe ne doit discréditer les efforts des autres équipes, il faut savoir gérer les situations de conflits sans dévaloriser les compétences d'autrui. Il y a des conduites néfastes qui peuvent mettre fin au travail d'équipe.

8.3.2.3 *Leçons retenues*

C'est en faisant des expériences qu'on apprend et les leçons apprises pendant ce projet se traduisent par les suggestions ci-dessous :

- L'organisation est la clé de la réussite. Il faut toujours préciser un contrat de travail et faire signer tous les membres de la compagnie pour commencer sur un terrain d'entente mutuel et minimiser les pertes de temps ainsi que les conflits;
- Il est nécessaire de déléguer un porte-parole pour chaque équipe, afin que la communication se fasse d'une manière efficace et que tous les membres de la compagnie soient au courant de l'avancement du projet;
- La leçon la plus importante est d'apprendre à apprécier la diversité des idées et l'originalité de chacune, il faut encourager l'innovation et apprendre à faire des échanges constructifs qui permettront d'enrichir non seulement nos connaissances techniques, mais aussi nos habiletés personnelles. Il y a quelque chose au-delà des notes et des bonus pour ce cours, ce projet nous apprend à remplir notre fonction de futurs ingénieurs d'une manière la plus complète possible.

Pour conclure, à la suite de la prise de mesures effectuées lors des tests le mardi 8 avril 2014, nous avons pu remarquer que les valeurs calculées théoriquement sont différentes que celles pratiques. De plus, suite à la présentation des souffleries de chaque compagnie, nous avons compris qu'il était important d'apprécier la diversité. Même si elles ne sont pas toutes aussi performantes, elles ont toutes leurs avantages.

Conclusion

Pour conclure, ce rapport démontre tout le travail qui a été fait autant dans la recherche d'idées que de la construction de cette soufflerie. Tout le cheminement jusqu'à la fabrication de la soufflerie est expliqué dans ce rapport. Après chacun des chapitres, il est possible de remarquer que nous nous approchons de plus en plus de la solution finale.

Cette étude de cas est divisée en 9 chapitres soit : le sommaire des requis conceptuels et techniques, l'analyse des efforts externes et internes, la réalisation des sous-systèmes et ses composants et des systèmes de mesures et ses composants, la fabrication et les essais, les tests, analyse et interprétation des résultats, le tableau synthèse des pièces et du produit et finalement notre performance.

Pour arriver à la conception de notre soufflerie finale, il a d'abord fallu déterminer quel type de moteur il fallait utiliser ainsi que la manière dont le flux serait redressé en équipe, mais également avec notre compagnie. Le fait d'être devenue une compagnie de 21 membres rendait la tâche plus difficile.

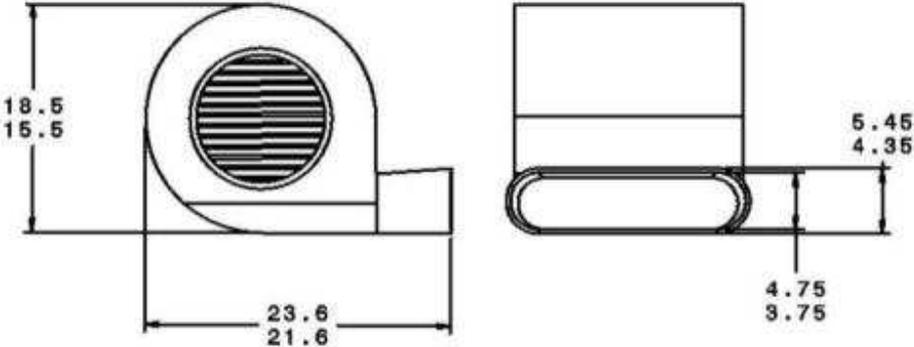
Lors de la troisième étude de cas, nous avons réalisé qu'il était important d'exprimer son désaccord lorsqu'il est question d'un travail en équipe de cette envergure et que le choix du moteur pouvait s'avérer plus difficile que ce que nous pensions.

Finalement, après plusieurs remises en questions et plusieurs discussions animées, nous avons remis un produit final avec l'approbation de toute la compagnie. Éventuellement, nous pourrions présenter notre produit final à des clients ainsi que des photos suivant le déroulement de la construction de la soufflerie.

ANNEXES

Annexe A

FICHE DU MOTEUR

| | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
|  | Description: Sécheur de tapis | |
| | 2000 à 3000 CFM | |
| | Prix: Entre 0\$ et 250\$ | |
| | Location ou achat | |
| | Vitesse à la sortie: 27 m/s | |
| | Vitesse dans la soufflerie: 11 à 18 m/s | |
| Calculs | $\text{débit} = \text{Aire de la section} * \text{vitesse}$ $\text{débit} = 0,0537 \text{ m}^2 * 27 \text{ m/s}$ $\text{débit} = 1,45 \text{ m}^3/\text{s}$ | |
| Dimensions importantes: Peuvent varier selon le modèle choisit. | Dimensions en pouces | |
|  | | |
| Avantages: | Fournisseur: | Écoles |
| <ul style="list-style-type: none"> - Plusieurs écoles secondaires ont accès gratuitement à un sécheur de tapis. - Beaucoup plus sécuritaire qu'une hélice - Moins de pertes de pression - S'adapte à notre tuyère | Location: | Lou-Tec Simplex Location Turbo |
| | Achat: | Home Depot Global industrial |

Liens importants: <http://www.globalindustrial.ca/p/janitorial-maintenance/floor-care/floor-dryers/air-foxx-3-4-hp-3-speed-floor-dryer>
<http://www.loutec.com/produit/ventilateur-de-tapis-764738482/>

Annexe B

FACTURE



**ÉCOLE
POLYTECHNIQUE
MONTRÉAL**

Génie Aérospatial
Équipe 6

Date de facturation : 2014-04-08
Membres de l'équipe : C.L.Ménard
A.Salconi
P.Berthiaume
W.Hana
P.Major
D.Leb Blanc
F.Anne

Facture soumise à : J.-P. Lemarquis
P. Rémy

Taux horaire (\$/h) :

Début de facture *****

| Semaine du | 2014-03-16 | 23/03/2014 | 30/03/2014 | 06/04/2014 | Prix |
|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------------|
| A. Salconi | 495 | 235 | 450 | 390 | \$ 1 962,50 |
| C. Leblond-Ménard | 300 | 780 | 750 | 870 | \$ 3 375,00 |
| D. Leblanc | 765 | 235 | 615 | 210 | \$ 2 281,25 |
| F. Anne | 780 | 235 | 1365 | 270 | \$ 3 312,50 |
| P. Berthiaume | 660 | 265 | 360 | 315 | \$ 2 000,00 |
| P. Major | 695 | 265 | 360 | 310 | \$ 2 037,50 |
| W. Hana | 450 | 280 | 60 | 90 | \$ 1 100,00 |
| Total | 4145 | 2295 | 3960 | 2455 | \$ 16 068,75 |

TPS 0,05% \$ 803,44

TVQ 0,09975% \$ 1 683,00

Total payable

Fin de facture *****

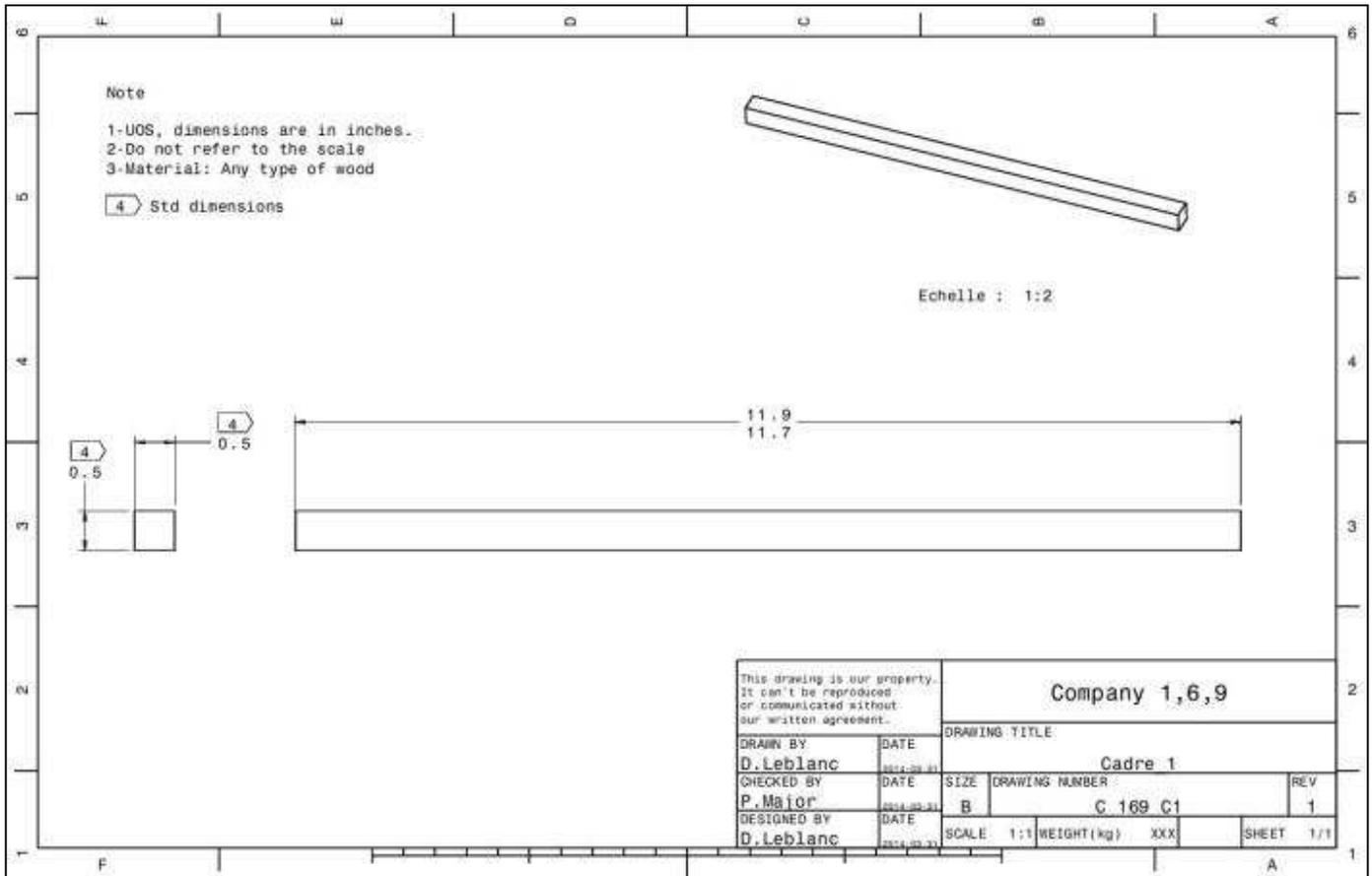
Fournisseur : _____

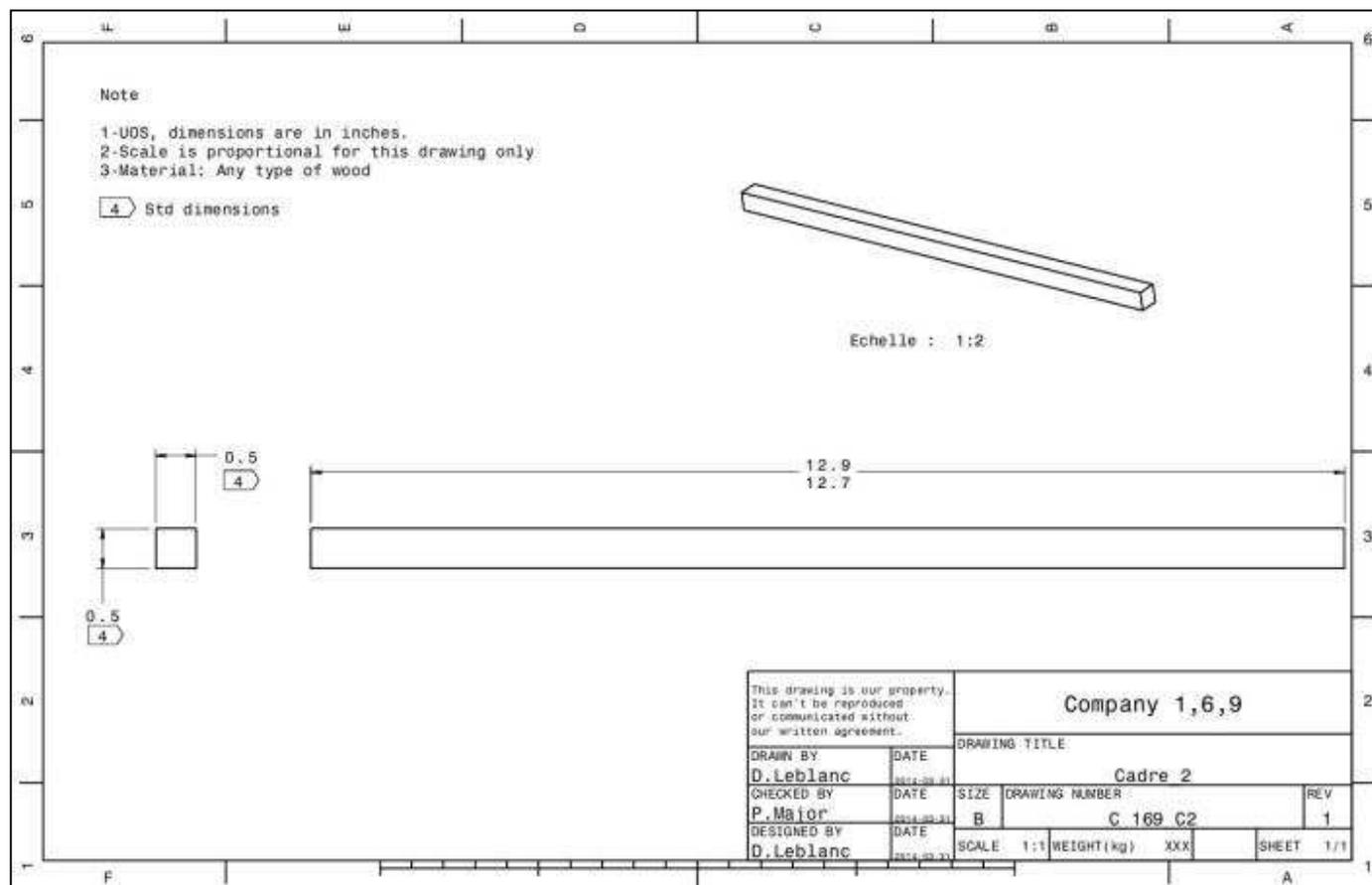
Client: _____

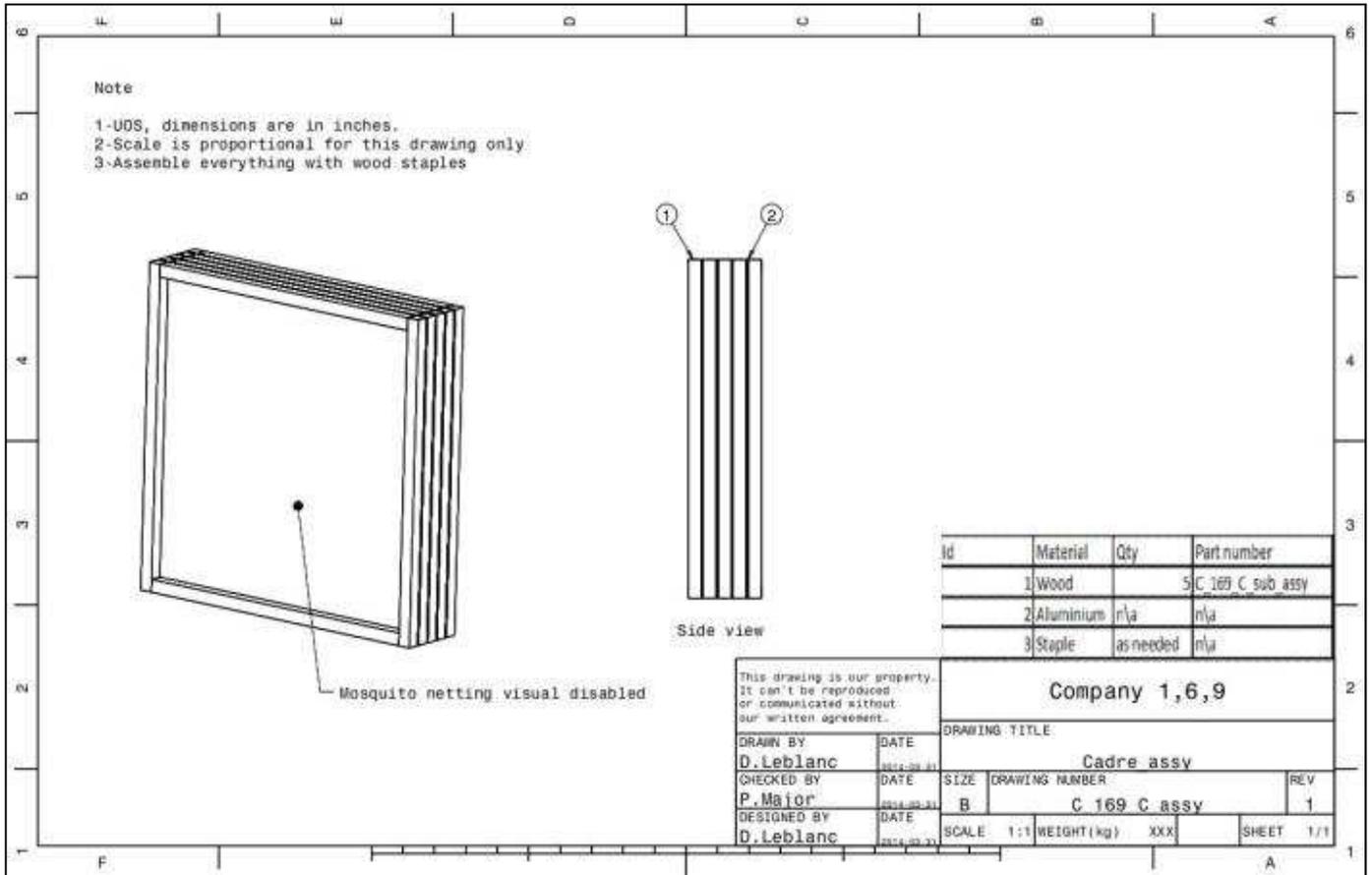
Imprimé le : 2014-04-08

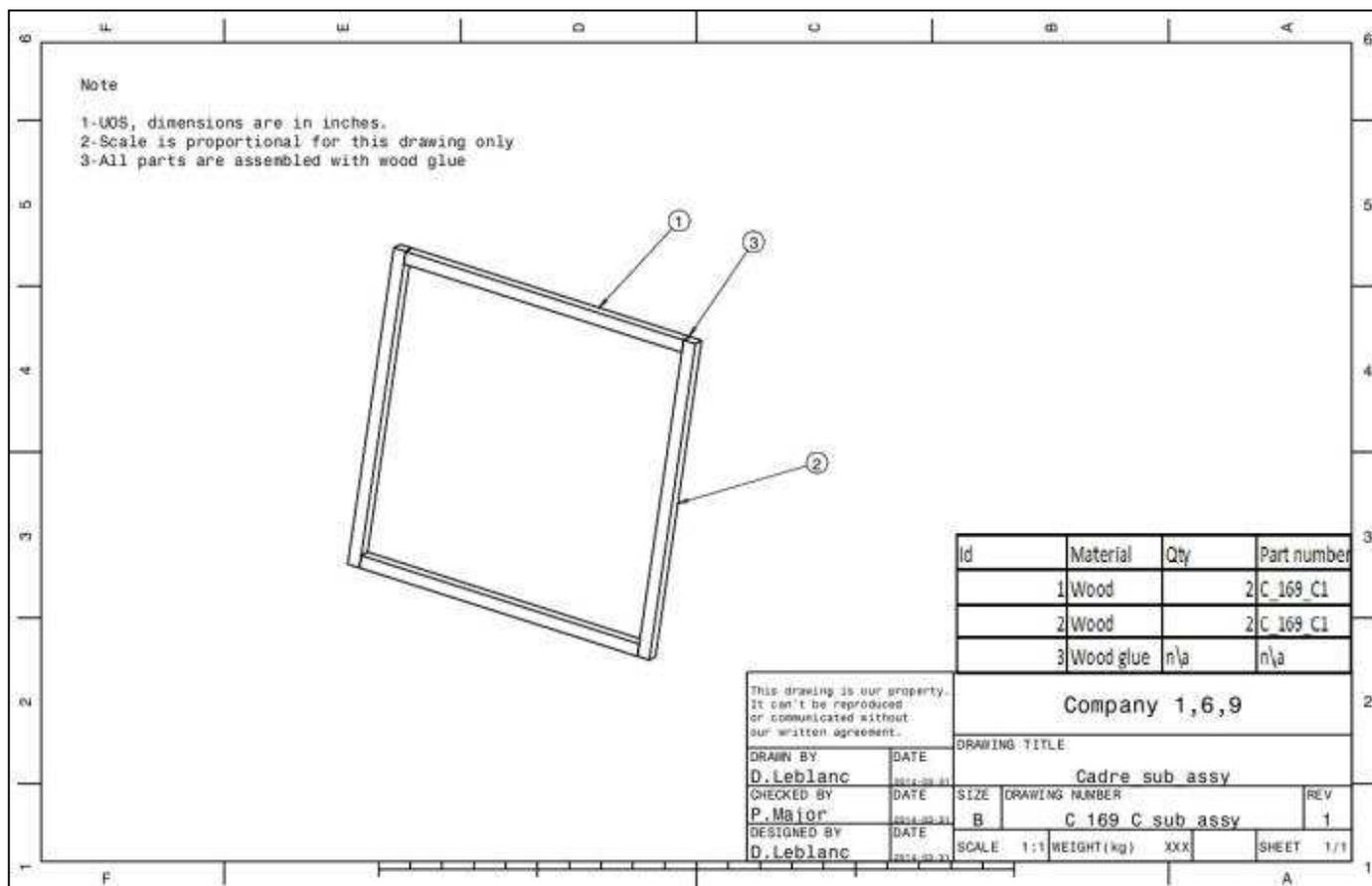
Annexe C

DESSINS DE DÉTAILS ET D'ASSEMBLAGE DES REDRESSEURS









Annexe E

L'équation de la portance⁶ est donnée par:

$$L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \cdot C_L \quad (\text{A.01})$$

En manipulant l'équation on obtient:

$$v^2 = \frac{2 \cdot L}{\rho \cdot S \cdot C_L}$$

Puisque dans cette situation la vitesse d'écoulement est forcément positive, nous trouvons que:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot L}{\rho \cdot S \cdot C_L}} \quad (3.1)$$

⁶ JOMARD, François. *Alsace BIA* (page consultée le 7 avril 2014), [en ligne], http://www.alsacebia.fr/Alsace_BIA/aerodynamique_files/ae%CC%81rodynamique%203%20-%20e%CC%81quation%20du%20vol%20de%20l'avion.pdf.

Annexe F

Dans la situation de l'écoulement d'un fluide circulant dans un tuyau dont l'aire de la coupe transversale varie, nous pouvons l'illustrer par la figure F-01:

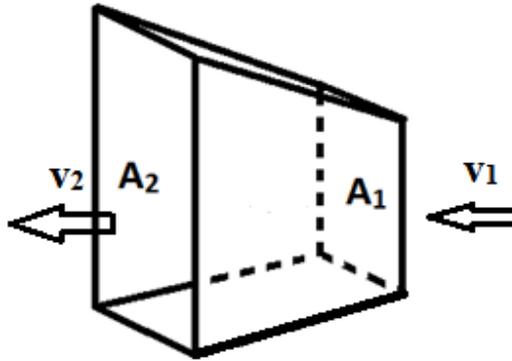


Figure F-01: Fluide circulant dans un tuyau divergent

Par la loi de la conservation de la masse, nous savons que:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (\text{A.02})$$

Nous savons aussi que:

$$\dot{m}_i = \dot{V}_i \cdot \rho \quad (\text{A.03})$$

$$\dot{V}_i = A_i \cdot v_i \quad (\text{A.04})$$

En remplaçant (A.03) et (A.04) dans (A.02), nous obtenons:

$$v_1 = \frac{A_2 \cdot v_2}{A_1} \quad (3.2)$$

Annexe G

La caisse à lait pouvant supporter 18 kg de lait, la figure G-01 montre le DCL lorsqu'elle est soulevée et en équilibre.

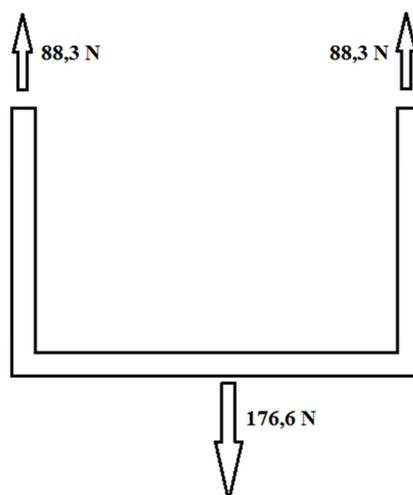


Figure G-01: DCL de la caisse à lait

La figure G-02 illustre la force en tension à laquelle peuvent résister les bords latéraux.

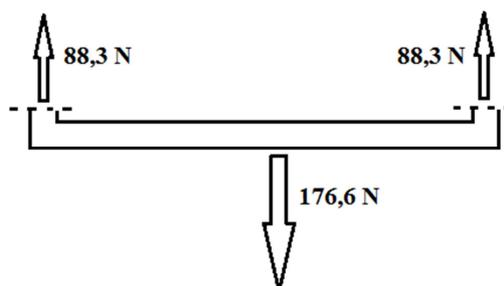


Figure G-02: Force en tension sur les bords latéraux

La figure G-03 montre les forces en cisaillement exercées sur le fond de la caisse.

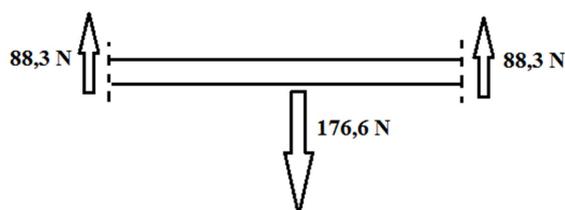


Figure G-03: Force de cisaillement sur le fond

Maintenant, lorsque le moteur est posé sur la caisse à lait renversée, voici le DCL illustré par la figure G-04.

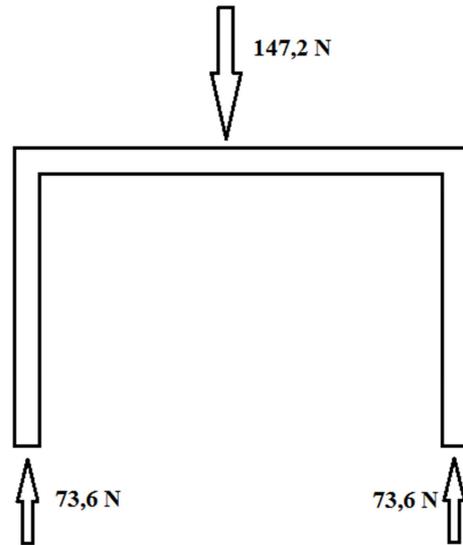


Figure G-04: DCL de la caisse à lait soutenant le moteur

Par le même processus effectué précédemment, nous pouvons voir les forces en tension et les forces en cisaillement sur la caisse à lait représentées par les figures G-05 et G-06.

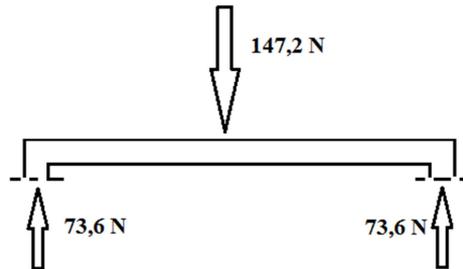


Figure G-05: Force en compression exercée par le moteur sur les bords latéraux

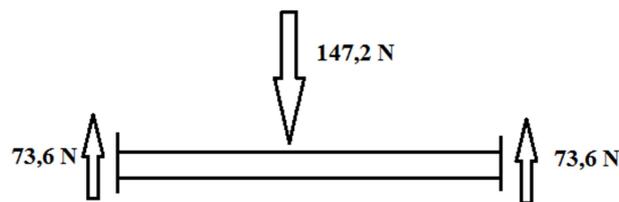


Figure G-06: Force de cisaillement exercée par le moteur sur le fond

Lorsque le moteur est en marche, une troisième force entre en compte, celle de la poussée de 48 N (à valider au chapitre 2). Puisque le moteur reste immobile, cela veut dire que l'entièreté de la force est redistribuée à la caisse à lait sous forme de friction. Une force de cisaillement est alors exercée sur les bords latéraux comme illustré par la figure G-07.

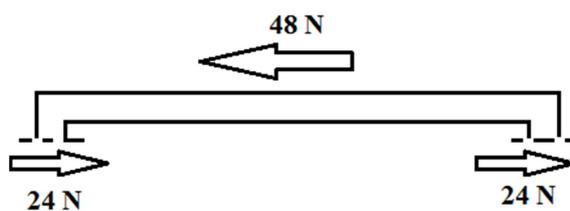


Figure G-07: Force de cisaillement exercée par le moteur sur les bords latéraux

La géométrie des bords latéraux et du fond étant similaire, nous pouvons estimer que les efforts maximaux de l'un soient les mêmes que l'autre. Le fond ne cédant pas à 88,3 N en cisaillement, les bords latéraux ne céderont pas à 24 N.

Les forces exercées par le moteur n'étant pas plus grandes que celles exercées quotidiennement lors de son utilisation normale, la caisse résistera au moteur lors de son utilisation.

Annexe H

FICHES SYSTÈME DE MESURE

FICHE H.1 – ARDUINO

| | | |
|-----|----------------|-----------------|
| H.1 | Arduino Uno R3 | Microcontrôleur |
|-----|----------------|-----------------|

| | | | |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------------------------------------------|
| Item | Arduino Uno R3 | Fabricant | Arduino |
| Fournisseur | Abra Electronics | Site web | http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoar dUno |
| Site web | https://www.abra-electronics.com/ | | |
| SKU | ARD-105 | Prix | 45.94 \$ |
| Description | Kit Arduino UNO R3 | | |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Inclus | Image: |
| <p>Arduino Uno R3 Plaque de prototypage à 400 points Fils de prototypage (140) Fil USB A à B de 6' Adaptateur AC/DC 9V prise jack</p> <p>Compilateur (gratuit) disponible sur le site du fabricant</p> |  |

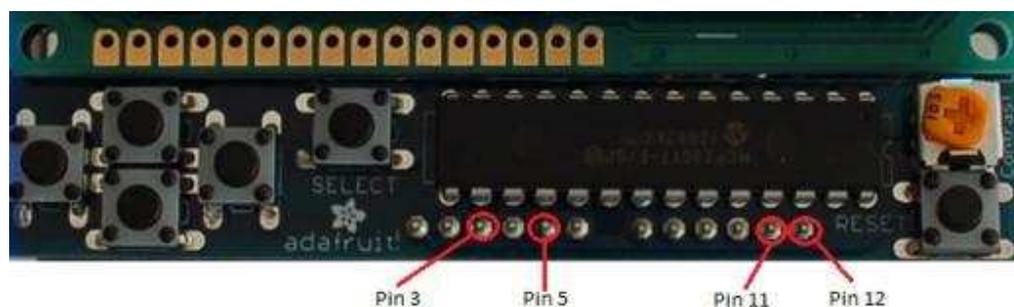
| | |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Schéma des broches utilisées |  |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|

FICHE H.2 – LCD SHIELD

| | | |
|-----|------------|--------------------------|
| H.2 | LCD Shield | Affichage et interaction |
|-----|------------|--------------------------|

| | | | |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Item | LCD Shield | Fabricant | Adafruit |
| Fournisseur | Abra Electronics | Site web | https://learn.adafruit.com/rgb-lcd-shield |
| Site web | https://www.abra-electronics.com/ | | |
| SKU | 772-ADA | Prix | 22.94 \$ |
| Description | 772 LCD Shield Kit | | |

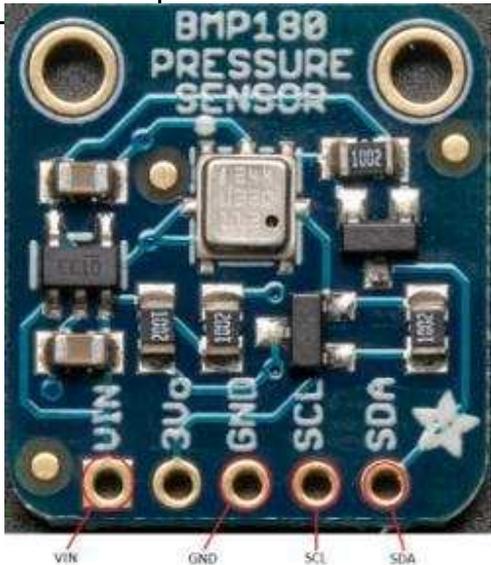
| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Inclus | Image: |
| <p>Écran LCD bleu et blanc Circuit imprimé et composants nécessaires Microcontrôleur Boutons et potentiomètre</p> |  |
| Nécessite un assemblage (soudures). Tutoriel disponible sur le site suivant: | |
| https://learn.adafruit.com/rgb-lcd-shield/assembly | |
| Nécessite le téléchargement de bibliothèques disponibles sur le site suivant : | |
| https://github.com/adafruit/Adafruit-RGB-LCD-Shield-Library | |
| Schéma des broches utilisées | |



FICHE H.3 – BMP180

| | | |
|-----|--------|------------------------------|
| H.3 | BMP180 | Capteur pression/température |
|-----|--------|------------------------------|

| | | | |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Item | BMP180 Capteur pression | Fabricant | Adafruit |
| Fournisseur | Abra Electronics | Site web | |
| Site web | https://www.abra-electronics.com/ | | https://learn.adafruit.com/bmp085 |
| SKU | 1603-ADA | Prix | 11.44 \$ |
| Description | BMP180 Breakout board | | |

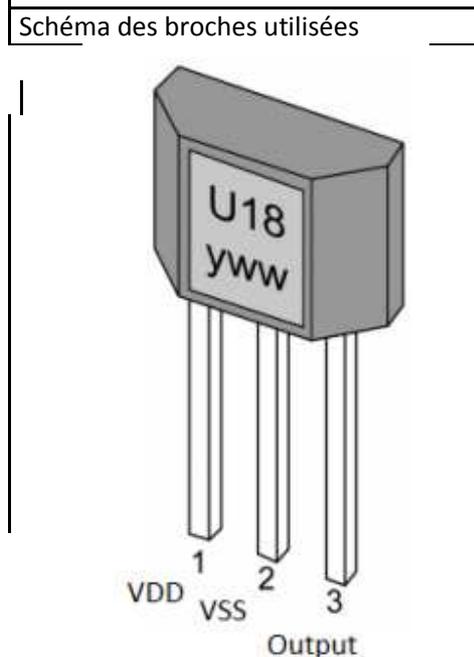
| | | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Inclus | | Image: |
| Circuit intégré et imprimé assemblé Broches de connection | |  |
| Informations du capteur : | | |
| http://www.adafruit.com/datasheets/BST-BMP180-DS000-09.pdf | | |
| Nécessite un assemblage (soudures). Tutoriel disponible sur le site suivant: | | |
| https://learn.adafruit.com/bmp085/wiring-the-bmp085 | | |
| Nécessite le téléchargement de bibliothèques disponibles sur le site suivant : | | |
| https://github.com/adafruit/Adafruit_BMP085_Unified | | |
| Schéma des broches utilisées | |  |

FICHE H. 4 – CAPTEUR EFFET HALL

| | | |
|-----|----------------------|----------------------|
| H.3 | capteur à effet Hall | Capteur (anémomètre) |
|-----|----------------------|----------------------|

| | | | |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Item | US1881 Hall Effect Sensor | Fabricant | Sparkfun |
| Fournisseur | Abra Electronics | Site web | |
| Site web | https://www.abra-electronics.com/ | https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/General/Hall-US1881EUA.pdf | |
| SKU | US1881 | | |
| Description | Capteur à effet Hall | Prix | 1.71 \$ |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Inclus | Image: |
| Capteur à effet Hall | |
| Fonctionnement |  |
| La broche Output change de 0V à 5V lorsqu'un pôle magnétique Nord s'en approche. Il redevient 0V lorsqu'un pôle magnétique Sud s'en approche. | |



FICHE H.5 – PROGRAMMATION DU CODE

| | | |
|-----|---------------|-----------------------|
| H.5 | Programmation | Calcul et intégration |
|-----|---------------|-----------------------|

| | | |
|-------------|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Langage | C++ (Arduino) |  |
| Compilateur | Arduino IDE | |
| Site web | https://www.arduino.cc/ | |
| Codeur | Cédric Leblond-Ménard | |
| Date | 5 avril 2014 | |

```

#include <Wire.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_BMP085_U.h>
#include <Adafruit_MCP23017.h>
#include <Adafruit_RGBLCDShield.h>
#define OFF 0x0
#define ON 0x1

int pin2 = 2;
Adafruit_BMP085_Unified bmp = Adafruit_BMP085_Unified(10085);
Adafruit_RGBLCDShield lcd = Adafruit_RGBLCDShield();

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(pin2,INPUT);
  lcd.begin(16, 2);
  /* Initialise the sensor */
  if (!bmp.begin()) {
    lcd.print("P Error");
  }
  else {
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Choisissez");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("senseur");
  }
}

int k = 0;
void loop() {

```

```
uint8_t buttons = lcd.readButtons();
if (k) {
    lcd.print("Choisissez");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("senseur");
    int k = 0;
}

if (buttons) {
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    if (buttons & BUTTON_UP) {
        lcd.print("Pression");
        int k = 0;
        while(k == 0) {
            //Get a new sensor event
            sensors_event_t event;
            bmp.getEvent(&event);

            //Display the results (in hPa)
            if (event.pressure)
            {
                lcd.noAutoscroll();
                lcd.setCursor(0,1);
                lcd.print(event.pressure);
                lcd.print(" hPa");
            }
            else
            {
                lcd.print("Error");
            }
            uint8_t buttons = lcd.readButtons();
            if (buttons) {
                if (buttons & BUTTON_SELECT) {
                    int k = 1;
                    break;
                }
            }
            delay(200);
        }
    }
}
```

```
if (buttons & BUTTON_DOWN) {
  lcd.print("Vitesse");
  int k = 0;
  while(k == 0) {
    int i = 0;
    int MPeriodms = 0;
    while (i <= 10) {
      int t1 = millis();
      int sortie = pulseIn(pin2,HIGH,100000);
      int Periodms = millis()-t1;
      MPeriodms = MPeriodms + Periodms;
      if (sortie==100000) {
        MPeriodms=0;
        break;
      }
      i=i+1;
    }
    float TrueSpeed = 1130.97/(float)(MPeriodms);
    lcd.noAutoscroll();
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print(TrueSpeed);
    lcd.print(" m/s");

    uint8_t buttons = lcd.readButtons();
    if (buttons) {
      if (buttons & BUTTON_SELECT) {
        int k = 1;
        break;
      }
    }
    delay(200);
  }
}

if (buttons & BUTTON_RIGHT) {
  lcd.print("Temperature");
  int k = 0;
  while(k == 0) {
    //Get a new sensor event
    float temperature;
    bmp.getTemperature(&temperature);

    //Display the results (in C)
    lcd.noAutoscroll();
```

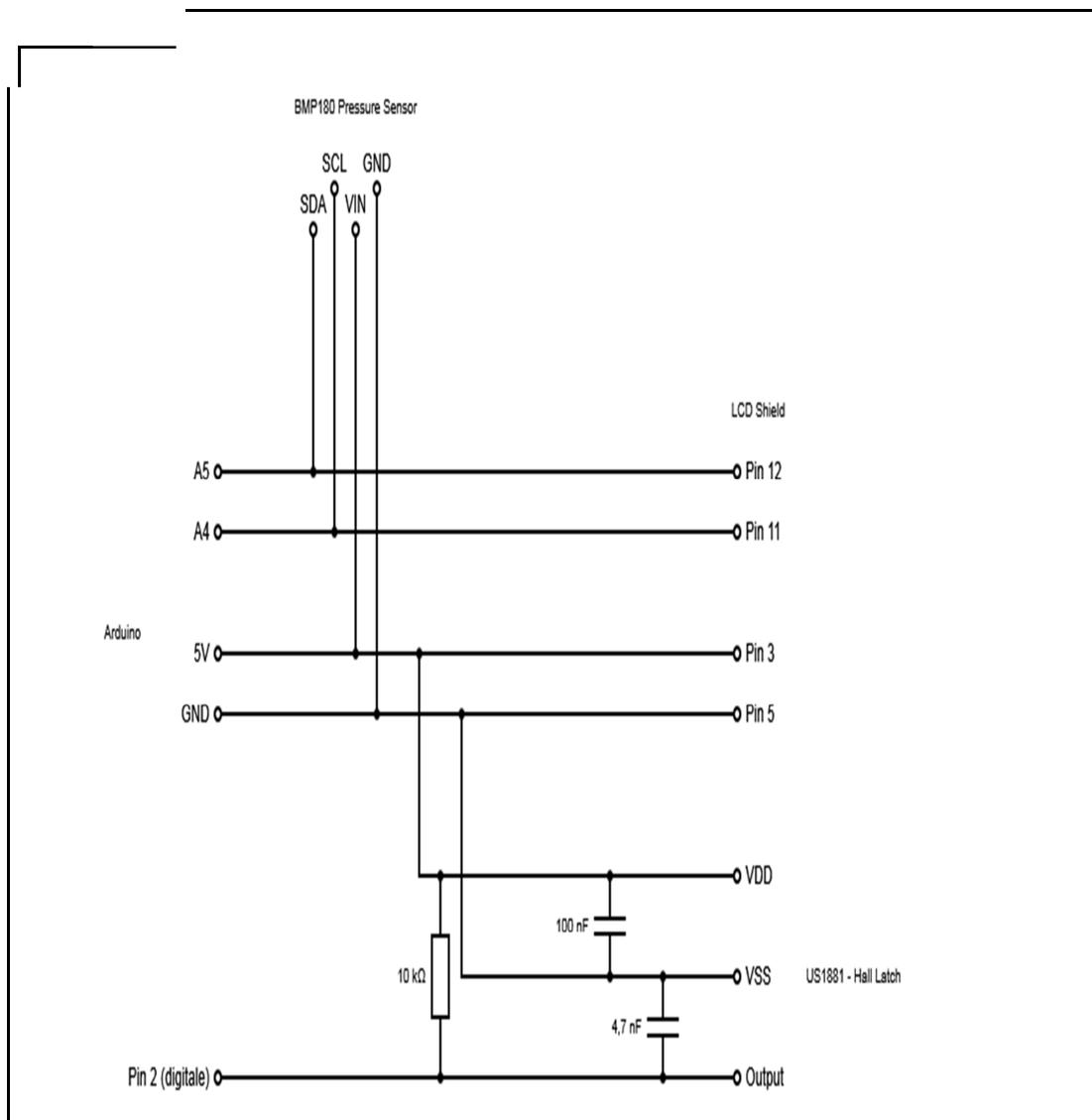
```
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print(temperature);
    lcd.print(" C");

    uint8_t buttons = lcd.readButtons();
    if (buttons) {
        if (buttons & BUTTON_SELECT) {
            int k = 1;
            break;
        }
    }
    delay(200);
}
if (buttons & BUTTON_SELECT) {
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Choisissez");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("senseur");
}
}
delay(200);
}
```

FICHE H.6 – SCHEMA ELECTRIQUE

| | | |
|-----|-------------------|------------|
| H.6 | Schéma électrique | Assemblage |
|-----|-------------------|------------|

| | | |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Conception | Cédric Leblond-Ménard |  |
| Description | Schéma électrique des différents senseurs, du microcontrôleur et de l'écran LCD. | |

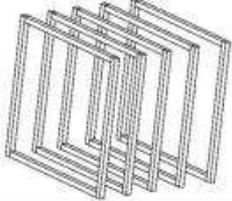
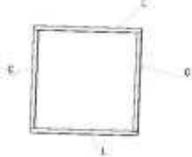


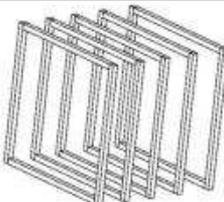
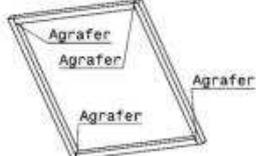
Annexe I

GAMME DE FABRICATION DES REDRESSEURS

| | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-------------|---------------|
| 4 | Ruban de masquage | n\à | Std |
| 3 | Agrafe à bois | n\à | Std |
| 2 | Rouleau de moustiquaire | 1 | 24x84" |
| 1 | Tige de bois | 6 | .5x.5x48" |
| Id | Description | Qté | Spécification |
|  POLYTECHNIQUE MONTREAL LE GÉNIE EN PREMIÈRE CLASSE | | Titre | Cadre assy |
| | | N. de gamme | G-169-C-1 |
| Liste des pièces | | | |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| F | Scie à ruban |
| E | Équerre |
| D | Marteau |
| C | Agrafeuse à bois |
| B | Ciseau |
| A | Crayon |
| Id | Description |
|  POLYTECHNIQUE MONTREAL LE GÉNIE EN PREMIÈRE CLASSE | |
| Liste des outils | |

|  POLYTECHNIQUE MONTREAL <small>LE GÉNIE EN PREMIÈRE CLASSE</small> | |  | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Gamme de fabrication | | | |
| Ensemble: Cadre assy | | | |
| Gamme n.1 | Feuille: 1:2 | | |
| Opération | Description | Croquis | Outils |
| 10 | Se procurer le matériel. | | |
| 20 | Mesurer sur 3 tiges de bois, à intervalle de 11.81" et marquer à la mine. Pour un total de 10 pièces. |  | Crayon Équerre |
| 30 | Identifier chacune des parties par un "C". | | Crayon |
| 40 | Utiliser les retailles de l'OP 30 pour tracer 1 morceau de 12.81" de long. | | Crayon Règle |
| 50 | Identifier ce morceau par un "L". | | Crayon |
| 60 | Mesurer sur 3 tiges de bois, à intervalle de 12.81" et marquer à la mine. Pour un total de 9 pièces. |  | Crayon Équerre |
| 70 | Identifier chacune des parties par un "L". | | Crayon |
| 80 | Avec la scie à ruban, couper chacun des morceaux pour un total de 20 pièces. | | Scie à ruban |
| 90 | Disposer des retailles. | | |
| 100 | Classer les morceaux en 5 sous-assemblages constitués de 2 pièces "C" et 2 pièces "L" chacun. |  | |
| 110 | Agrafer à l'aide d'une agrafe une pièce "L" avec une pièce "C", utiliser une équerre. Frapper l'agrafe avec un Marteau au besoin. |  | Agrafeuse à bois Agrafe à bois Marteau Équerre |

|  POLYTECHNIQUE MONTREAL LE GENIE EN PREMIERE CLASSE | |  | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| Gamme de fabrication | | | |
| Ensemble: Cadre assy | | | |
| Gamme n.1 | Feuille: 2:2 | | |
| Opération | Description | Croquis | Outilage |
| 120 | Répéter l'OP 110 jusqu'à ce qu'un cadre soit complété. | | Marteau Agrafe à bois |
| 130 | Retourner le cadre et agraffer aux mêmes endroits. |  | Marteau Agrafe à bois |
| 140 | Retourner le cadre comme sur le croquis et agraffer les côté en s'appuyant sur un coin de table. |  | Marteau Agrafe à bois |
| 150 | Répéter les étapes 110 à 150 4 fois. | | |
| 160 | Couper 3 moustiquaire avec les ciseau en morceau de 13x13 po. | | Crayon Équerre Ciseau |
| 170 | Bien étirer 1 des carrés de moustiquaire et l'agrafer à un des. | | Agrafe à bois Marteau |
| 180 | Répéter l'étape 170 2 fois. | | Ciseau |
| 190 | Couper l'excédent de moustiquaire avec les ciseaux. | | |
| 200 | Appliquer du ruban masquant autour de chacun des cadres. | | Ruban masquant |
| 210 | Ranger le matériel. | | |
| 220 | Savourer le résultat. | | |