



AER1110 – PROJET INITIAL EN GÉNIE AÉROSPATIAL
GROUPE 01

Étude de cas n° 3

Soufflerie artisanale

Présenté à monsieur Patrice Remy et à monsieur Jean-Paul Lemarquis

Équipe 5

Simon Duchesne (1688714)
Soufiane El Quartassi (1666596)
Lyssa Guilbault (1695767)
David Jobin (1690648)
Samuel Messier (1696814)
Hanna Terranova (1667463)
Benoît Tessier (1685428)

Le 07 avril 2014
à Montréal

Résumé

Dans le cadre du projet initial en génie aérospatial, nous avons comme mandat de construire une soufflerie à travers un processus et des étapes bien définies. Dans une première étude de cas, nous avons étudié les besoins des clients potentiels ce qui a constitué une ébauche pour la seconde étude de cas qui consistait à concevoir le système de mesure de la portance. Enfin cette troisième et dernière étude de cas retrace l'évolution de la fabrication de la soufflerie.

Pour cette dernière partie, les équipes de génération de flux d'air, de maintien structurel et de mesure de portance se sont réunies pour créer le produit final destiné à l'apprentissage dans les écoles secondaires. Plusieurs ajustements ont été nécessaires pour pouvoir unir les ingénieurs concepts de chacune des équipes.

Par ailleurs, l'objectif de la création finale étant l'intégration des trois systèmes en un seul, la soufflerie devra produire un maximum de portance tout en minimisant le poids et en proposant un flux d'air intéressant. Plusieurs pièces furent nécessaires à la conception du système de mesure :

- Le support en Y
- Le balancier
- 3 profils d'aile différents
- Le sous-système d'attache pour les différents profils

À cela s'ajoute une balance qui constitue l'unique instrument de mesure de la soufflerie. De plus, notre équipe était en charge de concevoir la veine d'essai puisque dans le cas du support en Y, des ajustements étaient nécessaires pour l'insertion de l'aile dans la veine d'essai. Dans le but de ne pas obstruer la vue lors des expérimentations, la plaque d'acrylique composant la veine d'essai a été pliée.

Pour résumer, tous ces éléments ont été le fil conducteur dans nos étapes de fabrication et sont présentés dans cette troisième étude de cas.

Mots-clés : compagnies, Support en Y, profil d'aile, veine d'essai, pliage d'acrylique, matériaux, fabrication.

Abstract

The third case study focuses on the planning, design and construction of the wind tunnel. In order to do that, students were grouped in companies made up of 3 teams: one focusing on the air flow, one on the structure and one on the lift measuring system. These companies had one goal: building a wind tunnel that produces the highest lift, has the fastest air flow and is the lightest out of all the tunnels.

Planning and design

First of all, the concept explained in the third case study was adjusted to the other teams' requirements and given preliminary dimensions and materials. Using these, multiple stress studies were done to optimise those dimensions and make sure the system didn't break during use.

Building the lift measuring system

The system's construction was split in 4 parts:

- Y-shaped support
- Fulcrum
- 3 airfoils
- joint between the airfoils and the support

These components were built using wood, steel, aluminium, and polystyrene foam. On top of that, the team had to build the testing area of the tunnel since the measuring system required a specific design in order to install the airfoil on its support. This was done with a single acrylic plate.

This concludes the project. The only step remaining before the product's delivery is testing the wind tunnel under various conditions. This should confirm the analyses and verify that the product is working and meets the client's needs.

Keywords: company, y-shaped support, construction, airfoil

Table des matières

RÉSUMÉ	I
ABSTRACT	II
LISTE DES TABLEAUX.....	V
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 : SOMMAIRE DES REQUIS CONCEPTUELS ET TECHNIQUES	2
1.1 DESCRIPTION, DONNÉES ET RESTRICTIONS	2
1.2 SUPPOSITIONS, HYPOTHÈSES DE DÉPART ET INTERPRÉTATION	3
1.3 RÉFÉRENCE	4
CHAPITRE 2 : ANALYSE DES EFFORTS EXTERNES	6
2.1 SUPPOSITIONS NOUVELLES OU AJUSTÉES ET JUSTIFICATIONS	6
2.2 DESCRIPTION DES CHARGES ET DIAGRAMME DES CORPS LIBRES	7
2.3 FORMULATION, GRAPHIQUES, RÉSULTATS ANTICIPÉS ET INTERPRÉTATION	8
2.4 SIMULATION D'UN GLOBAL 5000	10
2.5 FICHES ET RÉFÉRENCES	12
CHAPITRE 3 : ANALYSE DES EFFORTS INTERNES	13
3.1 DESCRIPTION DES SYSTÈMES ET SCHÉMAS	13
3.2 CONFIGURATION DES SECTIONS CRITIQUES ET DIAGRAMME DES CORPS LIBRES	15
3.3 FICHE, FORMULATION, GRAPHIQUES, INTERPRÉTATIONS ET VALIDATION	16
CHAPITRE 4 : RÉALISATION – SOUS-SYSTÈME ET COMPOSANTS	17
4.1 CALCULS, CHOIX ET JUSTIFICATION	17
4.2 CONSÉQUENCES ET RÉPERCUSSIONS	22
4.3 DESSINS ET DIMENSIONS NOMINALES ET TOLÉRANCES	23
CHAPITRE 5 : RÉALISATION – SYSTÈME DE MESURE ET COMPOSANTS	24
5.1 CALCULS, CHOIX ET JUSTIFICATIONS	24

5.2 CONSÉQUENCES ET RÉPERCUSSIONS.....	25
CHAPITRE 6 : FABRICATION ET ESSAIS	27
6.1 SOUS-ENSEMBLE ARTISANAL RÉALISÉ ET SYSTÈME DE MESURE	27
6.2 INTERFAÇAGE AVEC LES AUTRES SOUS-SYSTÈMES	29
6.3 SENSIBILITÉ DU SYSTÈME DE MESURE RÉALISÉ.....	30
CHAPITRE 7 : TABLEAU SYNTHÈSE DES PIÈCES ET DU PRODUIT.....	31
7.1 NOMENCLATURE ET NUMÉROTATION DES PIÈCES.....	31
7.2 COÛTS-MATIÈRE, POIDS, DIMENSIONS ET JUSTIFICATIONS	32
CONCLUSION.....	34
RÉFÉRENCES	35
ANNEXE A : MAISON DE LA QUALITÉ 1	37
ANNEXE B : MAISON DE LA QUALITÉ 2	38
ANNEXE C : MATRICE MORPHOLOGIQUE	39
ANNEXE D : MATRICE DE PUGH	40
ANNEXE E : DONNÉES DES PROFILS D'AILE.....	41
ANNEXE F : CALCULS DE RÉSISTANCE DES MATÉRIAUX DES SOUS-SYSTÈMES	43
ANNEXE G : FICHE TECHNIQUE DU PROFIL D'AILE JMB1210	47
ANNEXE H : FICHE TECHNIQUE POUR LA FIXATION DE L'AILE	48
ANNEXE I : CALCULS DE RÉSISTANCE DES MATÉRIAUX DU SYSTÈME DE MESURE	49
ANNEXE J : PHOTOS DU PROCESSUS DE FABRICATION	51
ANNEXE K : DESSINS TECHNIQUES DU SYSTÈME DE MESURE	57
ANNEXE L : FEUILLE DE TEMPS	66
ANNEXE M : ÉCHÉANCIER	67
ANNEXE N : FACTURE	69
ANNEXE O : FICHE DU SYSTÈME DE MESURE.....	70

Liste des tableaux

TABLEAU 4.1 : LISTE DES CONTRAINTES AGISSANT SUR LES SOUS-SYSTÈMES	17
TABLEAU 4.2 : CALCUL DE LA CONTRAINTE EN FLEXION DANS LE PROFIL D'AILE	19
TABLEAU 4.3 : CALCUL DE LA CONTRAINTE DE CISAILLEMENT DANS LE PROFIL D'AILE	19
TABLEAU 4.4 : CALCUL DE LA CONTRAINTE DE CISAILLEMENT DANS L'AXE DU SUPPORT	20
TABLEAU 4.5 : CALCUL DE LA CONTRAINTE EN TORSION DANS LA TIGE FILETÉE	21
TABLEAU 4.6 : CALCULS DU DÉPLACEMENT ANGULAIRE DE LA TIGE FILETÉE	21
TABLEAU 5.1 : LISTE DES CONTRAINTES NORMALES DE CISAILLEMENT	24
TABLEAU E.1 : PROFIL JMB1210.....	X
TABLEAU E.2 : PROFIL EPPLER E61	X
TABLEAU E.3 : PROFIL GOTTINGEN 464.....	X

Introduction

Dans le cadre du cours de projet initial en génie aérospatial de la session hiver-2014, les étudiants ont dû se mettre dans la peau de jeunes ingénieurs afin de découvrir les différentes étapes de conception d'un produit. Dans notre cas, ce produit est une soufflerie qui va permettre la vulgarisation scientifique de concepts aérodynamiques auprès des élèves d'écoles secondaires. Les travaux ont été effectués à travers trois études de cas détaillées se présentant ainsi :

- * Étude approfondie des besoins des clients potentiels
- * Conception complète des systèmes inclus dans la soufflerie
- * Fabrication et analyse structurale et expérimentale du produit final

Lors de la deuxième étape, les équipes se sont fait attribuer comme mandat de se concentrer sur la mesure de portance, sur le maintien structurel de la soufflerie ou encore sur la génération du flux d'air. Pour cette troisième et dernière étape, les équipes devaient réunir leurs concepts et s'ajuster aux autres en créant une compagnie, de manière à réaliser une soufflerie complète et fonctionnelle.

Ce rapport se concentre davantage sur la réalisation et la construction du système de mesure de portance. L'ensemble de ce qui concerne la fabrication et l'analyse structurale du système s'expliquera à travers toutes les parties du rapport suivant et couvriront l'essentiel des décisions qui auront servies à concevoir le produit final :

- * Sommaire des requis conceptuels et techniques
- * Analyse des efforts internes et externes entourant le système
- * Réalisation des sous-systèmes, des systèmes de mesure et de leurs composants
- * Fabrication et essais
- * Tableau synthèse des nombreuses pièces utilisées et du produit

Chapitre 1 – Sommaire des requis conceptuels et techniques

1.1 Description, données et restrictions

Le mandat de notre équipe consiste à réaliser le système de mesure de portance tel que décrit lors de l'étude de cas 2, la veine d'essai de la soufflerie ainsi qu'un profil d'aile à tester. Bien que ces éléments soient reliés entre eux, nous avons jugé plus pratique de traiter chacun séparément lors de l'étude détaillée. Notons tout de même que le produit final doit être sécuritaire pour les utilisateurs, demeurer stable pendant un essai et pouvoir se ranger dans un espace limité. De plus, l'utilisation du produit doit être facile avec une préparation minimale.

Tout d'abord, le système de mesure de portance doit permettre une mesure quantitative de premier ordre d'un modèle d'aile équipé d'un seul et même profil en envergure. Cette mesure doit être réalisée à l'aide d'une balance. La balance à notre disposition est une balance de cuisine électronique ayant comme étendue de valeurs de 1g à 5000g. Lors de l'étude de cas 2, nous avons adopté une configuration munie d'un support en Y, externe à la veine d'essai, relié à un dispositif pivot/levier transmettant la portance générée vers une balance.

Ensuite, la veine d'essai doit permettre l'observation du profil d'aile durant l'essai et montrer que la portance est fonction de l'orientation du profil d'aile et de la vitesse d'écoulement. L'assemblage et la fixation de la veine d'essai doivent être faciles et rapides. Lors de l'étude de cas 2, nous avons décidé de construire une veine d'essai en poly méthacrylate de méthyle (Plexiglas®) pour la transparence et la légèreté de ce matériau.

Finalement, le profil d'aile doit être muni du même profil portant sur toute son envergure. Il doit être relié à notre système de mesure de portance d'une manière qui permette de mesurer la portance la plus précise et la plus élevée possible. Il doit également être possible de faire varier l'angle d'attaque du profil d'aile de façon rapide et efficace.

À partir de ces restrictions, nous avons déterminé des fonctions technologiques très détaillées du produit final. Lors de l'étude détaillée, nous avons généré des idées de solutions répondant à ces fonctions nous permettant de concevoir en détail chacun des éléments du produit final.

Fonctions technologiques détaillées

- **Système de mesure de portance (support en Y et dispositif levier/pivot)**
 - Permettre la rotation autour d'un pivot
 - Supprimer les degrés de liberté autre que la rotation autour d'un pivot
 - Transmettre parfaitement la portance générée par le profil d'aile
- **Veine d'essai**
 - Permettre l'insertion du profil d'aile
 - Être stable sur la soufflerie
 - Réduire au maximum les turbulences du flux d'air
 - Permettre l'observation du phénomène
- **Profil d'aile (incluant le dispositif qui le relie au support en Y)**
 - Maintenir l'angle d'attaque stable lors de l'utilisation
 - Permettre de varier l'angle d'attaque entre deux essais

1.2 Suppositions, hypothèses de départ et interprétation

Au moment de concevoir notre produit final, nous avons discuté avec les autres équipes de notre compagnie afin de prédéterminer certains aspects. Ainsi, il fut convenu que notre veine d'essai soit constituée d'un prisme rectangulaire à 3 côtés que l'on déposera sur une table munie de rainures. Il restait tout de même plusieurs questions majeures auxquelles répondre par rapport au produit final, notamment :

- Comment insérer le profil d'aile à l'intérieur de la veine d'essai, sachant que le support est externe à la soufflerie ?
- Comment assembler les 3 côtés de la veine d'essai ?
- Comment relier solidement le profil d'aile au support en Y ?
- Comment maintenir et permettre la variation de l'angle d'attaque du profil ?
- Comment relier les différentes parties du support en Y et limiter les degrés de liberté de mouvement ?

Au départ, afin de répondre à ces besoins, nous avons émis comme hypothèse que la veine d'essai serait construite à partir d'une longue plaque de Plexiglas pliée en un prisme à 3 côtés et qu'elle serait munie de fentes sur les côtés permettant l'insertion d'une tige plate traversant le profil d'aile. Cette tige serait alors elle-même encastrée dans différentes fentes pratiquées dans le support en Y afin de maintenir l'angle d'attaque et de permettre une variation de celui-ci entre 2 essais.

Afin de s'assurer que cette configuration soit la meilleure possible, nous avons utilisé les outils mis à notre disposition dans le cadre du cours. Ainsi, à partir des fonctions technologiques et des idées de solution générées, nous avons créé une matrice morphologique¹ et avons combiné nos idées afin d'en arriver à plusieurs configurations finales plausibles répondant aux questions soulevées précédemment. Cette matrice morphologique figure en annexe.

Nous en sommes arrivés à 3 configurations différentes que nous avons intégrées à une matrice de Pugh² afin de déterminer la meilleure configuration possible. Cette matrice figure en annexe. La solution finale retient la veine d'essai de notre première hypothèse. Cependant, le profil d'aile est supporté par 2 clous de chaque côté, eux-mêmes retenus par des plaquettes de bois serrées sur une tige filetée, elle-même serrée par des boulons et rondelles sur des fentes pratiquées dans le support en Y. Les fentes de la veine d'essai sont bouchées par des morceaux de chloroplaste plastique et le levier du support pivote au moyen d'un roulement à billes. Cette configuration permet d'accomplir toutes les fonctions technologiques mentionnées plus haut tout en répondant aux besoins du client.

1.3 Références

Afin de nous aider à faire un choix éclairé quant à notre produit final, nous avons jugé nécessaire d'avoir recours à des ressources internes et externes. Ainsi, nous avons pu apprécier l'aide de nos enseignants qui ont mis leur expérience et leur savoir à notre disposition lorsque nous avons des interrogations d'ordre technique. Entre autres, nous avons pu comprendre grâce à M. Rémy que les

¹ Voir Annexe C

² Voir Annexe D

turbulences dans le flux d'air engendrées par les fentes dans la veine d'essai auraient un impact minimal. Également, M. Lemarquis nous a grandement aidés à résoudre le problème du maintien de l'angle d'attaque du profil d'aile en nous proposant d'utiliser 2 clous au lieu d'une seule tige. Nous avons également eu recours à l'aide des autres équipes de la compagnie. En effet, certains membres des autres équipes, grâce à leur implication dans les sociétés techniques de l'École, disposaient de connaissances techniques largement supérieures aux nôtres. Ils nous ont été très utiles lors du processus de conception de construction.

Chapitre 2 – Analyse des efforts externes

2.1 Suppositions nouvelles ou ajustées et justifications

Nous avons conçu trois profils d'aile afin de pouvoir choisir celui qui serait le plus adapté et intéressant dans les écoles secondaires. Parmi les modèles sélectionnés, deux proviennent de banques de données et un provient de la société technique *Avion cargo*.

Ces profils furent tous sélectionnés parce qu'ils présentaient une grande quantité de portance avec une traînée limitée. Par ailleurs, au cours de recherches, nous avons remarqué qu'une cambrure marquée du profil, à l'image de volet sur le bord de fuite, engendre une très grande quantité de portance. En fait, un profil creux entraîne, selon les principes de Bernoulli et Venturi, une grande surpression en dessous de l'aile. Les profils sélectionnés sont respectivement le Eppler E.61, le Gottingen 464 et le JMB1210.

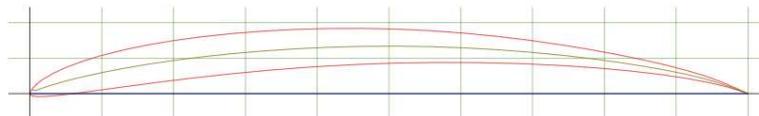


Figure 2.1: Profil d'aile Eppler E61

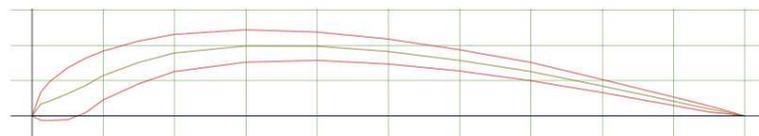


Figure 2.2: Profil d'aile Gottingen 464

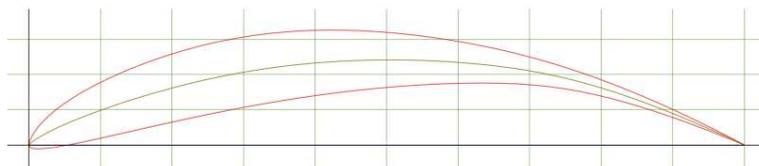


Figure 2.3: Profil d'aile JMB1210

Considérant que le flux d'air est supposé tourner autour de 25 m/s, nous avons utilisé pour nos calculs un nombre de Reynolds d'environ 500 000 et un nombre de Mach de 0,07³. Nous avons également considéré que l'écoulement serait assez laminaire, du niveau d'une soufflerie moyenne, pour que sa valeur N_{crit} soit de

³Calculs à l'annexe C

9,00. Les coefficients de portance et de traînée furent donc calculés à l'aide du programme d'analyse et de design XFOIL pour différents angles d'attaques⁴.

On remarque que le profil créant le plus de portance est le JMB1210 avec une portance de 62,06 N pour un angle de 9°. Lors de l'essai avec la soufflerie, on testerait également un angle de 0° qui tournerait s' supposément autour de 43 N. Ensuite, le deuxième profil générant le plus de portance, soit 49,10 N, est le Gottingen 464 à un angle de 12°. Finalement, le profil Eppler E61 entraîne une portance de 47,17 N à un angle de 8°, le maximum, et une portance de 26,98 N à un angle de 0°.

2.2 Description des charges, schémas et diagramme des corps libres

Pour cette partie, on se concentre sur le profil JMB1210⁵ celui qui a démontré la plus grande portance durant nos essais, comme il était prévisible selon notre étude.

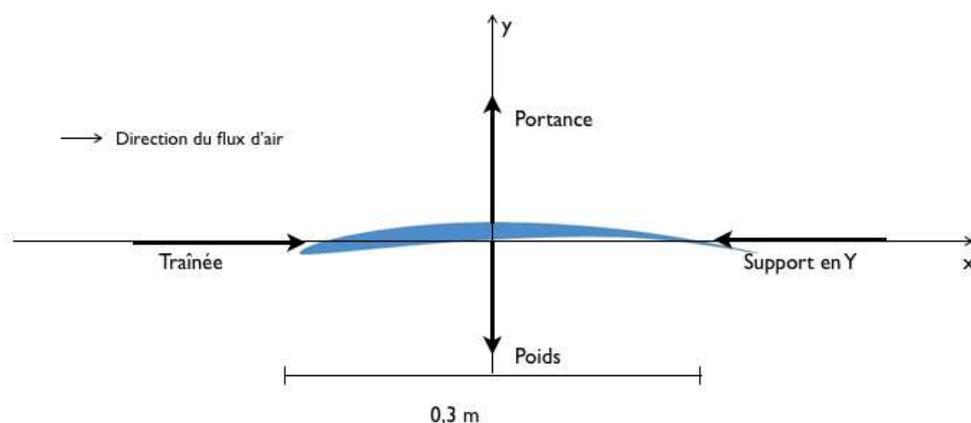


Figure 2.4: Diagramme de corps libre du profil d'aile JMB1210

Tout d'abord, les valeurs utilisées sont théoriques puisqu'elles proviennent d'une simulation. Elles ne peuvent donc pas être parfaitement exactes par rapport à la réalité. Ainsi, la force que devra fournir le support en Y auquel est relié l'aile par des tiges métalliques sera égale et opposée à la traînée du profil par le principe d'action-réaction et considérant que notre aile est immobile selon l'axe des x (voir figure 3.4).

⁴ Tableaux à l'annexe C

⁵ Se référer à l'annexe C pour les autres profils

Par ailleurs, la masse de l'aile, en incluant la tige métallique qui y est reliée, est égale à 0,163 kg, c'est-à-dire un poids de 1,599 N. La portance devra donc fournir au moins 1,599 N afin de simplement maintenir l'aile en équilibre selon l'axe des y. Une force de portance plus grande que le poids entraînerait un surplus de force poussant l'aile vers le haut ce qui augmenterait la masse affichée sur la balance (voir section 3.2 pour les détails).

Équations d'équilibre:

$$\sum F_x = T - F_Y = 0$$

$$T = F_Y$$

$$\sum F_y = L - P \neq 0$$

$$\sum M_o = (0,2032 \text{ m}) * L - (0,2032 \text{ m}) * P + (0,0650 \text{ m}) * T - (0,1143 \text{ m}) * F_Y + M_o = 0$$

On suppose que $M_o = 0$, puisque le mouvement autour du pivot est négligeable.

$$\sum M_o = (0,2032 \text{ m}) * L - (0,2032 \text{ m}) * P - (0,0493 \text{ m}) * T = 0$$

2.3 Résultats anticipés et interprétation

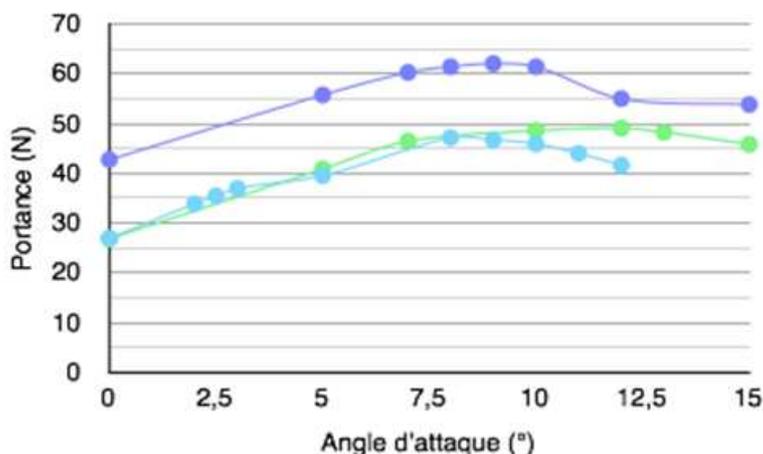
D'après les valeurs théoriques obtenues à partir du programme XFOIL, on anticipe que la portance devrait avoisiner 62,06 N autour d'un angle d'attaque de 9°.

$$P = C_L * \frac{\rho * V^2 * A}{2} = 2,1146 * \frac{1,2041 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) * \left(25,0 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)\right)^2 * 0,280(\text{m}^2)}{2} = 62,06 \text{ N}$$

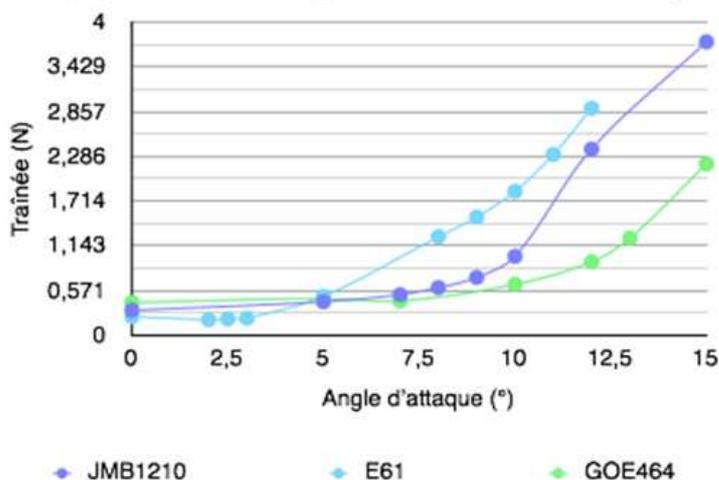
Comme le poids de l'aile s'oppose à la portance, il en résulte une force résultante 60,46N vers le haut. La traînée quant à elle pour un angle d'attaque de 9 serait d'environ 0,74N. Cette valeur est obtenue par une division de la portance par la finesse. Comme ces valeurs sont théoriques, elles ne considèrent pas nécessairement avec précision la traînée de frottement incluse dans la traînée de profil ainsi que la traînée induite. Toutefois, si on se fie à cette valeur, la force fournie par le support sur les tiges du profil serait elle aussi de 0,74 N.

Le profil JMB1210 présentait le plus de portance en théorie. Cependant, lorsque nous avons fait quelques test pratiques, nous avons remarqué que les profils Eppler E61 et Gottingen 464 avaient tendance à perdre leur courbure sous l'effet du flux d'air. Cela confirme donc le choix du JMB1210 pour les essais en classe.

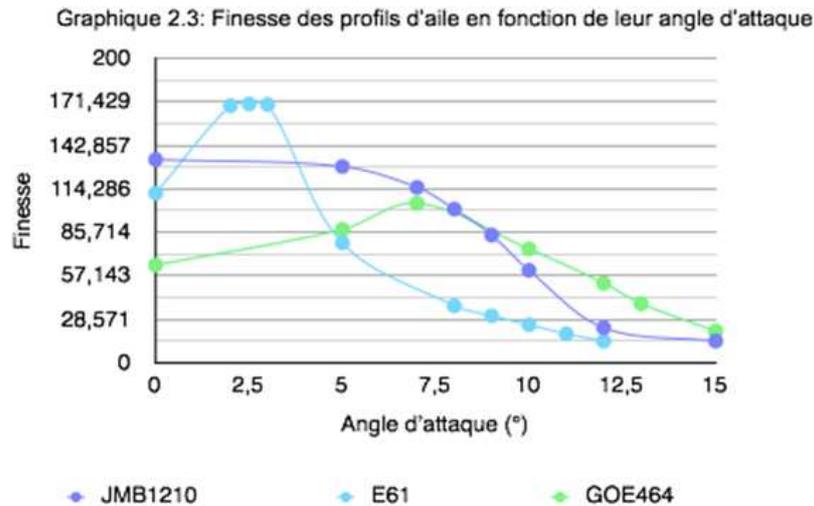
Graphique 2.1: Portance des profils d'aile en fonction de leur angle d'attaque



Graphique 2.2: Traînée des profils d'aile en fonction de leur angle d'attaque



Dans le graphique 2.1, on peut observer que pour n'importe quel angle d'attaque, le profil JMB1210 engendre toujours le plus de portance. Par ailleurs, passé l'angle optimal de chaque profil, on remarque que le flux d'air commence à décrocher et que la portance diminue. Aussi, pour le profil E61, le logiciel ne pouvait plus fournir de coefficient de portance passé un angle de 12° puisque le décrochage était trop grand. Dans le graphique 2.2, on remarque principalement que la traînée produite par le profil E61 augmente grandement passé un angle d'attaque de 5°. Le profil JMB1210 connaît également une augmentation particulière à 12°.



Dans le graphique 2.3, la finesse maximale de chaque profil est vraiment variable. En réalité, la finesse est généralement un facteur décisif dans le choix d'un profil d'aile pour un projet. Toutefois, dans notre cas, c'est uniquement la mesure de la portance qui est mesurée. C'est pourquoi nous n'avons pas accordé une grande importance à ce facteur.

2.4 Simulation d'un Global 5000

Si on faisait voler notre profil d'aile dans les conditions d'un Global 5000, les conditions seraient :

- $V_{max} = 0,89 M$
- $T_{air} = -50^{\circ}C$
- $Altitudemax = 51\ 000\ pi$

Tout d'abord, on sait que l'altitude a un impact sur la température, puisqu'elle descend d'environ $2^{\circ}C$ par 1000 pieds selon l'OACI. Par ailleurs, la vitesse dépend de la température de l'air, ce qui comprend qu'elle diminue lorsque l'altitude augmente. À une température de $-50^{\circ}C$, la vitesse du son serait donc de $299,46\ m/s$. Ceci entraîne donc une vitesse de subsonique de $0,89 M$ équivalente à $266,52\ m/s$.

$$V = M \times a = 0,89 M \times 299,46\ m/s = 266,52\ m/s$$

Dans ces conditions, la viscosité cinématique de l'air est également modifiée, à une valeur de 0,000083941 m²/s. On peut donc calculer le nombre de Reynolds, soit 9.5253x 10⁵.

$$Re = \frac{VL}{\nu} = \frac{266,52 \text{ m/s} \times 0,3 \text{ m}}{0.000083941 \text{ m}^2/\text{s}} = 952 \ 526$$

Malheureusement, à un nombre de Reynolds aussi grand, il est impossible de faire converger le flux d'air autour de notre profil à l'aide du simulateur XFOIL, même en augmentant la corde de plusieurs mètres. Il est ainsi possible que notre aile décroche dans ces conditions, même à un angle d'attaque de 0°.

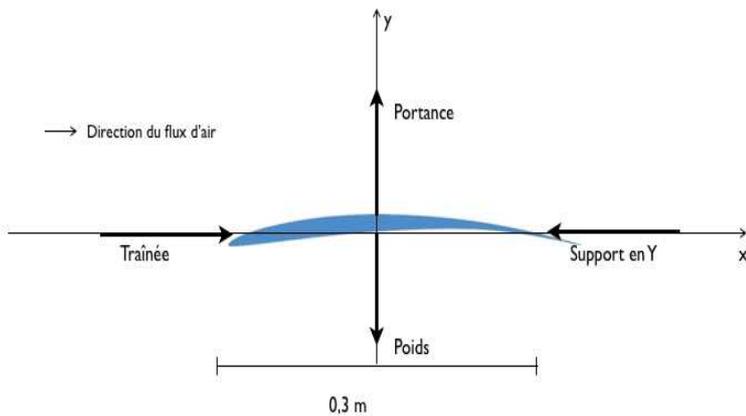
Toutefois, si on supposait que le coefficient de portance et la surface alaire étaient les mêmes que celles énoncées pour la partie expérimentale, on aurait un coefficient de 1,4568 pour un angle d'attaque de 0°. On obtiendrait donc une portance de 480,89 N, ce qui est nettement plus grand que le 42,76 N obtenu avec les conditions expérimentales.

$$L = C_L \frac{\rho V^2 A}{2} = 1,4568 \frac{(0,17359 \text{ kg/m}^3)(266,52 \text{ m/s})^2(0,0780 \text{ m})}{2} = 480,89 \text{ N}$$

* Les propriétés de l'air ont été tirées du site <http://www.aerospaceweb.org/design/scripts/atmosphere/>, qui lui-même utilise les valeurs publiées dans le US Standard Atmosphere publié en 1976.

2.5 Fiches et références

DIAGRAMME DES CORPS LIBRES



FORCES AGISSANT SUR L'AILE

Portance
Traînée
Poids
Support en Y

ÉQUATIONS

$$\sum F_x = T - F_Y = 0 \implies T = F_Y$$

$$\sum F_y = L - P \neq 0$$

$$\sum M_o = (0,2032 \text{ m}) * L - (0,2032 \text{ m}) * P - (0,0493 \text{ m}) * T = 0$$

CONSTANTES

Valeurs pour le profil d'aile JBM1210 pour un angle d'attaque de 9°

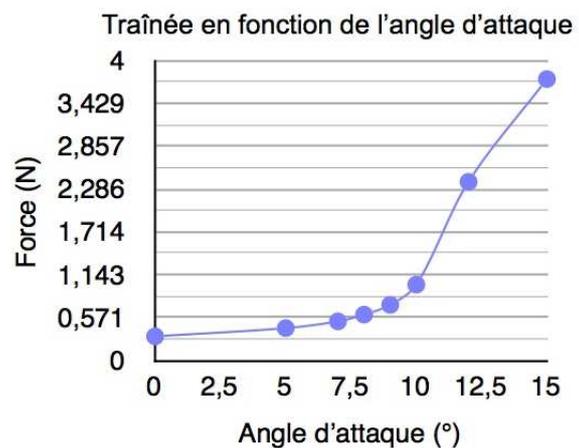
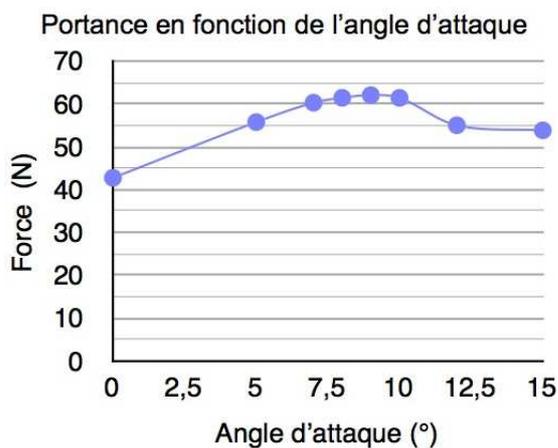
$$L = 62,06 \text{ N}$$

$$P = 1,599 \text{ N}$$

$$T = 0,74 \text{ N}$$

$$F_Y = 0,74 \text{ N}$$

GRAPHIQUES



INTERPRÉTATION ET VALIDATION

Étant donné que la force suivant l'axe des x positifs est plus grande que celle dirigée vers le bas, l'aile devrait en théorie supporter le poids du support en Y. De plus, d'après l'étude des graphiques ci-dessus, on constate que pour un même angle d'attaque donné, la portance agissant sur l'aile est beaucoup plus élevée que la traînée, tel qu'il était désiré au départ.

Chapitre 3 – Analyse des efforts internes

3.1 Description des systèmes et schémas

Lors de la deuxième étude de cas concernant la conception d'une soufflerie artisanale, notre équipe s'est accordée sur un système de mesure basé sur un support en Y sur lequel l'aile repose. Lorsque celle-ci est soumise au flux d'air, elle génère une certaine portance ce qui a pour conséquence d'entraîner le support en Y en rotation autour d'un balancier ou plus précisément d'un pivot, qui lui-même entraîne un poids qui pèse sur la balance. Ce système intuitif permet donc une lecture facile de la portance.

Cependant, notre cheminement lors de cette étude de cas n'était que provisoire étant donné que les compagnies de fabrication n'avaient pas encore été créées. Dans cette perspective, il était alors difficile d'avoir des dimensions concluantes concernant l'appareil de mesure. C'est pourquoi nous avons passé en revue toutes les mesures des pièces du support lorsque nous avons été informés du gabarit des pièces des autres compagnies. Toutes les dimensions du support en Y sont illustrées en annexe K et les images 3.1 et 3.2 ci-dessous permettent de comprendre notre progression entre les études de cas 2 et 3.

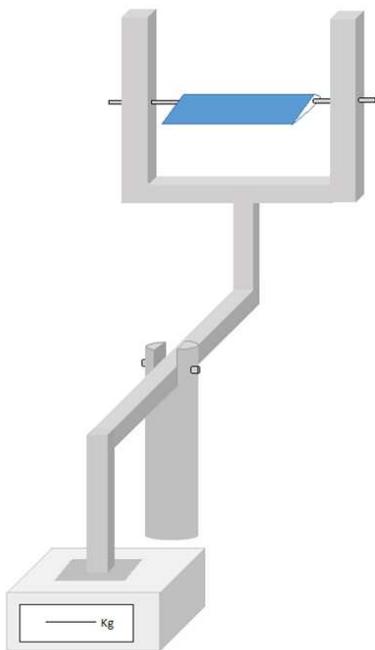


Figure 3.1 : support en Y (étude de cas 2)

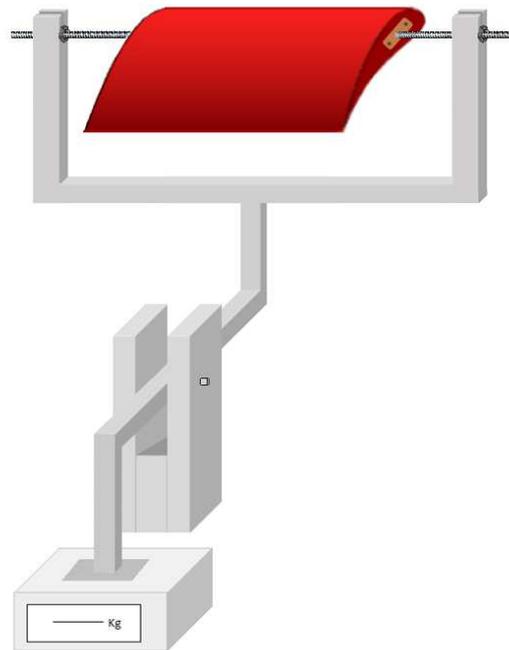


Figure 3.2 : Support en Y (étude de cas 3)

De plus, nous n'avions pas encore imaginé une solution appropriée concernant la fixation de l'aile lors de notre seconde étude de cas. Suite à une longue réflexion et de nombreux débats, nous avons considéré l'option de faire des fentes en U sur les deux poteaux du support afin d'introduire une tige filetée fixée de part et d'autre de l'aile. En effet, la tige filetée ne peut traverser l'aile entièrement puisque cela risquerait de gravement l'endommager. Cependant, nous avons eu l'idée de clouer deux plaquettes de chaque côté de l'aile pour lui assurer une meilleure stabilité. Par ailleurs, afin de maintenir solidement le support et la tige serrés ensemble, deux écrous accompagnés de deux rondelles de chaque côté permettent une fixation fiable. Le schéma 3.3 illustre le système de fixation de l'aile au support.

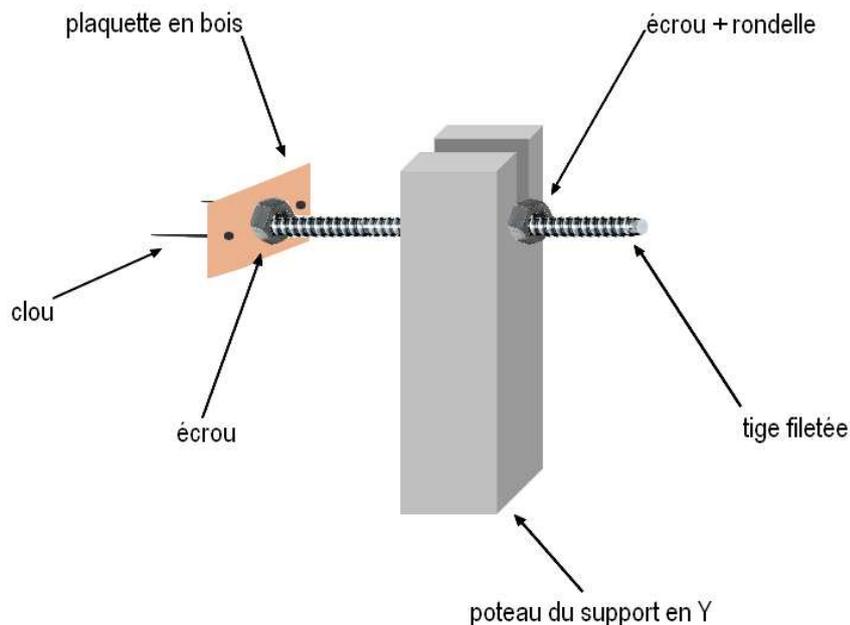


Figure 3.3 : Concept de fixation de l'aile sur le support en Y

Le dernier élément modifié est le balancier à cause de sa forme cylindrique, difficile à concevoir et c'est pourquoi nous avons considéré une géométrie droite à la place. Un roulement à bille encastré dans la tige du support permet la rotation de celui-ci autour de l'axe du balancier. Par ailleurs, la compagnie structure souhaitait pouvoir fixer le balancier sur la table soutenant la veine d'essai. Nous avons par conséquent rajouté de la matière sur sa partie supérieure pour permettre la fixation telle qu'illustré sur la figure 3.2. Des dessins techniques illustrent également la solution complète à l'annexe E.

3.2 Configuration des sections critiques et diagramme des corps libres

Sections critiques

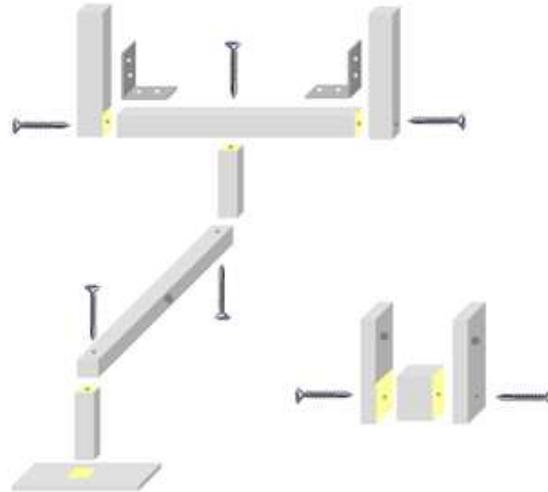


Figure 3.4 : vue éclatée du support

La figure 3.4 représente une vue éclatée du support en Y avec toutes les sections critiques qui correspondent aux points de fixation entre chaque pièce du support. Les vis à bois permettent dans un premier temps d'immobiliser les pièces entre elles. La colle, représentée en jaune sur le schéma et les équerres permettent de consolider toute la structure.

Diagramme des corps libres

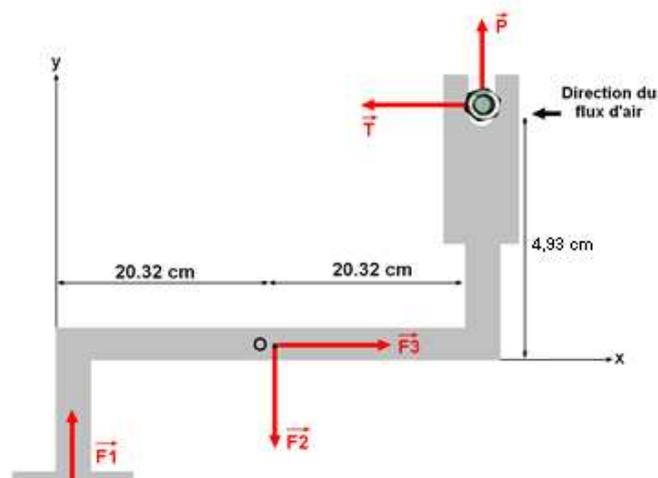
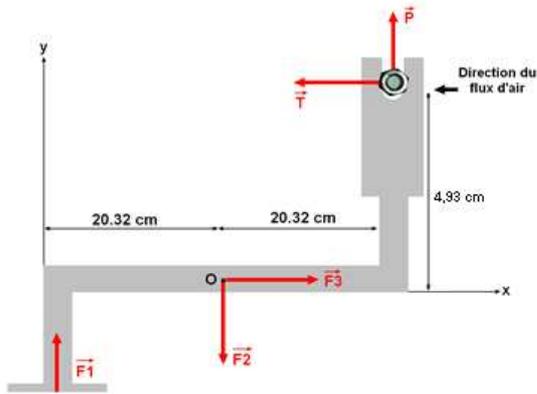


Figure 3.4 : Diagramme des corps libres sur le support

Chapitre 4 – Réalisation - Sous-système et composants

DIAGRAMME DES CORPS LIBRES



DÉFINITION DES SYMBOLES

P : Portance

T : Traînée

F1 : Force de la balance sur le support

F2 : Force du balancier sur le support

F3 : Force qui contre la traînée

EQUATIONS

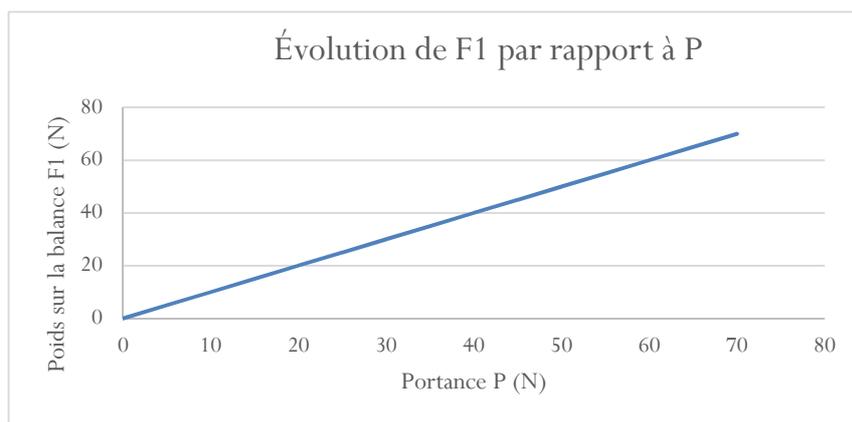
$$\sum F_x = F_3 - T = 0 \Rightarrow \boxed{F_3 = T}$$

$$\sum F_y = F_1 + P - F_2 = 0 \Rightarrow \boxed{F_2 = P + F_1}$$

$$\sum M_o = 0,2032 \cdot P - 0,2032 \cdot F_1 + 0,0493 \cdot T = 0 \Rightarrow \boxed{F_1 = P - 0,2426 \cdot T}$$

$$\text{Or finesse} = \frac{P}{T} = 83,9 \text{ pour un angle d'attaque de } 0^\circ \Rightarrow \boxed{F_1 = 0,9971 P}$$

DIAGRAMME



INTERPRÉTATION ET VALIDATION

Le diagramme ci-dessus présente la variation du poids sur la balance en fonction de la portance générée par l'aile. D'un point de vue théorique, il s'agit d'une droite linéaire de type $y=0,9971 \cdot x$. Cependant, nous ne nous attendons pas à avoir un résultat tout à fait précis et juste en raison de nombreuses incertitudes dues aux surfaces non homogènes, au flux d'air pas totalement laminaire, et toutes autres sources d'imprécisions.

La réalisation des sous-systèmes de la soufflerie a demandé plusieurs calculs d'optimisation pour avoir le meilleur ratio solidité/poids étant deux des besoins principaux du client. Il faut donc trouver un équilibre pour fournir une structure à la fois solide et qui minimise le poids. Pour cela, des études⁶ de résistance des matériaux ont été réalisées sur les différentes parties de la soufflerie pour connaître les dimensions minimales requises pour résister à toutes les contraintes possibles.

Suite à l'analyse des efforts internes et externes, une liste des différentes contraintes a été établie :

TABLEAU 4.1 : LISTE DES CONTRAINTES AGISSANT SUR LES SOUS-SYSTÈMES

Éléments	Contraintes
Profil d'aile	- Flexion - Cisaillement
Axe du support	- Torsion - Cisaillement

4.1.1 - Profil d'aile

En raison de sa masse volumique assez faible et de sa facilité à être travaillés, il a été décidé que les profils d'aile soient faits en styromousse. Afin de s'assurer que cela soit une bonne décision, il faut voir si ce matériau est capable de résister aux forces auxquelles il sera soumis.

- Contrainte en flexion

Le profil d'aile est soumis à un flux d'air qu'il transforme partiellement en portance et en traînée. Afin de contrer ce mouvement, des clous ont été plantés dans le profil. Puisque ceux-ci sont situés sur le côté et que les forces s'exercent sur le profil au complet, il se crée un phénomène de flexion au milieu qu'on peut visualiser sur la figure 4.1. De plus, étant donné que les calculs réels sont trop compliqués pour être faits à la main, plusieurs approximations ont été faites.

⁶ Tous les calculs du chapitre 3 sont détaillés dans l'annexe D

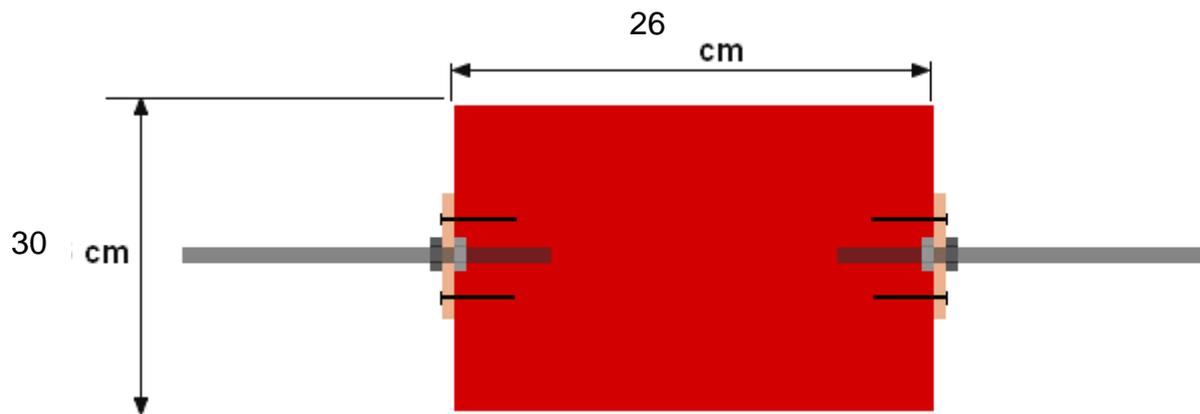


Figure 4.1 : aile vue de dessus avec ses fixations

Approximations

- Le profil d'aile a été considéré comme une plaque rectangulaire de 30x26x2 cm.
- La portance et la masse ont été considérées comme réparties uniformément sur le profil.
- Le recouvrement en plastique de l'aile, étant très mince, a été négligé.
- les clous ont été considérés comme un seul appui réparti sur toute la surface de côté de l'aile.
- L'angle d'attaque, relativement petit, a été négligé.

La portance maximale est estimée à 62,06 N⁷ pour le profil JMB1210 à un angle de 9° et une vitesse de vent de 25 m/s. Le montage profil-tige a une masse d'environ 0,163 kg. La formule pour la flexion est :

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I}$$

- σ : contrainte (Pa)
- M : moment fléchissant maximal (Nm)
- y : écart maximal avec le plan neutre (m)
- I : deuxième moment d'inertie (m⁴)

TABLEAU 4.2 : CALCUL DE LA CONTRAINTE EN FLEXION DANS LE PROFIL D'AILE

Force	I (m ⁴)	M (Nm)	y (m)	σ
-------	---------------------	--------	-------	----------

⁷ Valeur calculée au chapitre 2

Portance	$2 * 10^{-7}$	4,53	0,01	226 728
Traînée	$4,5 * 10^{-5}$	0,003698	0,15	12,328

La contrainte maximale en flexion causée par la portance est de 227 kPa et celle causée par la traînée est 12,328 Pa. Ces contraintes se situent bien en dessous la contrainte limite en flexion de la styromousse qui est de 30 MPa. Il n'y a donc pas de risque que le profil d'aile se brise ou se déforme lors des expériences.

- Contrainte de cisaillement

Les mêmes approximations que pour la flexion ont été faites pour le cisaillement. La formule pour le cisaillement est :

$$\tau = \frac{V * Q}{I * b}$$

- τ : contrainte (Pa)
- V : effort tranchant maximal (N)
- Q : premier moment de la sous-section d'un côté (m^3)
- I : deuxième moment d'inertie total (m^4)
- b : largeur de la section cisailée (m)

TABLEAU 4.3 : CALCUL DE LA CONTRAINTE DE CISAILLEMENT DANS LE PROFIL D'AILE

Force	V (N)	Q (m^3)	I (m^4)	b (m)	τ (Pa)
Portance	30,23	$1,5 * 10^{-5}$	$2 * 10^{-7}$	0,3	7557,5
Traînée	36,98	$1,125 * 10^{-5}$	$4,5 * 10^{-5}$	0,3	924,5

4.1.2 - Axe de support

- Contrainte de cisaillement

Par action-réaction, la force exercée par les clous sur le profil est aussi exercée sur les clous par le profil. Puisque l'axe est en fait un assemblage de clous, d'une plaque de bois et d'une tige de métal, il faut calculer le cisaillement pour les trois parties et voir si l'une d'entre elles flancherait. Tous les calculs se font avec la réaction dans le sens de la portance puisque c'est la force la plus grande. La contrainte de cisaillement s'exprime par :

$$\tau = \frac{F}{A}$$

- τ : contrainte de cisaillement (Pa)
- F : force exercée par l'aile (N)
- A : aire de la surface du soutien (m^2)

TABLEAU 4.4 : CALCUL DE LA CONTRAINTE DE CISAILLEMENT DANS L'AXE DU SUPPORT

Élément	F (N)	A (m^2)	τ (Pa)
Clou	30,23	$7,0686 * 10^{-6}$	2138369,4
Bois	30,23	0,000986	30659,2
Tige fileté	30,23	$3,167 * 10^{-5}$	954570

Les contraintes maximales sont de 2,138 MPa sur les clous, 30,6 kPa sur le morceau de bois et 954,6 kPa sur la tige fileté. Puisque l'acier utilisé pour les clous n'était pas connu, nous avons utilisé un acier de construction mentionné dans un manuel de résistance des matériaux⁸. Celui-ci possède une contrainte maximale de cisaillement de 65 MPa. Celle de l'aluminium (tige) est 70 MPa et celle du contreplaqué est 1,5 MPa. Il n'y a donc aucun problème du côté du cisaillement puisque toutes les contraintes calculées sont inférieures aux contraintes maximales permises.

- Contrainte en torsion

Pour cette contrainte, il faut changer l'une de nos approximations. Cette fois-ci, on considère que les clous ne forment qu'un seul appui situé à 5 cm à l'avant du centre de portance, celui-ci étant situé hypothétiquement au même endroit que le centre de masse. De plus, étant donné que les clous et la plaque de bois ont une longueur axiale très petite, il a été approximé que la seule torsion significative se trouve dans les tiges filetées. En utilisant qu'un côté du profil d'aile, on exprime :

⁸ Valeur prise dans le manuel :

$$\tau = \frac{T * r}{J}$$

- τ : contrainte de cisaillement (Pa)
- T : moment (Nm)
- r : rayon de la tige (m)
- J : deuxième moment polaire de la tige (m^4)

TABLEAU 4.5 : CALCUL DE LA CONTRAINTE EN TORSION DANS LA TIGE FILETÉ

Élément	T (Nm)	r (m)	J (m^4)	τ (Pa)
Tige fileté	0,9069	0,003175	$1,596 * 10^{-10}$	18086730

La torsion maximale dans une tige filetée est 18,087 MPa. Cela est plus petit que la contrainte de cisaillement mentionné plus haut de 70 MPa, donc la tige peut soutenir cette charge.

Nous devons également considérer le déplacement angulaire, dont la formule est :

$$\theta = \frac{T * L}{G * J}$$

- θ : angle de rotation (°)
- T : moment (Nm)
- L : longueur de la tige (m)
- J : deuxième moment polaire de la tige (m^4)
- G : cisaillement (Pa)

TABLEAU 4.6 : CALCUL DU DÉPLACEMENT ANGULAIRE DE LA TIGE FILETÉ

Élément	T (Nm)	L (m)	J (m^4)	G (Pa)	θ (°)
Tige fileté	0,9069	0,127	$1,596 * 10^{-10}$	$26 * 10^9$	1,727

Une rotation de 1,727° est relativement grande, con sidérant que l'intervalle d'angles utilisables pour les profils est aux alentours de 10-15°. Il faudra que les enseignants en tiennent compte lors des manipulations et qu'ils évitent d'utiliser des angles d'attaque trop rapprochés.

4.2 Conséquences et répercussions

Après calculs, il se trouve que les dimensions préétablies sont suffisantes pour éviter tout bris lors de l'utilisation de la soufflerie à capacité maximale. Bien que, pour certaines pièces, il aurait été possible de réduire la taille de celles-ci et d'avoir la même solidité pour un poids moindre, il a été décidé de garder les pièces actuelles parce que ce sont celles qui ont été jugées plus faciles à utiliser lors de la construction. Par exemple : une tige filetée ayant un diamètre de 1/8" au lieu de 1/4" aurait probablement pu respecter les contraintes limites, mais elle aurait fléchi beaucoup plus et cela aurait faussé les résultats.

Il existe aussi d'autres contraintes qui ont été négligées. La pression sur les parois en est une. Il est vrai qu'il existe une pression dynamique causée par le flux d'air qui crée une contrainte dans la veine d'essai. Cependant, cette pression est très faible, sous la barre de 1 kPa, ce qui veut dire qu'elle ne porte aucun risque pour le plexiglas composant les parois de la zone où est le flux d'air.

Bien que ces choix n'aient pas contribué à la minimisation du poids de la soufflerie, c'est ce qui a été convenu comme étant le plus optimal pour l'ensemble des critères d'évaluation.

4.3 Dessins et dimensions nominales et tolérances

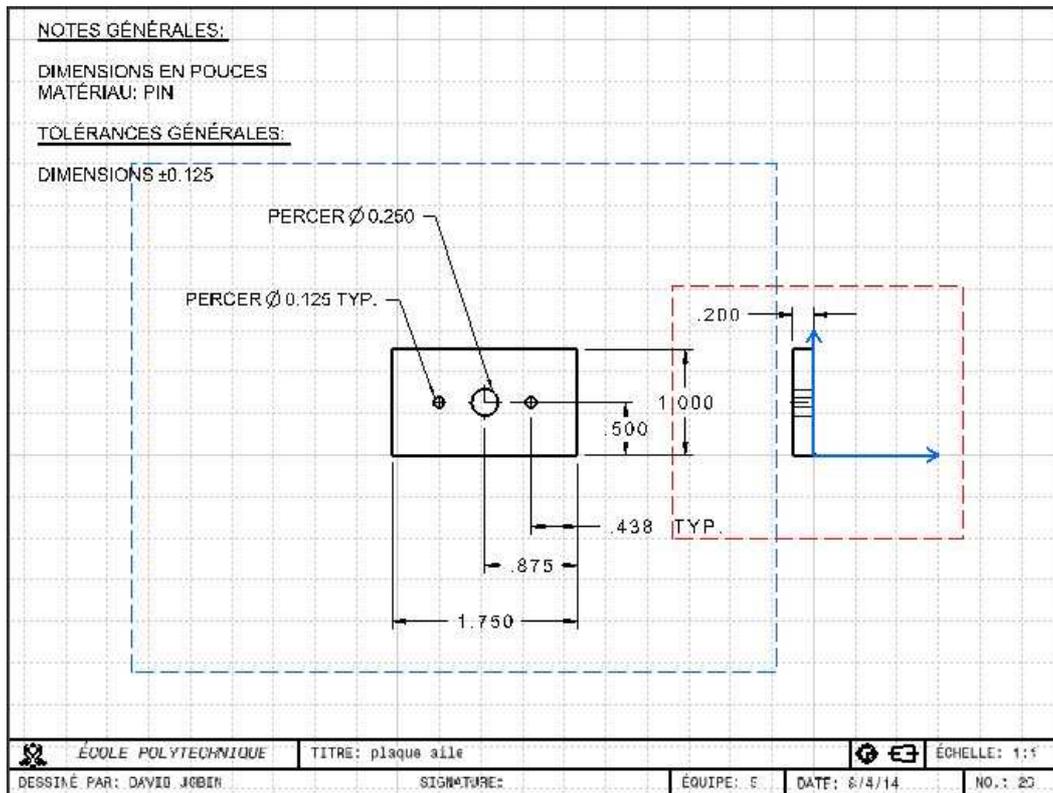


Figure 4.2 : Dessin technique des plaques de fixation de l'aile

Note : Le dessin de la tige filetée se trouve en annexe K.

Chapitre 5 – Réalisation – Système de mesure et composants

5.1 Calculs, choix et justifications

Au chapitre 4, une analyse de résistance des matériaux dans le profil d'aile et dans les fixations ont permis de déterminer si les contraintes maximales étaient respectées. De la même manière, une étude de la résistance des matériaux dans la structure va pouvoir valider notre modèle. C'est à partir de la force de portance maximale de 62,06N que les différentes contraintes exercées dans le bois de la structure ont été obtenues⁹, et ce, dans chacune des pièces du système de mesure.

- Formule de la contrainte pour un chargement uniaxial : $\sigma = \frac{F}{A}$
- Formule de la contrainte de cisaillement : $\tau = \frac{F}{A}$

TABLEAU 5.1 : LISTE DES CONTRAINTES NORMALE ET DE CISAILLEMENT

Pièces	Contraintes normales	Contraintes de cisaillement
1A	77,0*10 ³ kPa	0
1B	3,18*10 ³ kPa	0
2	127,92*10 ³ kpa	0
3	0	146,36*10 ³ kpa
4	127,94*10 ³ kpa	0
5	0	64,11*10 ³ kpa
6	64,11*10 ³ kpa	0
Vis	0	7,758 MPa

Le bois que nous avons utilisé est du EPS (Epinette-Pin-Sapin). Ses contraintes maximales sont les suivantes :

- Élasticité : $\varepsilon = 12\ 000$ Mpa
- Compression : $\sigma = 47$ Mpa
- Cisaillement : $\tau = 10$ Mpa

⁹ Les calculs sont détaillés en annexe O

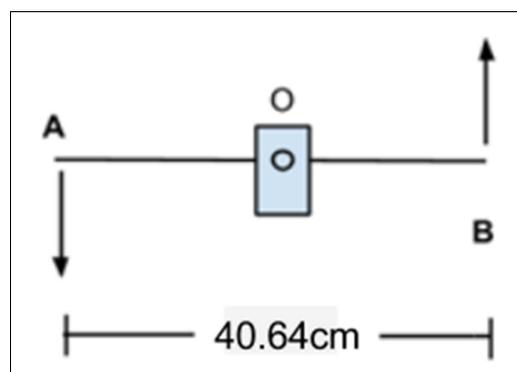
En somme, on remarque qu'aucune contrainte exercée sur le bois ne dépasse sa capacité maximale de résistance ce qui valide le système de mesure.

5.2 Conséquences et répercussions

Pour la réalisation de notre système de portance, on hésitait entre différents matériaux. Notre choix concernant la structure se partageait entre l'aluminium et le bois. L'aluminium est un matériau plus résistant que le bois. Cependant, il est plus dur à travailler et nous n'étions pas certains si les machines de l'atelier étaient adéquates. C'est pour cela qu'on a opté pour le bois. Celui-ci est une meilleure alternative, car il est facilement disponible dans les écoles et rencontre mieux les besoins du client.

Le pivot est une pièce cruciale dans le système. C'est là où la force de la portance est transmise jusqu'à la balance. Il fallait donc minimiser le frottement dans cette zone. Pour cela, nous avons opté pour un système de roulement à bille qui est positionné sur le bras de levier. Ce positionnement permettait d'utiliser un seul roulement à bille plutôt que deux de chaque côté du pivot.

Nous avons décidé de mettre le pivot au centre du levier. En effet, après une étude statique, il a été conclu que si le pivot était au centre, les forces transmises à ses extrémités étaient égales.



A : Force au point A

B : Force au point B

$$\sum M_o = 0 \Rightarrow Ax0.204 + Bx0.204 = 0 \Rightarrow Ax0.30 = Bx0.30 \quad \text{Donc } A = B$$

Pendant la construction, le bois était plus facile à travailler avec les machines de l'atelier comme prévu, mais il a causé quelques ennuis. En effet, lorsqu'on avait des morceaux de bois minces et qu'on plantait un clou, le bois se fissurait. Il a fallu donc utiliser des morceaux de bois plus épais pour contourner ce problème. De plus, nous avons décidé d'utiliser des vis à bois pour être sûrs de n'avoir aucune fissure. Cependant, le bois était très versatile et on pouvait le couper dans toutes les formes nécessaires.

Pendant la construction, on a décidé de mieux solidifier notre structure. Nous avons donc ajouté deux équerres reliant la pièce 3 et 4. En plus des vis, on a ajouté de la colle entre chaque morceau de la structure pour mieux contraindre les degrés de liberté et rendre la structure plus stable.

Nous avons également décidé de joindre nos pièces avec des vis à bois. Cette solution a eu des répercussions directes sur le rangement du système. Effectivement, en utilisant les vis à bois on ne pouvait pas démonter le système à notre guise. À chaque démontage/remontage, les trous des vis se détérioraient. Ce qui rendait le serrage moins efficace à chaque fois.

Le département de structure nous a contraints à 1 pied en hauteur sous la veine d'essai. Ceci nous a obligés à rapetisser notre système comparativement à ce qu'on prévoyait dans l'étude de cas 2.

Pour les dessins techniques, se référer à l'annexe K.

Chapitre 6 – Fabrication et essais

6.1 Sous-ensemble artisanal réalisé et système de mesure

Dans ce chapitre, la construction de chacune des parties composant le système de mesure de portance sera brièvement expliquée, comprenant les éléments suivants :

- Veine d'essai en acrylique
- Les trois profils d'aile
- Le sous-système d'attache des ailes
- Le support en Y et ses composantes
- Le balancier

Tout d'abord, la plaque d'acrylique constituant l'intégralité de la veine d'essai a été construite grâce à un montage permettant de chauffer et de plier le plexiglas à 90 degrés. Cependant, les fentes et les trous pour les poignées ont dû être usinés auparavant à l'aide d'une scie sauteuse et une perceuse¹⁰.

De même, les trois profils d'aile ont été coupés dans de la styromousse à l'aide de différents gabarits. Une fois coupés et sablés, nous les avons recouverts de plastique *MonoKote* dans le but de rendre la surface plus lisse. L'atelier des sociétés techniques a servi de lieu de fabrication pour cette section puisqu'un des membres de la compagnie est impliqué dans la société Avion Cargo¹¹.

Par la suite, les attaches nécessaires à la fixation des ailes ont été conçues à l'aide de tiges filetées, d'écrous, de rondelles, de plaquettes de bois et de clous. Les tiges filetées, en aluminium, ont été coupées et sablées aux extrémités. Les plaquettes de bois ont quant à elles été percées et clouées, respectivement pour y passer la tige filetée et pour encastrer les clous dans l'aile¹².

¹⁰ Voir annexe J

¹¹ *Ibid.*

¹² *Ibid.*

D'autre part, le support en Y comporte trois parties : un support, une partie rotative et une plateforme¹³.

- Le support se compose en tout de 6 tiges de bois qui ont été assemblées par vissage et collage. Des équerres viennent aussi solidifier sa structure. De plus, de légères fentes ont été ajoutées aux branches supérieures placées aux extrémités du Y.
- La partie rotative se fixe au milieu de la longue tige perpendiculaire au Y. Un roulement à bille y a été inséré après avoir procédé à un lamage. De plus, un autre trou dans cette section est nécessaire pour laisser passer un goujon en bois de bord en bord.
- La plateforme, créée par collage de trois étages de bois contreplaqué se fixe à l'extrémité du support pour appuyer sur la balance.

Le balancier est, quant à lui, l'assemblage de quatre pièces par vissage. Des trous y ont été percés à la bonne hauteur dans les plaquettes; le goujon de la partie rotative du support s'y encastre pour permettre la rotation du support¹⁴.

Enfin, il ne faut pas oublier la balance possédant une précision de 0,001kg et qui est le seul instrument de mesure utilisé dans le système. Elle est également l'unique partie du système qui n'a pas été réalisée artisanalement.

¹³ Voir figure E.4 annexe J

¹⁴ Voir figure E.5 annexe J

6.2 Interfaçage avec les autres sous-systèmes



Figure 6.1 : Montage final du support

En premier lieu, les clous et une petite partie de la tige (composante du sous-système d'attache) viennent s'encastrent dans l'aile par les deux côtés de manière à tenir l'aile le plus solidement possible.

En deuxième lieu, les tiges filetées serrées à l'aide d'écrous et de rondelles de l'attache se déposent dans les fentes des deux branches du Y. Ce serrage a pour avantage de donner l'angle d'attaque désiré.

En troisième lieu, les plaquettes de bois composant le balancier peuvent se retirer. Il suffit d'en retirer qu'une seule et on pourra insérer le gougeons de la partie rotative du support en Y dans les trous préalablement percés dans les plaquettes. Les trous sont de la même dimension que le gougeons, donc celui-ci est immobile dans l'assemblage.

En quatrième lieu, le dessus du balancier s'accote sous la table proposé par l'équipe de structure dans un encastrement de manière à empêcher le système de mesure de portance de reculer sous l'effet de la traînée. De plus une plateforme est fixée au bout du support afin de venir s'appuyer fermement sur la balance.

Enfin, le système de mesure de portance assemblé se place sous la table. La veine d'essai se dépose sur la table et les tiges de l'attache à l'aile doivent être alignées avec les fentes de la veine d'essai en acrylique.

6.3 Sensibilité du système de mesure réalisé

Selon le système qui est présenté dans ce rapport, le poids indiqué sur la balance représente une combinaison des forces aérodynamiques (portance et trainée) due à l'écoulement d'air autour du profil. Cependant, il y aura certainement quelques pertes dues à des imprécisions dues à la fabrication artisanale et au roulement à bille.

Par conséquent, la balance ne sera pas sensible à 100% des forces aérodynamiques créées. De plus, pour que la portance n'ait pas à soulever le poids supplémentaire du Y, des masses seront placées sur la plateforme pour qu'elle soit fermement appuyée sur la balance et donc en équilibre pour que les efforts soient immédiatement transmis à la balance lorsque l'aile sera soumise au flux d'air.

Chapitre 7 – Tableau synthèse des pièces et du produit

7.1 Nomenclature et numérotation des pièces

Pièce	No.	Quantité	Coût-matière (\$)		Masse (kg)	Volume (10^{-6} m^3)	Matériau source	
			unit aire	total			Coût (\$)	Volume (10^{-6} m^3)
Pied balance	1	1	0,15	0,15	0.067	134.1	7,73	7070
Bloc vertical arrière	2	1	0,001	0,001	0.023	45.93	7,29	302000
Bras de levier	3	1	0,004	0,004	0.077	154.2	7,29	302000
Bloc vertical avant	4	1	0,001	0,001	0.023	45.93	7,29	302000
Bloc horizontal Y	5	1	0,005	0,005	0.104	207.2	7,29	302000
Bloc vertical Y	6	2	0,004	0,008	0.086	172.0	7,29	302000
Bloc vertical pivot	7	2	0,10	0,20	0.046	91.86	7,73	7070
Bloc roulement	8	1	0,001	0,001	0.022	43.44	7,29	302000
Bloc milieu pivot	9	1	0,002	0,002	0.042	84.42	7,29	302000
Pied pivot	10	1	0,21	0,21	0.098	196.5	7,73	7070
Frein en U	11	1	0,03	0,03	0.012	24.92	7,73	7070
Goupille	12	1	0,02	0,02	9.427 $\times 10^{-4}$	1.885	0,72	57,85
Roulement*	13	1			0.017	2.149		
Tige filetée	14	2	0,74	1,48	0.044	5.631	1,19	16,88
Bouche-fente**	15	2			0.068	56.81		
Veine d'essai	16	1	42,47	42,47	4.126	3400	42,47	3400
Plaque aile	20	2	0,006	0,012	0.003	5.523	7,73	7070
Profil JMB 1210	21	1	1,10	1,10	0.051	3300	24,99	75500
Coût-matière total (\$)				45,69				

* Le roulement utilisé pour le pivot, un ABEC7, a été prélevé d'un patin à roues alignées d'un des membres de l'équipe. Cette pièce n'a donc pas de coût-matière lui étant directement relié.

** Un membre de l'équipe avait déjà le matériel nécessaire en sa possession pour construire les bouche-fentes.

*** Les valeurs de masse et volume sont tirées des fichiers CATPart de chaque pièce.

**** Les valeurs de masse pour le bois sont légèrement faussées, car le matériau source réel, du bois EPS (épinette-pin-sapin) n'a pu être trouvé dans les options CATIA. Le pin a donc été utilisé pour calculer les valeurs de masse.

Note : Les pièces 17,18 et 19, absentes du tableau, sont des pièces ayant été modélisées par l'équipe mais s'étant avérées inutiles puisqu'elles entraient dans le domaine de la structure de la soufflerie. Elles ne sont donc pas traitées dans le rapport.

7.2 Coûts-matière, poids, dimensions et justifications

Un coût par unité de volume a été calculé pour chaque matériau source, puis transposé en un coût-matière pour chaque pièce, à l'aide du calcul suivant :

$$C_{vi} * V_i = C_i$$

Où C_{vi} = coût volumique du matériau source de chaque pièce ($\$/10^{-6} m^3$)

V_i = volume du matériau source de chaque pièce ($10^{-6} m^3$)

C_i = coût-matière de chaque pièce(\$)

Exemple de calcul de coût-matière

Considérons le bloc vertical pivot (pièce 7), ayant un volume de $91,86 \times 10^{-6} m^3$. Cette pièce provient d'une plaque de bois coûtant 7,73 l'unité et faisant 4 pieds par 3 pieds par 0,25 pouces d'épaisseur.

$$C_{vi} * V_i = C_i$$

$$\begin{aligned} C_{v7} &= \frac{C_{\text{matériau source 7}}}{V_{\text{matériau source 7}}} = \frac{7,73}{(4 * 12)(3 * 12) * 0,25} = \frac{7,73}{432} \\ &= \frac{0,018\$}{po^3} * \frac{1 po^3}{1,64 \times 10^{-5} m^3} = \frac{0,011\$}{10^{-5} m^3} = 0,0011 \frac{\$}{10^{-6} m^3} \end{aligned}$$

$$C_7 = 91,86 \times 10^6 m^3 * 0,0011 \frac{\$}{10^{-6} m^3} = 0,01\$$$

Justification des tolérances sur les dimensions des pièces

Les dimensions telles que la hauteur, la largeur et la profondeur des faces des pièces, toutes illustrées dans l'annexe H, ont été mesurées à la règle. La tolérance est donc déterminée par la moitié de la plus petite mesure, c'est-à-dire un huitième de pouce (0,125 pouces), comme il l'est inscrit dans la boîte de tolérances des dessins techniques.

Les diamètres des trous percés et lamés sont tous précis au millième de pouce. Voici les incertitudes de mesure associées aux valeurs présentes sur les dessins techniques (dimensions en pouces).

Perçage :

- +0,004 / -0,001 pour les diamètres de 0,125 et 0,250
- +0,006 / -0,001 pour les diamètres de 0,3125 et 0,500

Lamage

- $\pm 0,001$ pour les diamètres de 0,875

Protocole expérimental

- **Étape 1** : Placer le support enY en dessous de la table conçue par l'équipe de structure. S'assurer que le balancier s'insère dans l'encastrement prévu à cet effet.

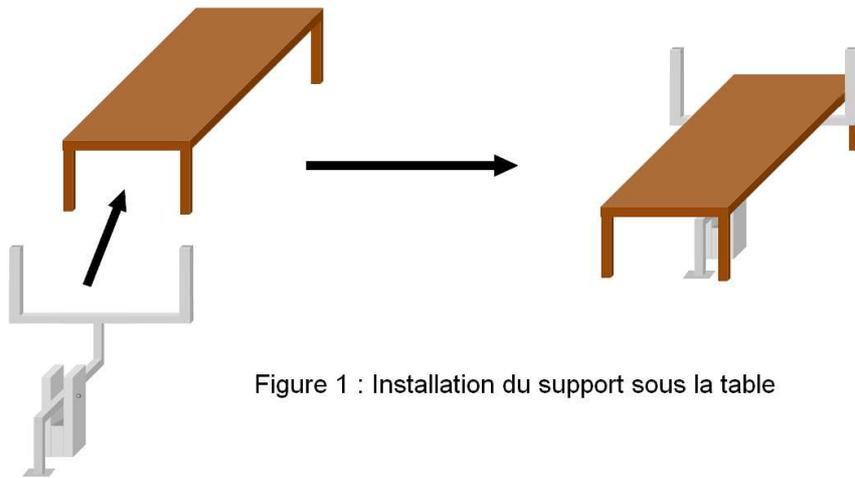


Figure 1 : Installation du support sous la table

- **Étape 2** : Insérer l'aile dans les fentes en U du support. Visser les écrous de chaque côté, et s'assurer que l'aile soit immobile en suivant l'angle d'attaque désiré approximatif (l'angle d'attaque sera fixé à l'étape 4).



Figure 2 : Fixation de l'aile sur le support

- **Étape 3** : Placer la veine d'essai sur la table. La tige filetée supportant l'aile s'insère dans les fentes prévues à cet effet.
- **Étape 4** : Déposer la balance sous le support et s'assurer que celle-ci est bien initialisée à zéro (sinon appuyer sur TAR).

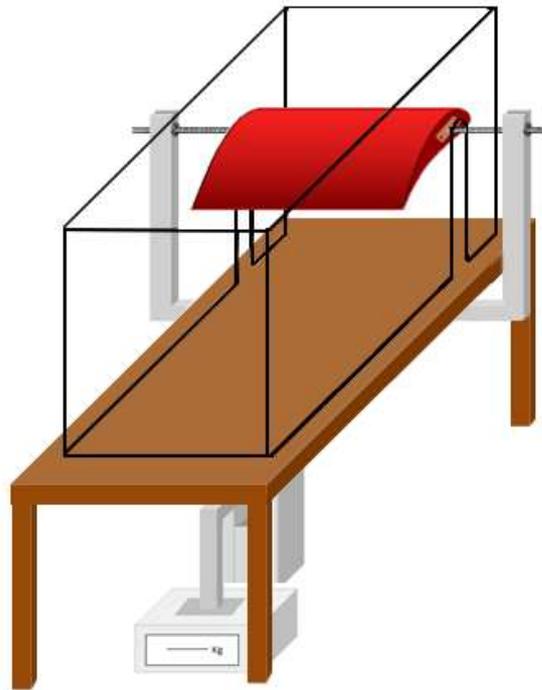


Figure 3 : installation de la veine d'essai et de la balance

- **Étape 5** : Ajuster de manière précise, l'angle d'attaque de l'aile en se référant au rapporteur d'angle placé sur la veine d'essai puis en serrant les écrous de chaque côté.

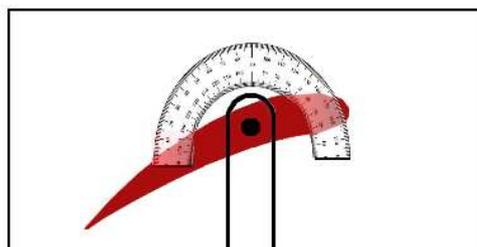


Figure 4 : Ajustement de l'angle d'attaque

Tableaux des résultats

Tableau 1 : Portance générée par le profil JMB1210

		Premier réglage de vitesse		Deuxième réglage de vitesse	
Angle d'attaque (°)	Mesure	Portance (g)	Vitesse du flux d'air (m/s)	Portance (g)	Vitesse du flux d'air (m/s)
12	Mesuré	1050	20	1020	15
12	Déclaré	740	20	500	15
12	Écart (%)	41,9	0	104	0
6	Mesuré	644	20	583	15
6	Déclaré	750	20	650	15
6	Écart (%)	-14,1	0	-10,3	0

Tableau 2 : poids de la soufflerie

Mesure	Poids (kg)
Mesuré	18,2
Déclaré	18,1
Écart (%)	0,552

Tableau 3 : Centre de masse de la soufflerie

Selon l'axe	Centre de gravité (mm)		Écart (%)
	Déclaré	Mesuré	
x	615	535	-13,0
y	106	95	-10,4
z	169	180	6,51

Calcul de l'écart

L'écart a été calculé en soustrayant la valeur déclarée de la valeur mesurée. Le terme résultant est ensuite divisé par la valeur déclarée, avant de multiplier le tout par 100%. De cette façon, un pourcentage positif indique un résultat supérieur aux attentes alors qu'une valeur négative montre que le résultat est inférieur à ce qui avait été prévu.

Exemple de calcul d'écart

On cherche ici l'écart, en pourcentage, de la portance mesurée à 12° et 20 m/s.

$E = \text{Écart}$; $M = \text{Valeur mesurée}$; $D = \text{valeur déclarée}$

$$E = \frac{M - D}{D} * 100\%$$

$$E = \frac{1050 - 740}{740} * 100\%$$

$$E \approx 41,9 \%$$

Écart entre valeur calculée et mesure obtenue

Si nous considérons une vitesse du flux d'air de 20,6 m/s, nous obtenons un nombre de Reynolds d'environ 430 000, et non 520 000 comme il aurait été le cas avec un flux de 25 m/s. Aussi, la vitesse passe de 0,06 mach, au lieu de 0,07.

Dans ces conditions, on obtient:

Tableau 4 : Mesures de portance et de traînée à 20,6 m/s					
Angle d'attaque	Coefficient de portance (C _L)	Coefficient de traînée (C _D)	Finesse	Portance	Traînée
°	-	-	-	N	N
6	1,8537	0,01656	111,91	54,41	0,49
12	1,9515	0,05841	33,41	57,28	1,71

Pour les mêmes angles, nous avons également testé avec une vitesse de 15 m/s, soit 0,045 mach, et le nombre de Reynolds devient 310 000:

Tableau 5 : Mesures de portance et de traînée à 15 m/s					
Angle d'attaque	Coefficient de portance (C _L)	Coefficient de traînée (C _D)	Finesse	Portance	Traînée
°	-	-	-	N	N
6	1,8498	0,01769	104,56	54,29	0,52
12	1,8963	0,07659	24,76	55,66	2,25

Équation de portance:

RAPPORT DE LA FORCE:

Considérant que le moment de la traînée apparaît également sur la balance lorsqu'on note la masse, on utilise l'équation suivante afin de calculer le rapport des forces. Le pivot est situé au milieu de la structure, nous n'avons donc pas à considérer les distances du moment de force.

$$R = \frac{L}{L + D} = \frac{0,5L}{0,5L + 1,5D}$$

Par ailleurs, on considère que la portance expérimentale devrait être inférieure d'environ 40% et la traînée supérieure elle-aussi de 40%.

On obtient donc:

Tableau 6 : Mesures de portance et de traînée avec la modification de 40%					
Angle d'attaque	Vitesse	Portance	Traînée	Rapport théorique	Rapport expérimental
°	m/s	N	N	-	-
6	15	54,41	0,49	0,9911	0,97
12	15	57,28	1,71	0,9710	0,92
6	20	54,29	0,52	0,9905	0,97
12	20	55,66	2,25	0,9611	0,89

FORCE DE LA MASSE:

$$F = \frac{9,81m/s^2 (m)}{1000g/kg} = 0,00981 (m) N/g$$

Il faut noter que la masse m entrée, tel que lu sur la balance, est en grammes.

PORTANCE AVEC LE RAPPORT:

$$L = R \times F(m) = k(m)$$

- où : L: Portance (N)
 R: Rapport expérimental
 F: Force en fonction de la masse (N/g)
 k: Coefficient associé au rapport et à la force (N/g)

MASSE PAR RAPPORT A LA PORTANCE:

À l'opposé, la masse affichée sur la balance en fonction de la portance calculée peut se trouver grâce à:

$$m = \frac{L}{k} = \frac{L}{R \times F}$$

ÉCARTS:

Tableau 7 : Masses affichées sur la balance après modifications					
Angle d'attaque	Vitesse	Rapport expérimental	k	Portance (L)	Masse calculée
°	m/s	-	N/g	N	g
6	15	0,97	0,00952	54,41	2859
12	15	0,91	0,00893	57,28	3208
6	20	0,97	0,00952	54,29	2853
12	20	0,88	0,00863	55,66	3224

On compare les valeurs mesurées avec celles calculées. Toutefois, lors de l'expérimentation, nous avons une idée approximative de ce que le profil pouvait générer comme portance, ce qui assez éloigné des valeurs calculées. On considère donc que la portance transmise à la balance est donc diminuée de plus de 50% par le support en Y.

Tableau 8 : Écart entre les valeurs mesurées et calculées						
Angle d'attaque	Vitesse	Masse calculée (mc)	Masse approximée (ma)	Masse mesurée (mm)	Écart (mc et mm)	Écart (ma et mm)
°	m/s	g	g	g		
6	15	2859	650	583,00	2276	67
12	15	3208	500	1020,00	2188	520
6	20	2853	750	694,00	2159	56
12	20	3224	740	1050,00	2174	310

Analyse des résultats

Les sources d'incertitude qui ont causé des écarts aussi grands entre la valeur théorique et la valeur observée de portance sont nombreuses. Notre soufflerie était artisanale et comportait plusieurs défauts de fabrication.

Premièrement, notre support en Y était une pièce qui comportait plusieurs défauts. D'abord, le support n'était pas parfaitement symétrique et, lors de la découpe des pièces en bois, il a été difficile de suivre les lignes de coupe. En effet, dans l'atelier, la scie à ruban n'était pas facile à manipuler puisqu'il n'y avait pas de garde pour nous guider lorsqu'on découpait les pièces. Par conséquent, la majorité des pièces coupées n'étaient pas droites et avaient des surfaces de contact qui n'étaient pas planes. De plus, plusieurs morceaux de bois ont été sablés dans le but d'éliminer les arêtes. Il y avait donc des pièces plus arrondies ou plus minces que d'autres. Il était alors difficile de les assembler puisque la surface de contact entre deux pièces était souvent très petite et qu'il était difficile de juger si les morceaux étaient bien perpendiculaire les uns aux autres lors du vissage. Tous ces petits défauts réunis ensemble ont conduit à créer un jeu entre les pièces qui affectaient les mesures. Ce jeu entre les pièces avait aussi pour effet de rendre la structure instable. Lors des essais, les différentes pièces du support semblaient bouger les unes par rapport aux autres.

En plus d'être imparfait dans sa construction, le support en Y a été une source d'incertitude simplement par le fait qu'il était mobile. Dans le but de rendre la soufflerie plus simple à assembler, le support en Y a été conçu pour être séparé de la structure. Cela a malheureusement engendré plusieurs problèmes. Tout d'abord, puisque le support n'était pas fixe, la base du pivot avait tendance à se déplacer légèrement lors des essais. Cela brisait l'équilibre des moments qui permettait de mesurer la portance avec une certaine précision. De plus, lors des tests à vitesse de vent maximale, le pivot a quitté le sol quelques fois. Cela a une grande influence sur la mesure de portance puisqu'il y a alors une force en Y dirigée vers le haut qui s'exerce au milieu du bras de levier et qu'il n'y a donc plus de transmission de force complète qui se fait du profil à la balance.

Ensuite, la précision de l'angle d'attaque était approximative. En effet, la ligne définissant l'angle de 0° a été tracée à la main et, lorsqu'on a essayé de mettre cette ligne en parallèle avec celle de la corde de l'aile, il était difficile d'être précis. On a

essayé de changer les angles d'attaques entre 0 et 15 degrés. Il était presque impossible de correspondre la corde à l'angle exact qu'on voulait. On avait toujours une différence de quelques dixièmes au minimum. La précision à l'œil nu est questionnable. Cette imprécision rendait la prédiction de la portance assez difficile.

Un autre problème associé au profil d'aile est l'effet de sol. De façon générale, l'effet de sol a une influence positive sur la portance. En effet, lorsqu'une aile est très près du sol, les vortex se formant en bout d'aile sont interrompus, ce qui entraîne une réduction de la traînée induite et une augmentation de la portance. Cependant, dans le cas présent, ce phénomène a un impact négatif sur la mesure de portance. Puisque l'arrière du profil est la partie la plus proche du sol, c'est aussi la partie qui subit la plus grande augmentation de portance liée à l'effet de sol. La styromousse étant relativement peu rigide, cela a pour effet de créer une flexion dans l'aile et de modifier le profil d'aile en le rendant beaucoup plus plat. Puisque l'aile n'est pas attachée sur toute sa corde, cette flexion ne rencontre aucune résistance. Cette déformation modifie radicalement les propriétés aérodynamiques du profil et réduit de beaucoup la portance produite par l'aile. Puisque la déformation était dans le domaine élastique de la styromousse, le profil d'aile revenait à sa forme initiale après l'essai, il était donc impossible de déterminer quel était son impact sur les résultats. De plus, la déformation était plus grande lorsque la vitesse était augmentée, ce qui veut dire que le profil testé n'était pas le même à différentes vitesses. Cela pourrait expliquer les deux portances similaires à vitesses différentes qui ont été mesurées.

D'autre part, la veine d'essai n'était pas parfaitement étanche. En effet, entre la veine d'essai et la tuyère il y avait toujours un petit espace qui rendait le flux d'air très turbulent. Malgré le travail du redresseur d'air, le flux d'air n'était pas complètement laminaire, ce qui a fait baisser la portance de l'aile. De plus, lors de certains essais, les morceaux de plastique couvrant les fentes de la veine d'essai sont tombés au milieu de la prise de mesure, ce qui a créé une grande turbulence juste au-dessous de l'aile. Une partie du flux d'air produit par le moteur s'est échappée par ces fentes et n'a pas contribué à créer de la portance sur la partie arrière de l'aile.

En conclusion, plusieurs facteurs d'incertitude sont venus modifier les données et enlever de la précision aux mesures. Étant donné le niveau de

connaissances limité d'étudiants de première année, la soufflerie n'a pas fait l'objet d'analyses complètes, que ce soit pour la mécanique des fluides ou la résistance des matériaux. Ainsi, il est difficile de donner autre chose qu'une évaluation qualitative de certains phénomènes indésirables rencontrés lors des essais. Avec plus d'expérience, il serait possible de mieux comprendre les défauts de la soufflerie et de prédire avec plus de précision les résultats qu'elle devrait fournir.

Conclusion

Dans cette troisième et dernière étude de cas du cours de projet initial en génie aérospatial, des équipes ont été réunies sous forme de compagnie, de manière à intégrer trois concepts en un produit final fonctionnel. Les équipes s'occupent respectivement de :

- La conception et la réalisation de la veine d'essai et du système de mesure de portance
- La conception et la réalisation du flux d'air et de sa caractérisation
- La conception et la réalisation de la structure, la mesure du poids, de la position du centre de masse et de la gamme de fabrication.

L'organisation et la coordination de toutes les opérations pour atteindre l'objectif aura été un défi de taille pour la compagnie. La mise en commun des travaux réalisés a donc nécessité plusieurs ajustements des concepts primaires. Dans le cas de la veine d'essai par exemple, des fentes latérales ont été nécessaires afin d'optimiser le temps de mise en place de la soufflerie.

Par ailleurs, le système de mesure de portance quant à lui, n'est pas amovible pour pouvoir être plus solide lors des essais. C'est pourquoi le support en Y possède un assemblage constitué majoritairement de vis à bois, de colle et de raidisseurs. Nous avons jugé inutile son démontage dans la mesure où celui-ci n'est pas excessivement encombrant.

À ce jour, la compagnie a pu constituer l'assemblage final avec succès mais n'a pu malheureusement effectuer des tests rigoureux. Les expériences prévues à cet effet auront lieu le mardi 8 avril 2014 et chaque équipe pourra apprécier la concordance de son étude théorique avec les résultats expérimentaux ou alors comprendre leur différence. Les trois souffleries réalisées en classe s'affronteront dans un concours qui identifiera celles réalisant les meilleures statistiques de portance, de vitesse du flux et de poids.

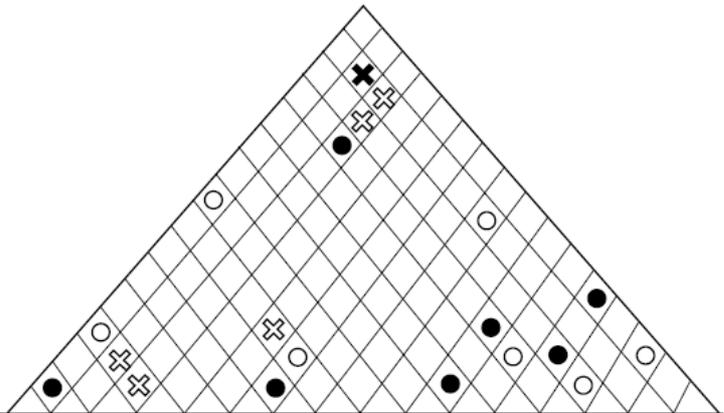
Références

- Aubin, Carl-Éric et al. (2012). CATIA V5 Modélisation de systèmes mécaniques (pp. 61, 79). Montréal : Presses internationales Polytechnique.
- Cincou, André. (2011). Guide des normes et conventions de représentation graphique (pp. 30-32, 36, 41). Montréal : Presses internationales Polytechnique.
- Dow.com. Styrofoam Panel Core 20. Consulté le 4 avril 2014.
Tiré de : <http://www.dow.com/webapps/lit/litorder.asp?filepath=styrofoam/pdfs/noreg/179-08123.pdf&fromPage=GetDoc>
- Engineers Edge. (2014). Hole Diameter Tolerance-Standard Drilled Holes Tolerances.
Tiré de : <http://www.engineersedge.com/manufacturing/drill-mechanical-tolerances.htm>
- GOUGNOT, R. (2002). Le nombre de Reynolds.
Tiré de : <http://aerodynamique.chez.com/word/reynolds.pdf>
- HEINTZ, Chris (Juin 1987). Airfoils (Part 1-4). EAA Light Plane World.
Tiré de : <http://www.zenithair.com/kit-data/ht-87-6.html>
- KHALAF, Dori, Patrick HANNA et Jad EL-HAROUNI (2012). En quoi le profil de l'aile d'un avion et son angle d'attaque influencent-ils la portance de l'avion?
Tiré de : http://www.udppc.asso.fr/rennes/IMG/pdf/Dossier-Olympiades_-_groupe10.pdf
- MALLEN-JUNEAU, Chantal. Statique et Résistance des matériaux. Éditions Saint-Martin, 2011.
- MIGLIORE, Paul et Stefan Oerlemans (2004). Wind Tunnel Aeroacoustic Tests of Six Airfoils for Use on Small Wind Turbines. Présenté à l'AIAA Wind Energy Symposium. [PDF]
- SELIG, Michael S. et James J. Guglielmo (1997). High-Lift Low Reynolds Number Airfoil Design. Journal of Aircraft. Vol. 34, No. 1. [PDF]
- TEMco Industrial Power (2012). DIY: Nichrome Wire Acrylic Bending Table Tutorial. Consulté le 28 mars 2014.
Tiré de : <https://www.youtube.com/watch?v=wVEf7PfuKxo>
- VIAU, Jean-François (2013). Chapitre 2: Aérodynamique. Notes de cours
- Zerelli Technologies Inc. (2014). Bole Tolerance Charts.
Tiré de : <http://www.zerelli.com/uploads/pagesfiles/33.pdf>

Annexes

Annexe A – Maison de la qualité 1

△ Faible ○ Moyen ● Fort
 ● Très positif ○ Positif ⊗ Négatif ✕ Très négatif



Critères D'ingénierie (Comment)		Note Sur 10	Performance				Ergonomie				Utilisation				Construction			
			Générer un écoulement laminaire	Contraindre le mouvement de l'objet	Supporter l'installation de sondes de mesure	Varié le flux d'air	Résister aux chocs	Permettre une prise facile	S'ajuster à un volume maximal	Minimiser la masse	Voir la zone utilisable	Démarrer rapidement	Ne pas blesser l'utilisateur	Minimiser l'entretien	Fonctionner à l'électricité	Restreindre les coûts	Fournir une zone utilisable de 30x30x60	Utiliser des matériaux facilement accessibles
Performance	Limiter les irrégularités dans le fluide	6	●	○		○												
	Maintenir l'objet dans la zone utilisable	6	○	●		△										○		
	Mesurer des données	3	○	○	●	○									△			
	Varié les conditions	2	●	△		●												
Ergonomie	Être robuste	7					●	△	○	○								
	Faciliter le transport	10						●	●	○		○				△		
	Assurer la légèreté	8						△		●						△		
	Permettre l'observation de l'objet	10		△						●						○		
Utilisation	Simplifier d'utilisation	7			○			○			●	○		○				
	Sécuriser l'utilisation	8						○		○		●		○				
	Requérir peu d'entretien	6										●	○	●			△	
	Être éco énergétique	2									△	○	●					
Construction	Avoir un prix abordable	7			○						△		△	△	●		●	
	Posséder une zone utilisable adéquate	4	△	○	△					△						●		
Cible			constant	Déplacement max de 2cm	Utiliser une sonde	3 Vitesse max	Chute de 50 cm max	Volume max 500 L	15 kg	Transportable par 1 personne	3 points de vue	Démarrer en une étape	Aucune pièce franchante	Une fois par an	120 V	1000\$	30x30x60 cm	Accessibles en quinzaine

ANNEXE B – MAISON DE LA QUALITÉ 2

Maison de la qualité 2

Légende du toit de la maison

✓ ++ × -
 ✓ + × --

Requis du produit		Importance relative (/5)					
			Stabiliser l'objet	Supporter des appareils de mesure	Empêcher toutes les pièces de se détacher	Inclure des pièces amovibles	Limiter l'obstruction visuelle de l'objet
Performance	Maintien de l'objet dans la zone utilisable	4	●	◇	◇	△	△
	Prise des mesures	5	◇	●			△
Utilisation	Sécuritaire	3	△		●		
	Utilisation multiple	2			◇	●	
	Visibilité	4		◇	◇		●
Cible			Translation horizontale maximale de 2 cm	Précision de ± 5N sur la portance	Résistance au vent maximale de la soufflerie ¹	Trois pièces amovibles	75% de l'objet visible
Poids relatif(%)			22,8	22,4	15,6	12,7	26,6
Histogramme							

Annexe C – Matrice morphologique

MATRICE MORPHOLOGIQUE POUR LA FIXATION DE L'AILE

	FONCTIONS	SOLUTIONS				
Système de mesure de portance (support en Y et dispositif levier/pivot)	Permettre la rotation autour d'un pivot	Accotement sur balancier	Rotule	Roulement à bille	Pivot glissant	Joint universel
	Supprimer les degrés de liberté	Vis	Colle	Clous	Équerres	Blocage mécanique
	Transmettre parfaitement la portance	Trous dans support	Encastrement	Par serrage (tige filetée et boulons)	Par serrage (étai)	Pinces
Veine d'essai	Permettre l'insertion du profil d'aile	Fentes sur le côté	Porte à charnière	Toit rétractable		
	Être stable sur la soufflerie	Rainures	Surplus de poids (lest)	Cadre externe (bois)	Cadre interne (métallique)	
	Réduire les turbulences du flux d'air	Caoutchouc	Pancartes électroales	Feutre	Ruban adhésif	
Profil d'aile (incluant le dispositif qui le relie au support en Y)	Maintenir l'angle d'attaque lors de l'utilisation	Tige plate traversant l'aile	Tige carrée traversant l'aile	Tige en U traversant l'aile	2 tiges plates s'encastrent dans l'aile	2 clous plantés dans chaque côté
	Permettre de varier l'angle d'attaque entre deux essais	Fentes inclinées dans le support	Tige encastrée dans roue	Plaquette de bois pouvant tourner	Tige filetée serrée par boulons	

Configuration 1

Configuration 2

Configuration 3

Annexe D – Matrice de Pugh

MATRICE DE PUGH POUR DÉTERMINER LA FIXATION DE L'AILE

Critères de sélection	Poids relatif	Configuration 1	Configuration 2	Configuration 3
Coût	9	S	S	-
Maintien de l'angle d'attaque	9	S	+	+
Insertion du profil d'aile dans la zone utilisable	9	S	+	-
Visibilité	9	S	S	S
Précision des mesures	8	S	+	+
Temps de construction	8	S	+	-
Complexité d'opération	8	S	S	+
Difficulté de construction	6	S	+	-
Sécurité	6	S	S	S
Poids	5	S	-	-
Entretien	5	S	S	S
Matériau	4	S	S	S
Versatilité	4	S	+	+
Esthétisme	2	S	+	-
Originalité	1	S	S	S
Somme des +			7	4
Somme des -			1	6
Somme des S			7	5
Total		0		

Annexe E – Données des profils d'aile

TABLEAU E.1 : PROFIL JMB1210 – $Re = 500,0$ – $Ma = 0,07 = 25$ m/s

Angle d'attaque °	Coefficient de portance (C_L) -	Coefficient de traînée (C_D) -	Finesse -	Portance N
0	1,4568	0,01091	133,50	42,76
5	1,8997	0,01473	128,94	55,76
7	2,0543	0,01782	115,26	60,29
8	2,0931	0,02073	100,98	61,43
9	2,1146	0,02527	83,9	62,06
10	2,0926	0,03445	60,75	61,41
12	1,8747	0,08097	23,15	55,02
15	1,8345	1,2795	14,34	53,84

TABLEAU E.2 : PROFIL EPPLER E61 – $Re = 500,0$ – $Ma = 0,07 = 25$ m/s

Angle d'attaque °	Coefficient de portance (C_L) -	Coefficient de traînée (C_D) -	Finesse -	Portance N
0	0,9193	0,00825	111,38	26,98
2	1,1552	0,00684	168,84	33,91
2,5	1,2093	0,00711	170,03	35,49
3	1,2603	0,00743	169,68	36,99
5	1,3477	0,01709	78,84	39,55
8	1,6072	0,04283	37,52	47,17
9	1,5929	0,05152	30,92	46,75
10	1,5644	0,06252	25,02	45,92
11	1,4997	0,07866	19,07	44,02
12	1,4196	0,09883	14,36	41,67

TABLEAU E.3 : GOTTINGEN 464 – $Re = 500,0$ – $Ma = 0,07 = 25 \text{ m/s}$

Angle d'attaque °	Coefficient de portance (C_L) -	Coefficient de traînée (C_D) -	Finesse -	Portance N
0	0,9161	0,01426	64,26	26,88
5	1,3929	0,01590	87,58	40,88
7	1,5828	0,01510	104,79	46,45
10	1,6557	0,02211	74,89	48,59
12	1,6730	0,03193	52,39	49,10
13	1,6453	0,04223	38,96	48,29
15	1,5620	0,07475	20,90	45,84

Annexe F – Calculs de résistance des matériaux des sous-systèmes

Pour tous les calculs suivants, nous avons émis les hypothèses suivantes :

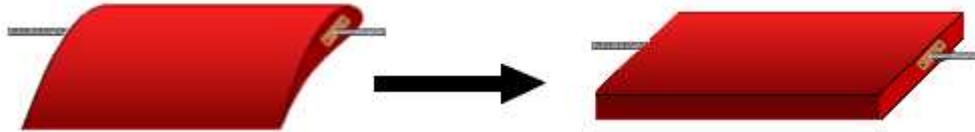


Figure F.1 : Approximation de l'aile en plaque rectangulaire

- Le profil d'aile a été considéré comme une plaque rectangulaire de 30x26x2 cm
- La portance et la masse ont été considérées homogènes sur le profil
- Le recouvrement en plastique de l'aile, étant très mince, a été négligé.
- les clous ont été considérés comme un seul appui réparti sur toute la surface de côté de l'aile.
- L'angle d'attaque, relativement petit, a été négligé.

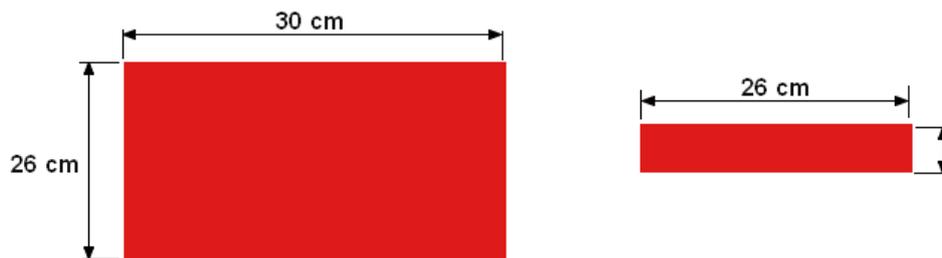


Figure F.2 : Dimensions de l'aile vue de dessus et de profil droit

- **Portance F – contrainte de flexion**

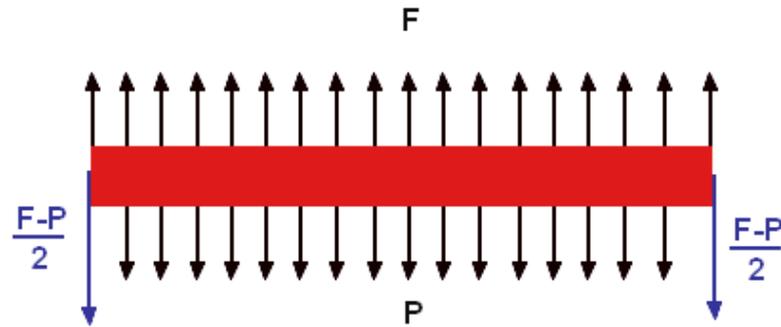
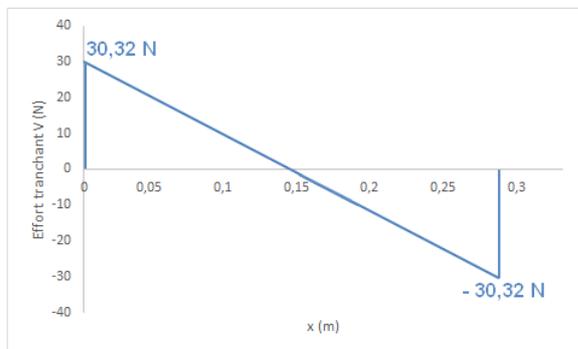


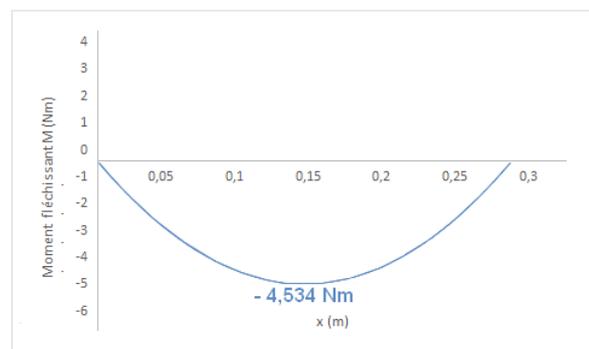
Figure F.3 : Forces agissant sur l'aile vue de face

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{0,3 \cdot 0,02^3}{12} = 2,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}^4$$

$$F = 60,64 \text{ N et } P = m \cdot g = 0,163 \cdot 9,81 = 1,599 \text{ N} \rightarrow V = \frac{F-P}{2} = 30,32 \text{ N}$$



Graphe F.1 : effort tranchant pour la portance



Graphe F.2 : moment fléchissant pour la portance

$$M_{\max} = 4,534 \text{ Nm et } y_{\max} = 0,15 \text{ m}$$

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I} = \frac{4,534 \cdot 0,15}{2 \cdot 10^{-7}} = 226\,728,638 \text{ Pa}$$

- **Portance F - Contrainte de cisaillement**

$$Q = y \cdot A = 0,005 \cdot 0,01 \cdot 0,3 = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$\tau = \frac{V \cdot Q}{I \cdot b} = \frac{30,32 \cdot 1,5 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 10^{-7} \cdot 0,3} = 7557,5 \text{ Pa}$$

- **Traînée T – Contrainte de flexion**

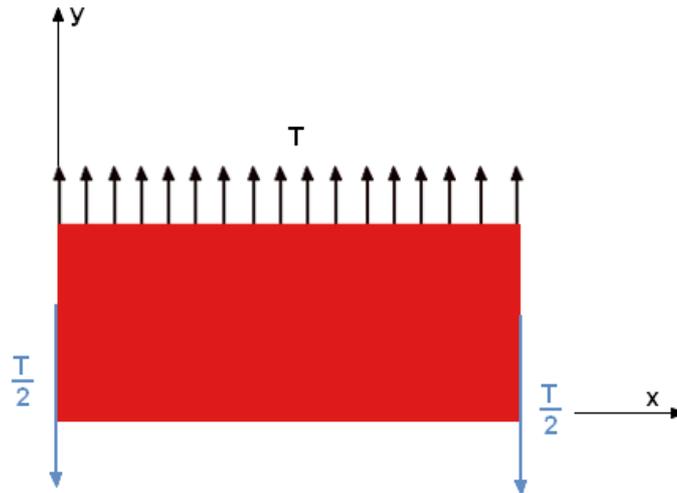
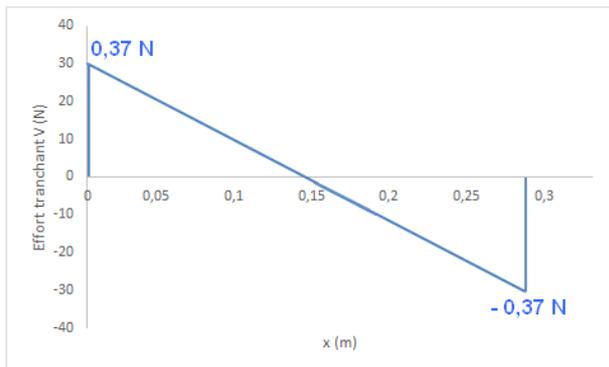


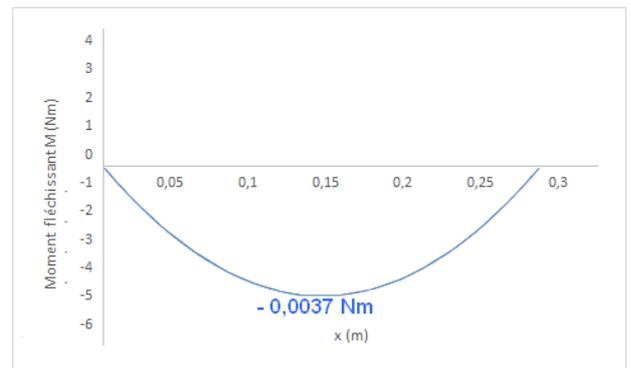
Figure F.4 : Forces agissant sur l'aile vue de dessus

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{0,02 \cdot 0,3^3}{12} = 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

$$T = \frac{F}{\text{ finesse}} = \frac{63,06}{83,9} = 0,73459 \text{ N} \text{ et } V = \frac{T}{2} = 0,3673 \text{ N}$$



Graphe F.3 : effort tranchant pour la traînée



Graphe F.4 : moment fléchissant pour la traînée

$$M_{\max} = 0,0037 \text{ Nm} \text{ et } y_{\max} = 0,15 \text{ m}$$

$$\sigma = \frac{M \cdot y}{I} = \frac{0,0037 \cdot 0,15}{4,5 \cdot 10^{-5}} = 12,328 \text{ Pa}$$

- **Traînée T - Contrainte de cisaillement**

$$Q = y \cdot A = 0,15 \cdot 0,3 \cdot 0,025 = 2,25 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\tau = \frac{V \cdot Q}{I \cdot b} = \frac{0,37 \cdot 2,25 \cdot 10^{-3}}{4,5 \cdot 10^{-5} \cdot 0,02} = 924,5 \text{ Pa}$$



Figure F.5 : Système de fixation de l'aile

- **Contrainte de cisaillement dans les clous**

$$A = \pi r^2 = \frac{\pi * 0,003^2}{4} = 7,069 * 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{30,23}{7,069 * 10^{-6}} = 4\,276\,418 \text{ Pa}$$

- **Contrainte de cisaillement dans la plaquette de bois**

$$A = b * h = 0,0444 * 0,0222 = 0,00486 \text{ m}^2$$

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{30,23}{0,00486} = 30\,659,2 \text{ Pa}$$

- **Contrainte de cisaillement dans la tige filetée**

$$A = \pi r^2 = \frac{\pi * 0,00635^2}{4} = 3,167 * 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{30,23}{3,167 * 10^{-5}} = 954\,554 \text{ Pa}$$

- **Contrainte de torsion dans la tige filetée**

$$J_0 = \frac{\pi d^4}{32} = \frac{\pi * 0,00635^4}{32} = 1,592 * 10^{-10} \text{ m}^4$$

On suppose que l'axe est ancré en un point dans le profil situé à 3 cm du centre de masse et de portance.

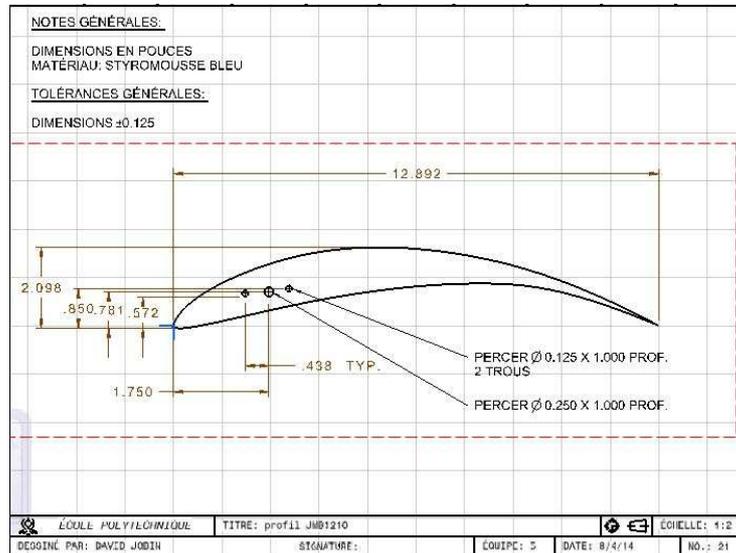
$$T = F * d = 30,23 * 0,03 = 0,9069 \text{ Nm}$$

$$\tau = \frac{T * r}{J_0} = \frac{0,9069 * 0,003125}{1,592 * 10^{-10}} = 18086730 \text{ Pa}$$

$$\theta = \frac{T * L}{G * J} = \frac{0,9069 * 0,127}{24 * 10^9 * 1,592 * 10^{-10}} * \frac{180}{\pi} = 1,727^\circ$$

Annexe G – Fiche technique du profil d'aile JBM1210

DESSIN TECHNIQUE DU PROFIL SUR CATIA



CONTRAINTES LIMITE DANS LE MATÉRIAU

Styromousse isolante bleue¹⁵

Contrainte limite en flexion : $\sigma = 448 \text{ kPa}$

Contrainte limite de cisaillement : $\tau = 241 \text{ kPa}$

Module d'élasticité : $\varepsilon = 11,1 \text{ MPa}$

DIMENSIONS DE L'AILE

approximation faite pour les calculs

Longueur : $L = 30 \text{ cm}$

Largeur : $l = 26 \text{ cm}$

Épaisseur : $e = 2 \text{ cm}$

Surface : $S = 780 \text{ cm}^2$

CALCULS

$$\text{Flexion : } \sigma = \frac{M \cdot y}{I} = 227 \text{ kPa}$$

$$\text{CISAILLEMENT : } \tau = \frac{V \cdot Q}{I \cdot B} = 7,56 \text{ kPa}$$

INTERPRÉTATION ET VALIDATION

$$\sigma = 227 \text{ kPa} < 448$$

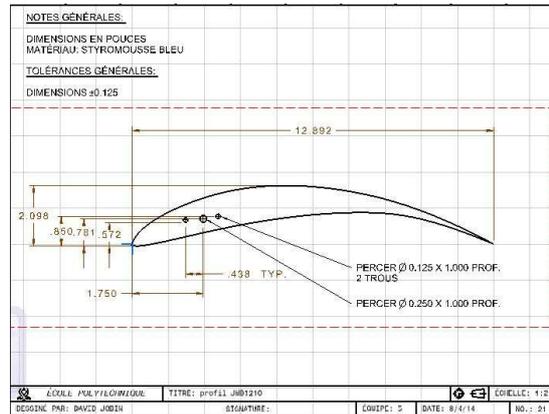
$$\tau = 7,56 \text{ kPa} < 241 \text{ kPa}$$

D'après les résultats précédents, on constate que les contraintes en flexion et en cisaillement dans le profil d'aile JMB1210 ne dépasse jamais les contraintes maximales autorisées ce qui valide donc ce modèle.

¹⁵ Référence : <http://www.dow.com/webapps/lit/litorder.asp?filepath=styrofoam/pdfs/>

Annexe H – Fiche technique pour la fixation de l'aile

DESSIN TECHNIQUE DU PROFIL SUR CATIA



CONTRAINTES LIMITE DANS LE MATÉRIAU¹⁶

Acier :

Contrainte limite de cisaillement $\tau = 65 \text{ MPa}$

Aluminium :

Contrainte limite de cisaillement $\tau = 70 \text{ MPa}$

Module de cisaillement $G = 26 \text{ GPa}$

Contreplaqué :

Contrainte limite de cisaillement $\tau = 1,5 \text{ MPa}$

DIMENSIONS DES PIÈCES

Clou :

Longueur : $L = 30 \text{ cm}$

Diamètre : $d = 26 \text{ cm}$

Tige filetée :

Longueur : $L = 7 \text{ po} = 0,1778 \text{ m}$

Diamètre : $d = 0,25 \text{ po} = 0,00635 \text{ m}$

Bois :

Longueur : $L = 1,75 \text{ po} = 0,044 \text{ m}$

Largeur : $l = 1 \text{ po} = 0,0254 \text{ m}$

Épaisseur : $e = 0,2 \text{ po} = 0,005 \text{ m}$

CALCULS

Cisaillement : $\tau = \frac{F}{A} \implies$

- clous $\tau = 2,138$
- bois $\tau = 26,8 \text{ kPa}$
- Tige $\tau = 954,6 \text{ kPa}$

Torsion : $\tau = \frac{T \cdot r}{J_0} \implies$ - Tige : $\tau = 18,09 \text{ MPa}$

INTERPRÉTATION ET VALIDATION

$\tau_{\text{clous}} = 2,138 \text{ MPa} < 65 \text{ MPa}$

$\tau_{\text{bois}} = 26,8 \text{ kPa} < 1,5 \text{ MPa}$

$\tau_{\text{tige}} = 954,6 \text{ kPa} < 70 \text{ MPa}$

$\tau_{\text{tige}} = 18,09 \text{ MPa} < 70 \text{ MPa}$

D'après les résultats précédents, on constate que les contraintes en torsion et en cisaillement dans le système de fixation de l'aile ne dépasse jamais les contraintes maximales autorisées ce qui valide donc ce modèle.

¹⁶ Référence : MALLÉN-JUNEAU, Chantal. Statique et Résistance des matériaux. Éditions Saint-Martin, 2011.

Annexe I – Calculs de résistance des matériaux du système de mesure

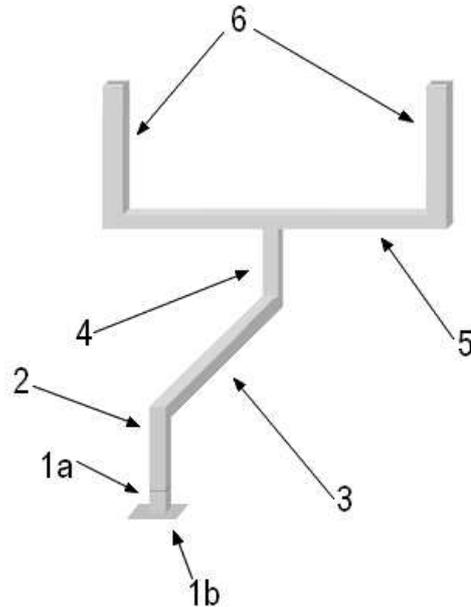


Figure G.1 : Nomenclature du support en Y

- PIÈCE 1A – CONTRAINTE NORMALE DE CHARGEMENT UNI AXIAL

$$\text{Aire : } A = 2.54 \cdot 3.175 = 8.06 \text{ cm}^2 = 806 \text{ mm}^2$$

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{62,06}{806} = 77,0 \cdot 10^3 \text{ kPa}$$

- PIÈCE 1B – CONTRAINTE NORMALE DE CHARGEMENT UNI AXIAL

$$\text{Aire : } A = 13,97 \cdot 13,97 = 195,16 \text{ cm}^2 = 19\,516,09 \text{ mm}^2$$

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{62,06}{19\,516,09} = 3,18 \cdot 10^3 \text{ kPa}$$

- PIÈCE 2 – CONTRAINTE NORMALE DE CHARGEMENT UNI AXIAL

$$\text{Aire : } A = 2.54 \cdot 1,91 = 4.85 \text{ cm}^2 = 485,14 \text{ mm}^2$$

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{62,06}{485,14} = 127,92 \cdot 10^3 \text{ kPa}$$

- PIÈCE 3 – CONTRAINTE DE CISAILLEMENT

$$\text{Aire : } A = 2,22 \cdot 1,91 = 4,24 \text{ cm}^2 = 424 \text{ mm}^2$$

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{62,06}{424} = 146,36 \cdot 10^3 \text{ kpa}$$

- PIÈCE 4 - CONTRAINTE NORMALE DE CHARGEMENT UNI AXIAL

$$\text{Aire : } A = 2,54 \cdot 1,91 = 4,85 \text{ cm}^2 = 485,14 \text{ mm}^2$$

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{62,06}{485,14} = 127,94 \cdot 10^3 \text{ kpa}$$

- PIÈCE 5 - CONTRAINTE DE CISAILLEMENT

$$\text{Aire : } 2,54 \cdot 3,81 = 9,68 \text{ cm}^2 = 968 \text{ mm}^2$$

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{62,06}{968} = 64,11 \cdot 10^3 \text{ kpa}$$

- PIÈCE 6 - CONTRAINTE NORMALE DE CHARGEMENT UNI AXIAL

$$\text{Aire : } 2,54 \cdot 3,81 = 9,68 \text{ cm}^2 = 968 \text{ mm}^2$$

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{62,06}{968} = 64,11 \cdot 10^3 \text{ kpa}$$

- VIS – CONTRAINTE DE CISAILLEMENT

$$\text{Aire : } \pi r^2 = \pi \cdot 0,16^2 = 0,080 \text{ cm}^2 = 8,0 \text{ mm}^2$$

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{62,06}{8,0} = 7,758 \text{ MPa}$$

- COLLE – CONTRAINTE DE CISAILLEMENT

Nous avons considéré la contrainte de cisaillement de la colle à bois négligeable par rapport aux autres contraintes auxquelles est soumis le système de mesure. Ainsi, celle-ci ne sera pas prise en compte.

Annexe J – Photos du processus de fabrication

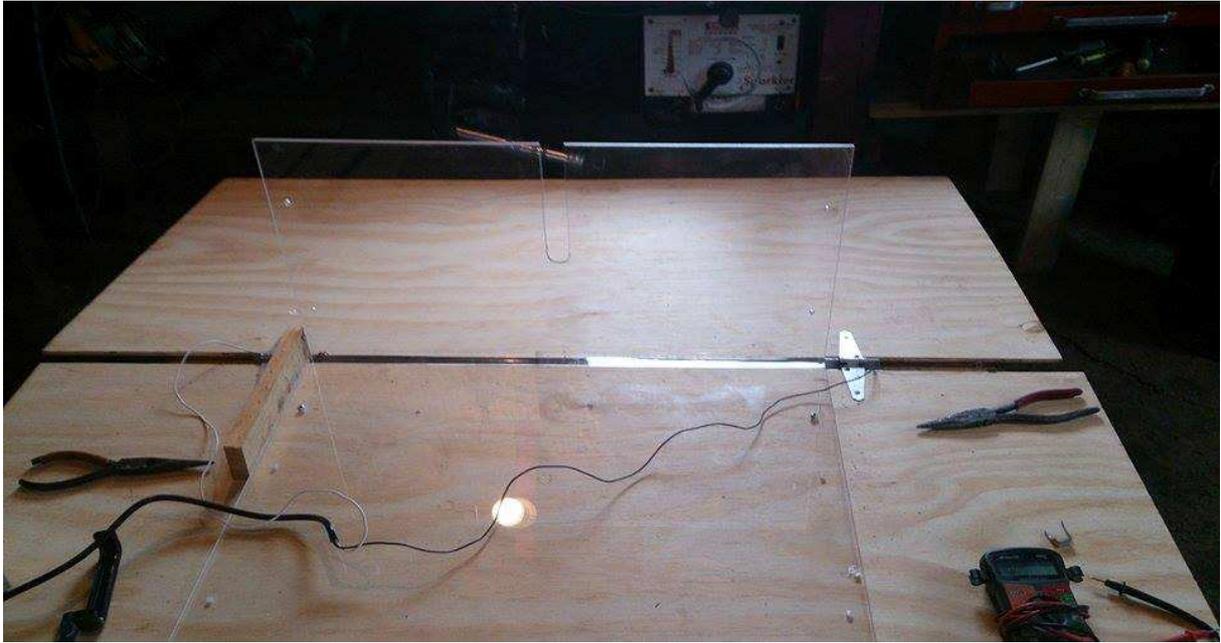


Figure I.1 : Montage pour plier la plaque acrylique.

Matériel nécessaire : transformateur, fil conducteur, fil de nichrome pour chauffer, ressort, charnières, canal en aluminium et équerre pour les angles droits.

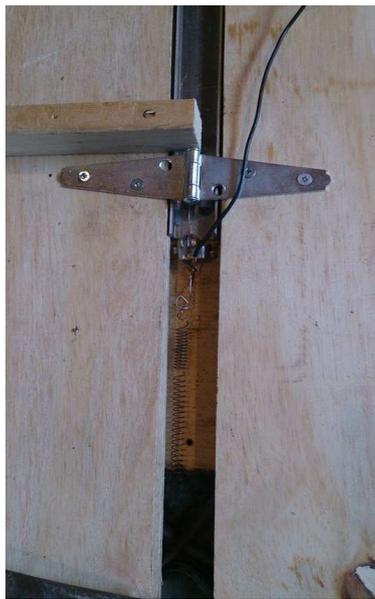


Figure J.1 : Un ressort maintenant la tension lorsque le fil prend de l'expansion.

Par ce principe, le fil ne va pas se souder au canal en aluminium servant à protéger le bois de la chaleur.



Figure J2 : Perçage des trous et des fentes

Après avoir été dessinés précisément aux bons endroits, les trous ont été percés et les fentes ont été réalisées en perçant un trou aux extrémités, puis terminés à la scie sauteuse par des segments droits.

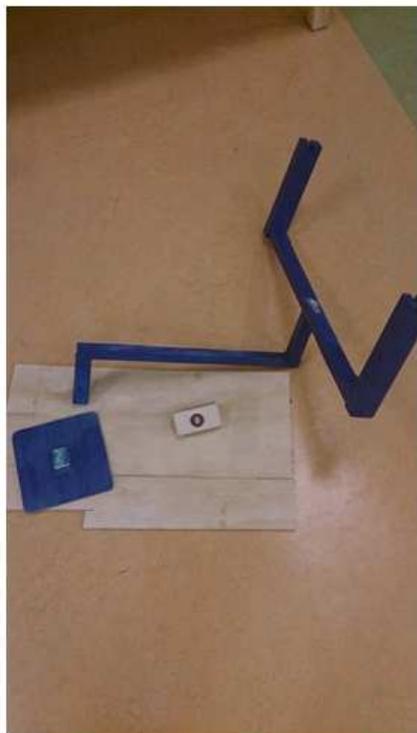


Figure J.4 : Le support en Y



Figure J.5 : La partie rotative du support

La partie rotative se fixe au support et le roulement à bille s'y insère. Ce dernier minimise le frottement lors de la rotation du support en entier.



Figure J.6 : Coupe de la tige filetée



Figure J.7 : Sablage du support en Y



Figure J.8 : Systèmes d'attache pour les ailes



Figure J.9 : Le balancier



Figure J.10 : Détermination de l'emplacement du balancier

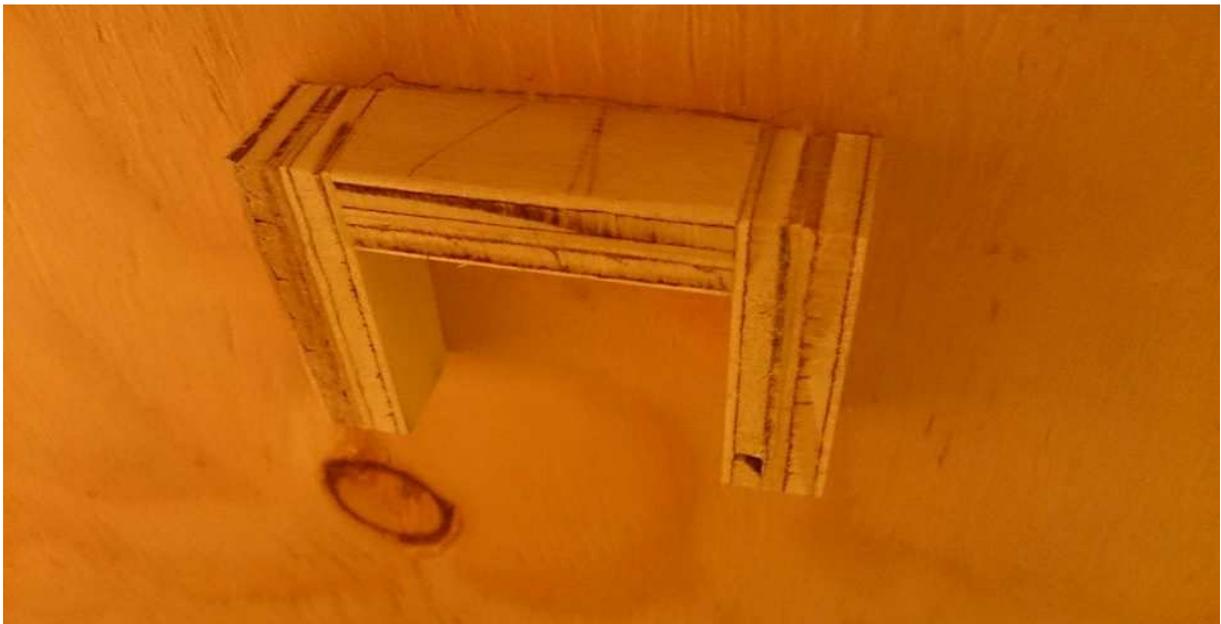


Figure J.11 : Frein en U (pièce no. 11) sous la table pour empêcher la translation du balancier(en-dessous de la soufflerie)



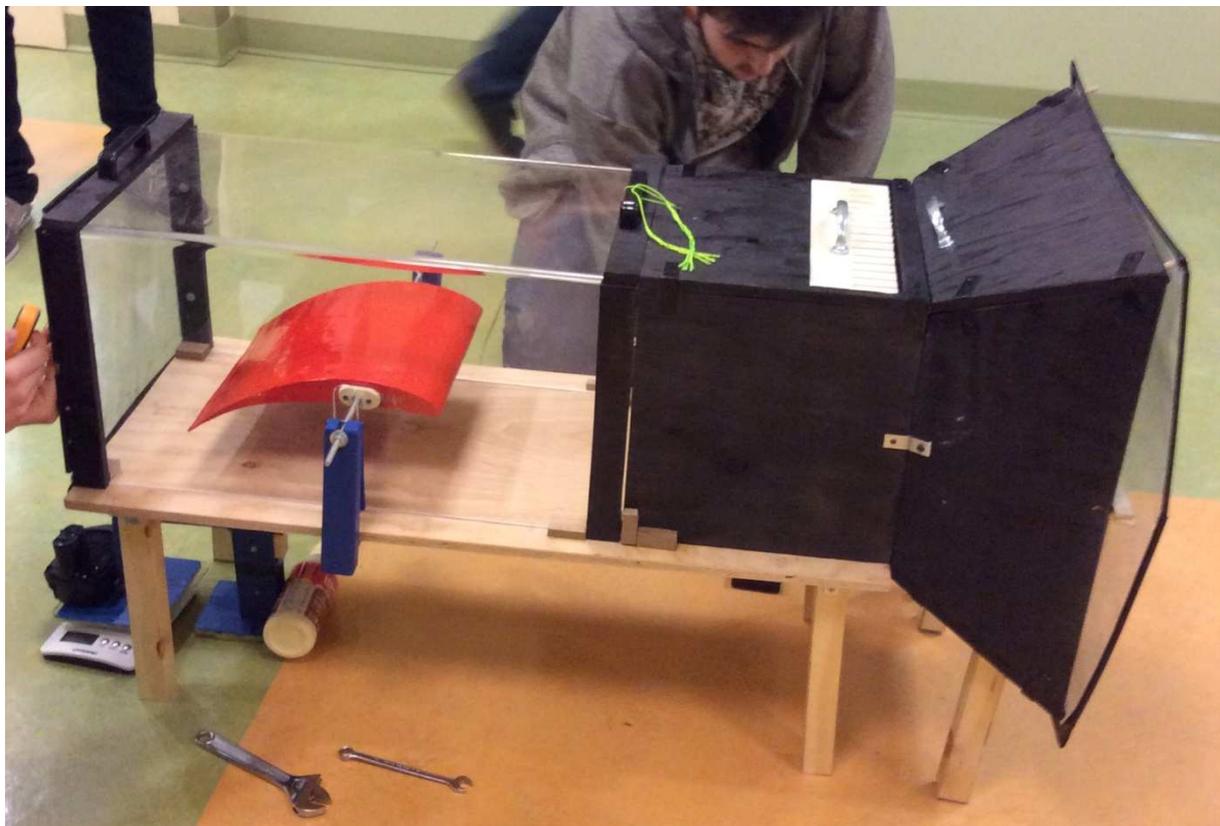
Figure J.12 : *Coupage des profils d'aile dans de la styromousse à l'aide d'un fil chauffant*



Figure J.13 : *Recouvrement des profils d'aile dans du plastique de type MonoKote*



Figure J.9 : Profils d'aile finaux, entourés par la styromousse dans lequel ils ont été coupés



E.15 : Assemblage des différentes parties de la soufflerie

Annexe K – Dessins techniques du système de mesure

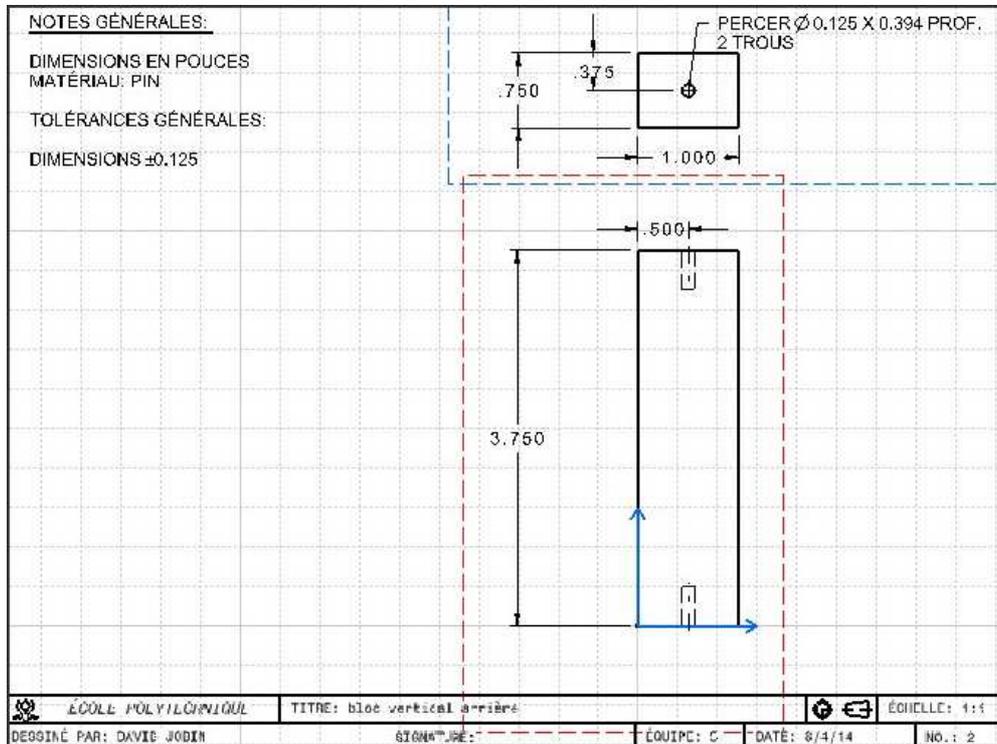


Figure H.1 : Dessin technique du bloc vertical arrière (pièces 4)

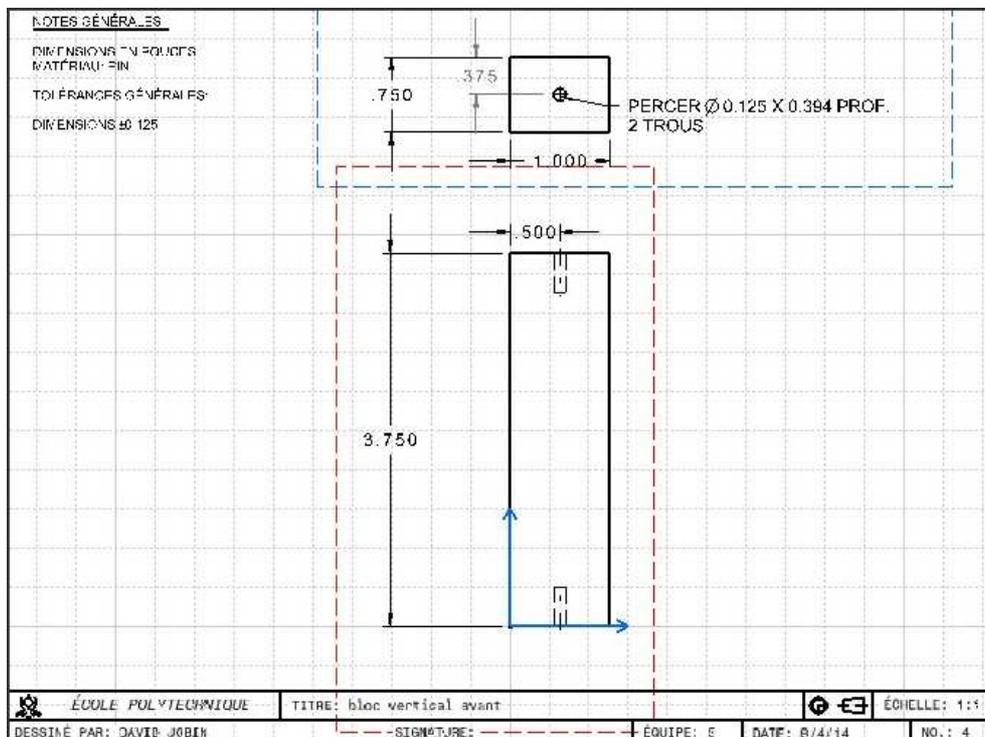


Figure H.2 : Dessin technique du bloc vertical avant (pièces 2)

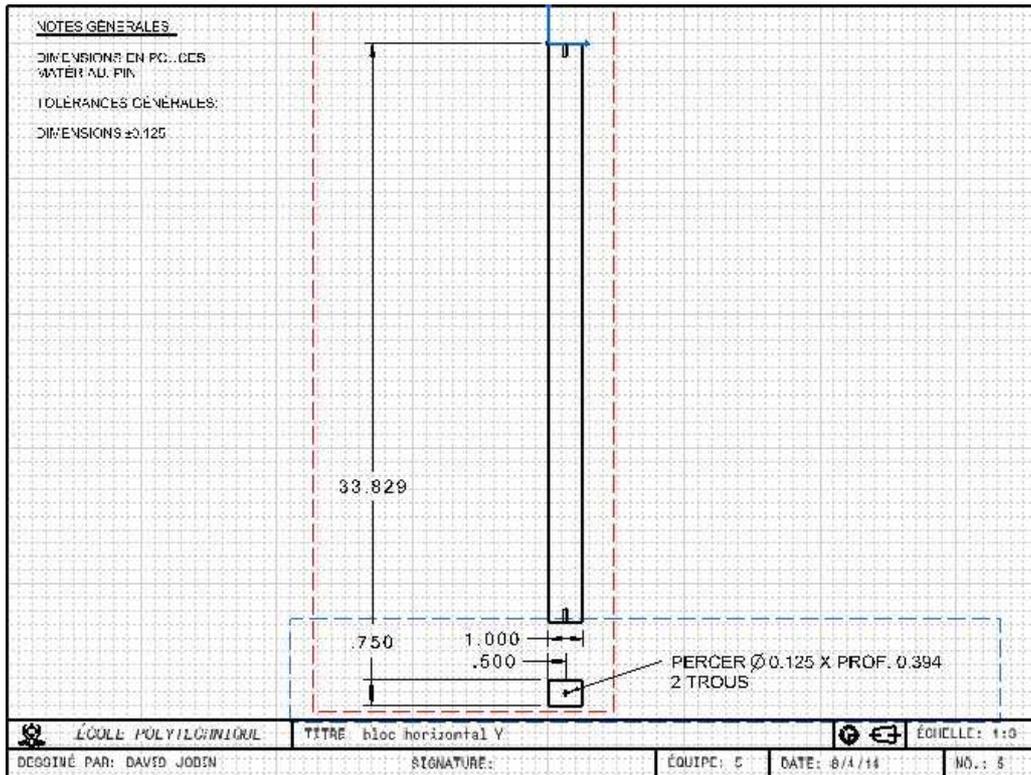


Figure H.3 : Dessin technique du bloc horizontal du Y (pièce 5)

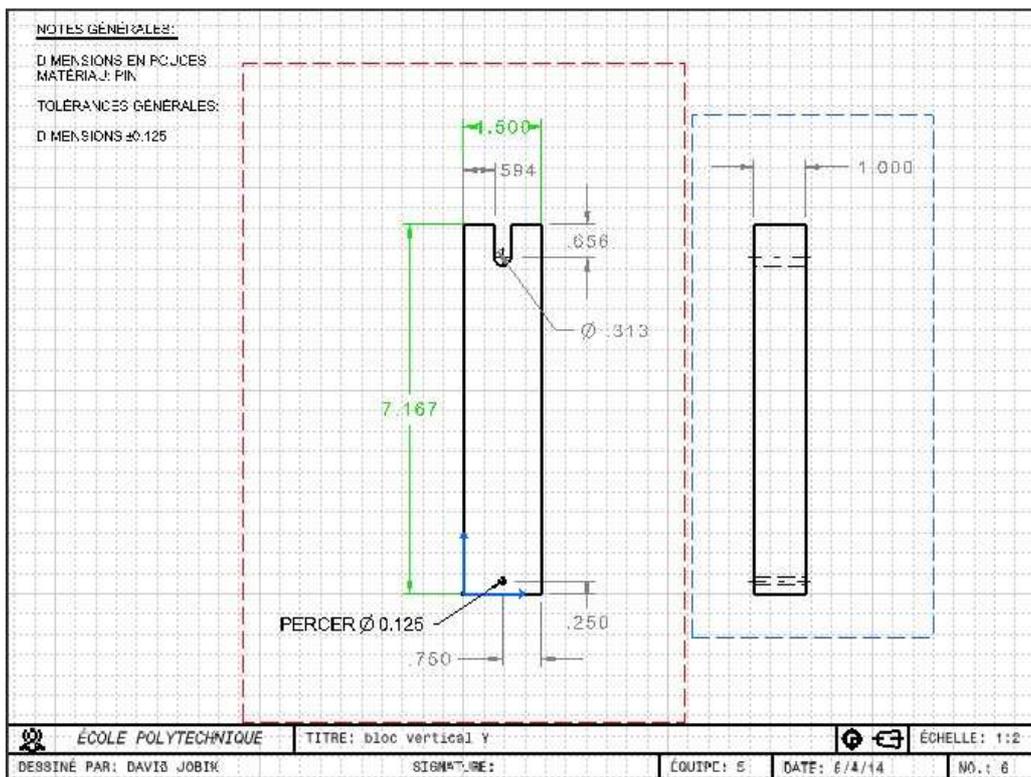


Figure H.4 : Dessin technique du bloc vertical du Y droite et gauche (pièce 6 x2)

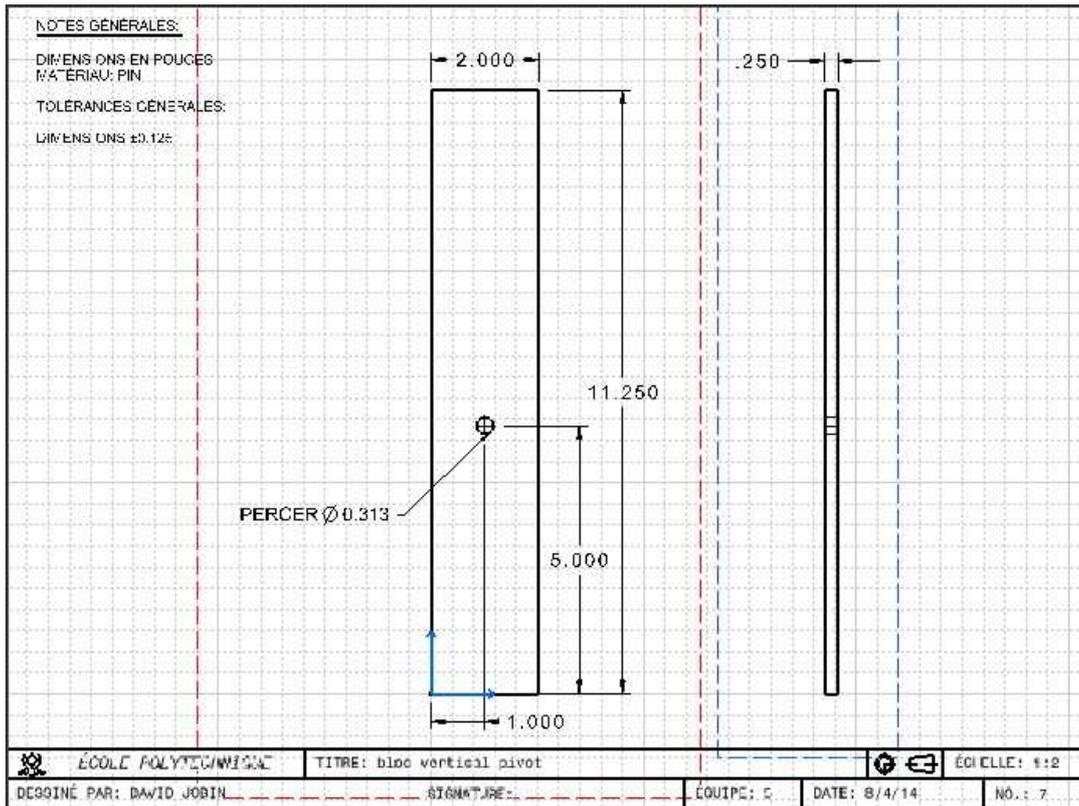


Figure H.5 : Dessin technique du bloc vertical du pivot (pièces 7 x 2)

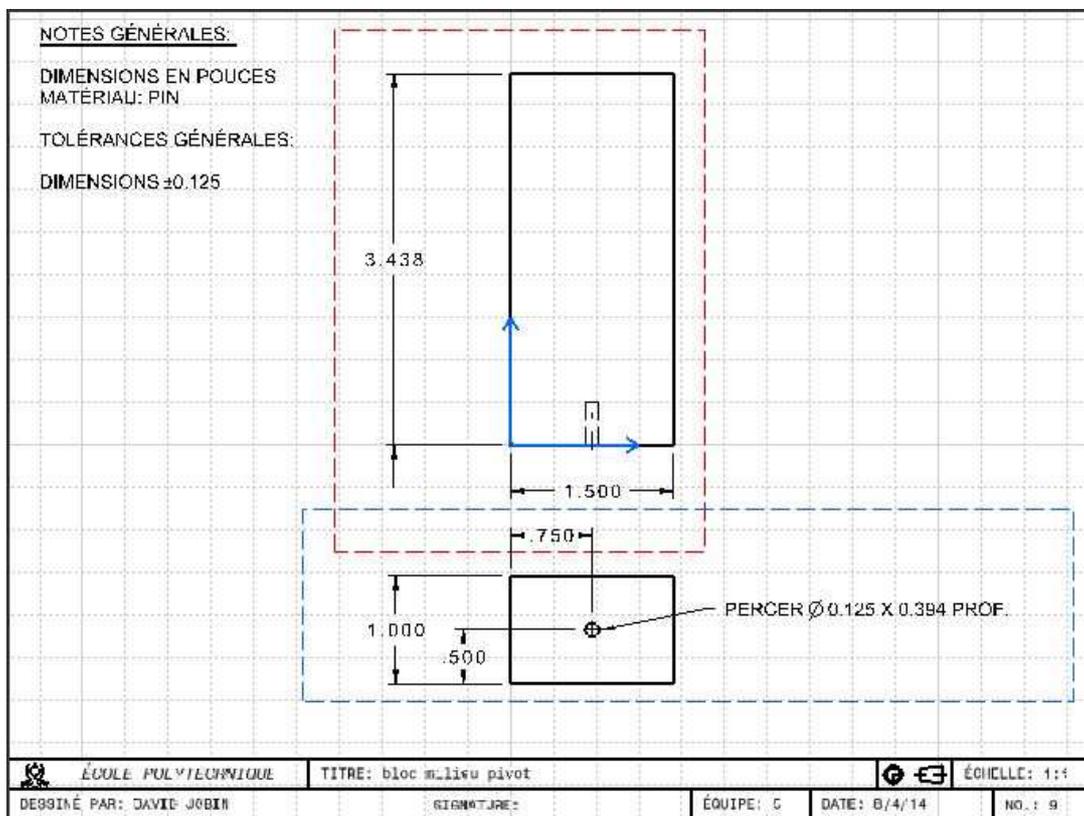


Figure H.6 : Dessin technique du bloc milieu du pivot (pièce 9)

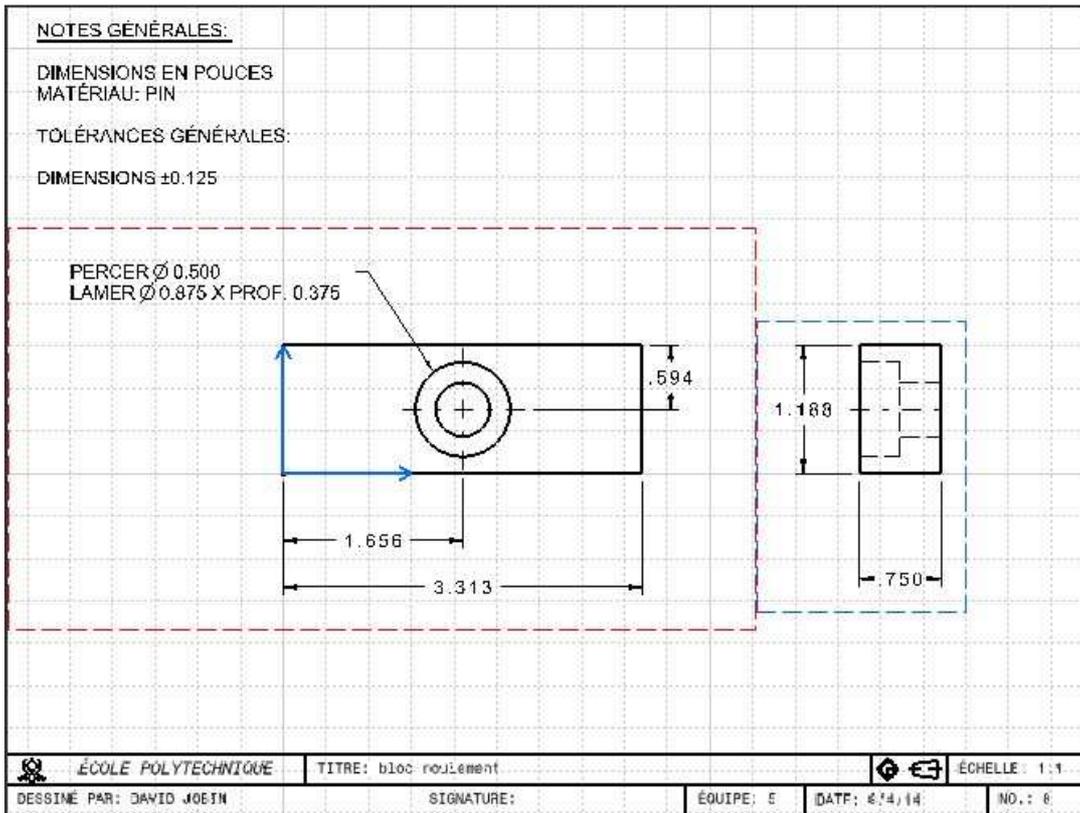


Figure H.7 : Dessin technique du bloc du roulement à billes (pièce 8)

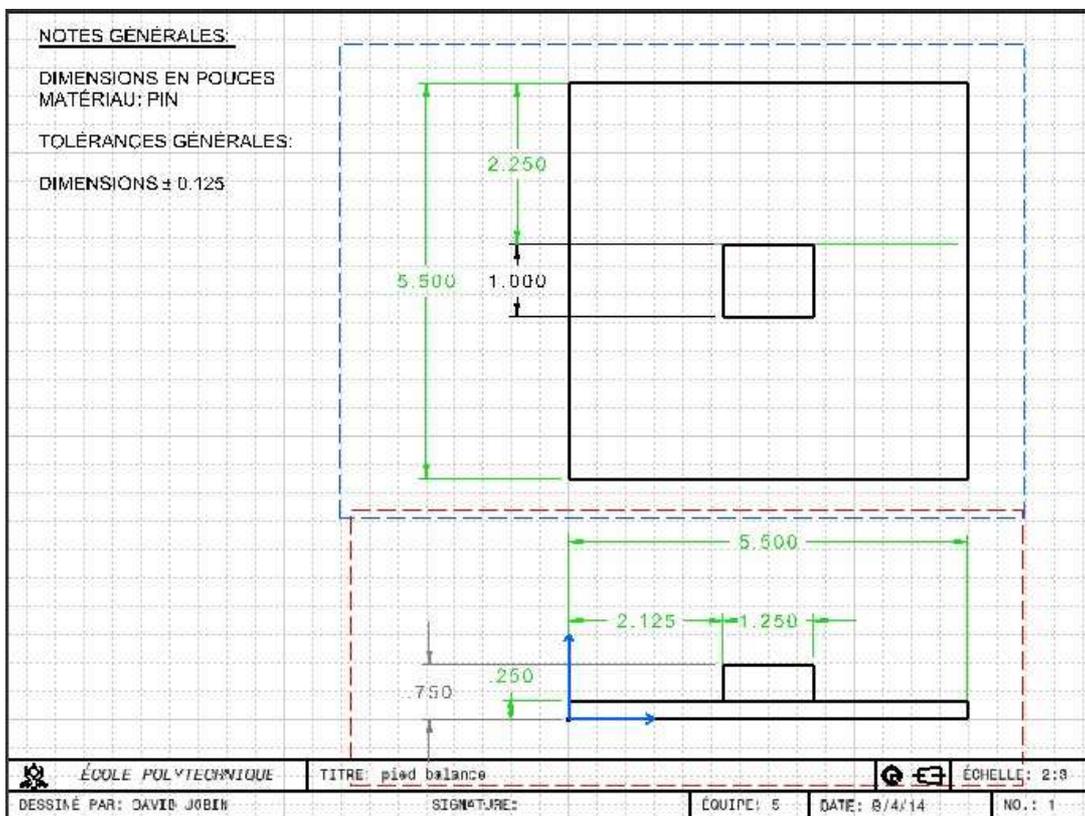


Figure H.8 : Dessin technique du pied de la balance (pièces 1a et 1b)

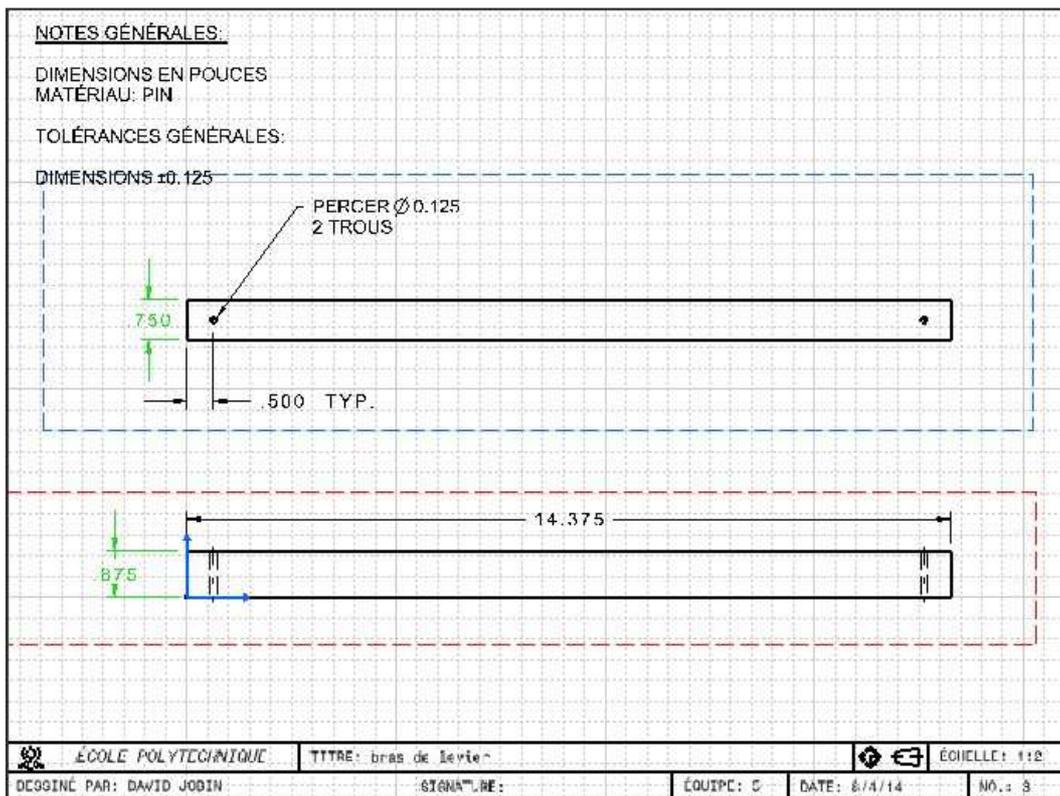


Figure H.9 : Dessin technique du bras de levier (pièce 3)

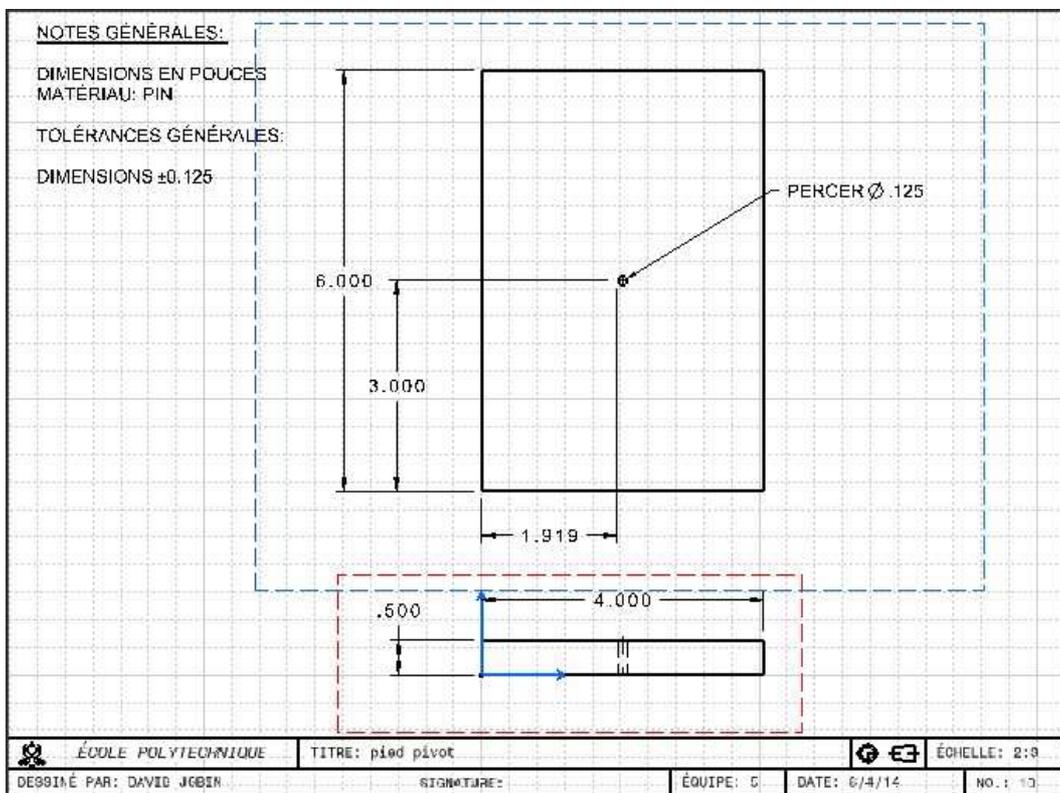


Figure H.10 : Dessin technique du pied du pivot (pièce 10)

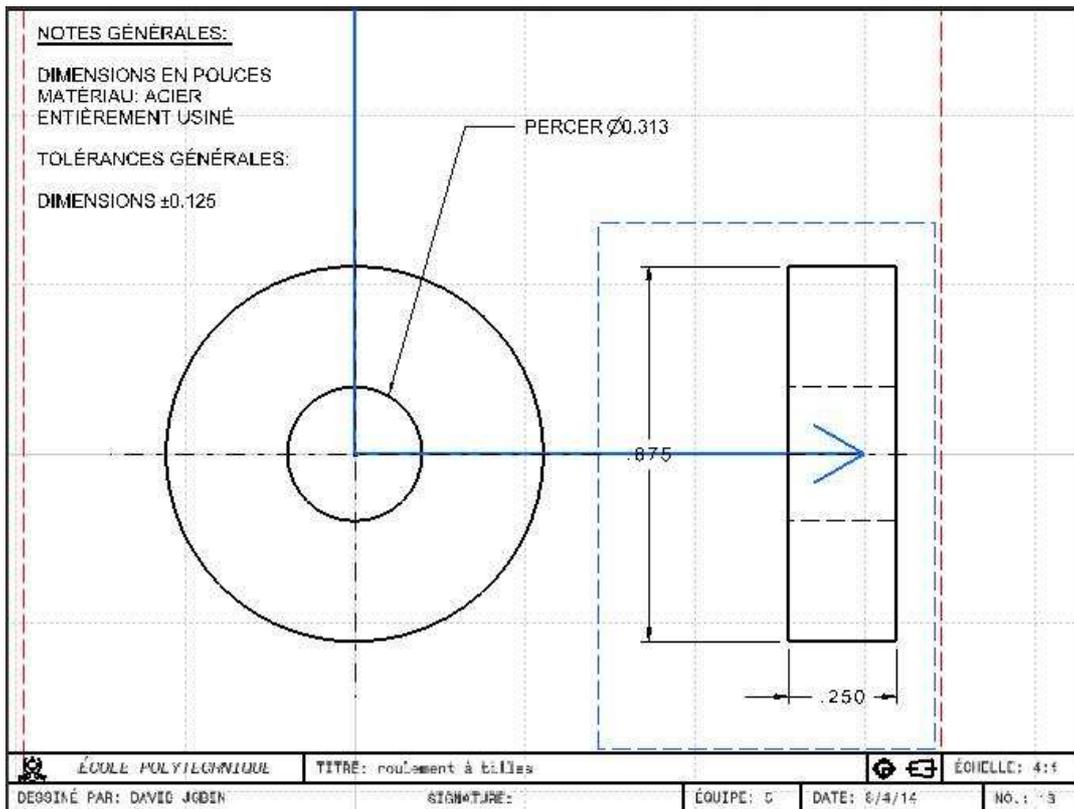


Figure H.11 : Dessin technique du roulement à billes (pièce roulement)

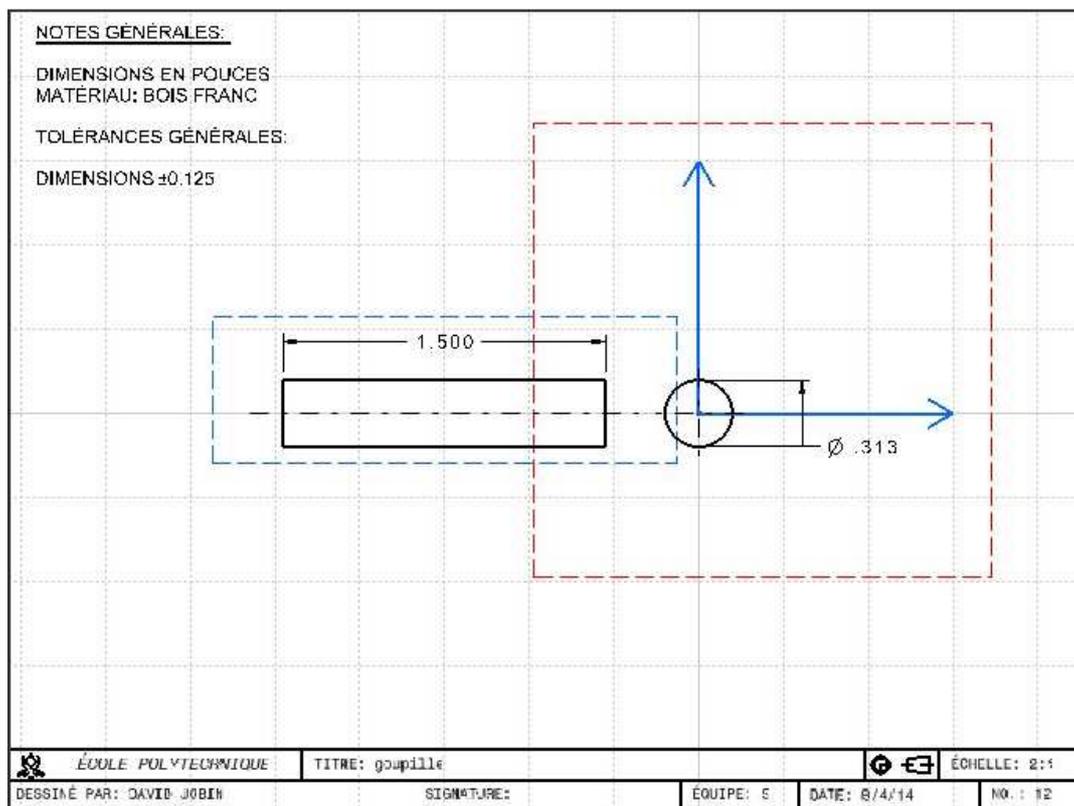


Figure H.12 : Dessin technique de la goupille (pièce goupille)

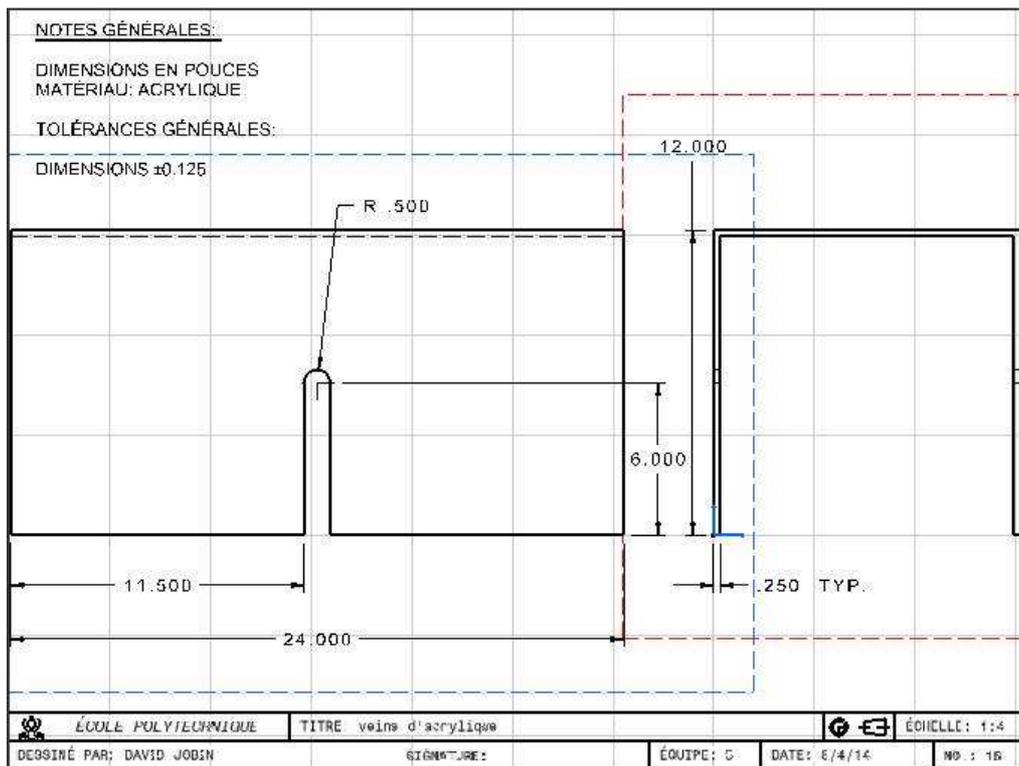


Figure H.13 : Dessin technique de la veine d'essai (pièce veine)

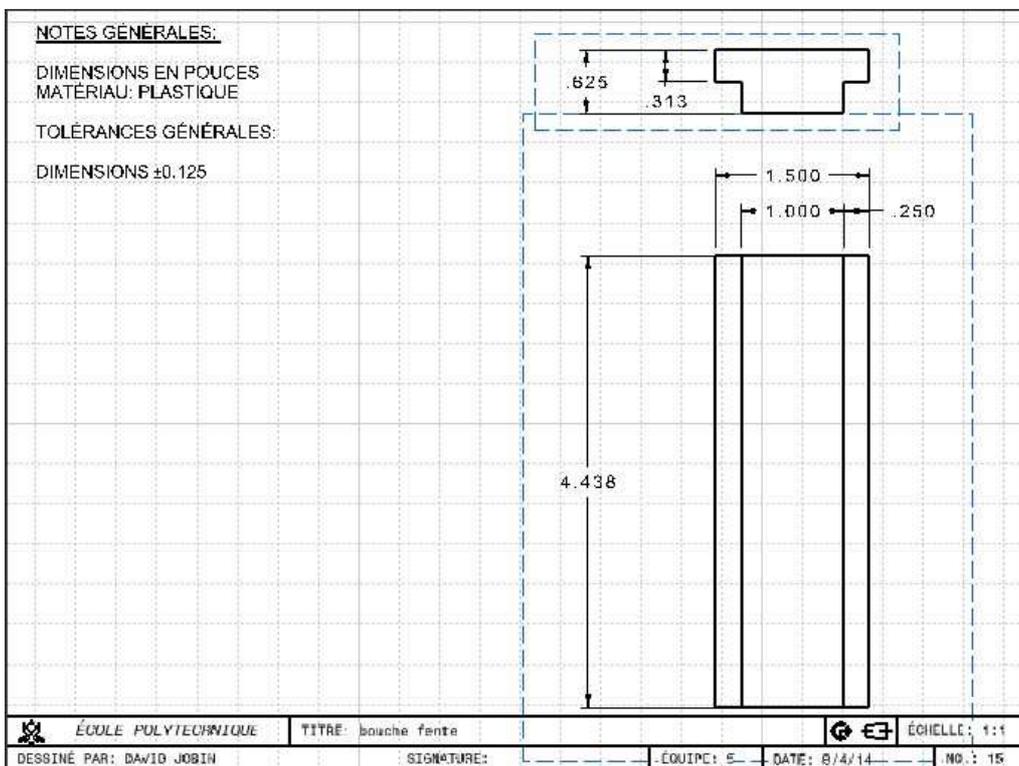


Figure H.14 : Dessin technique des fermetures des fentes (pièces bouche x2)



Figure H.15 : Dessin technique de la tige filetée (pièces tige x2)

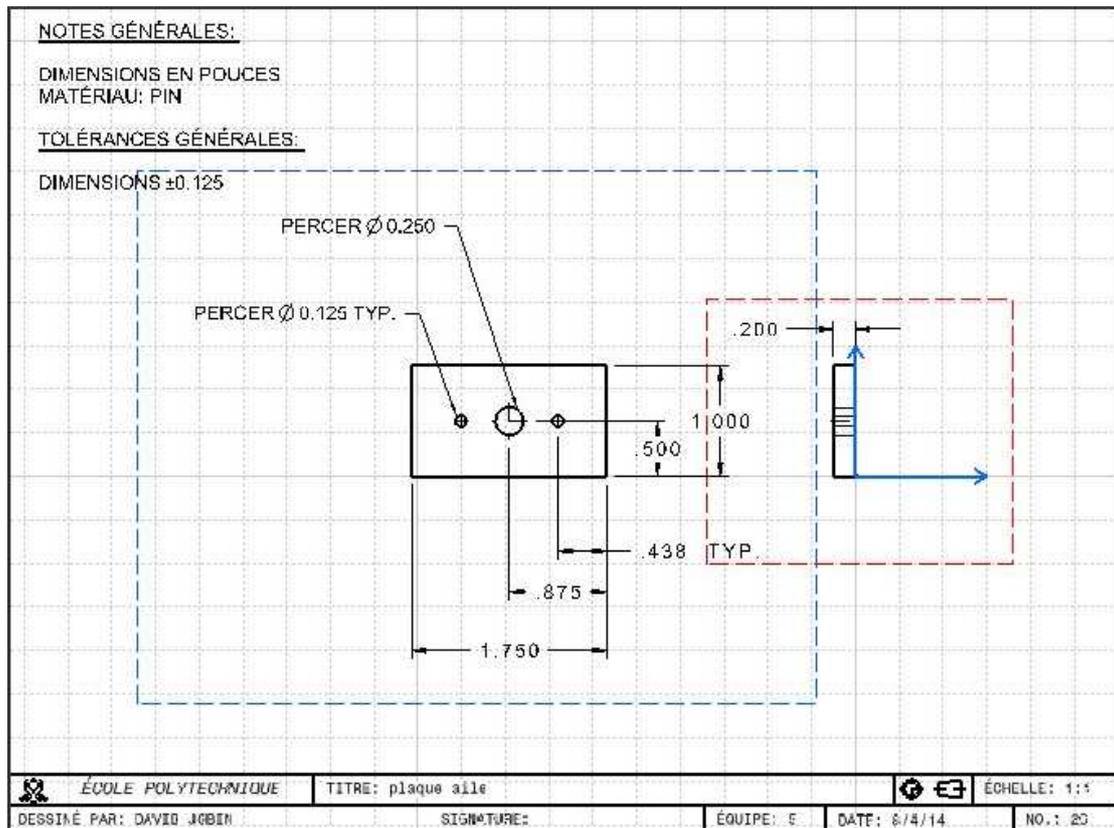


Figure H.16 : Dessin technique des plaquettes de fixation (pièces plaque x2)

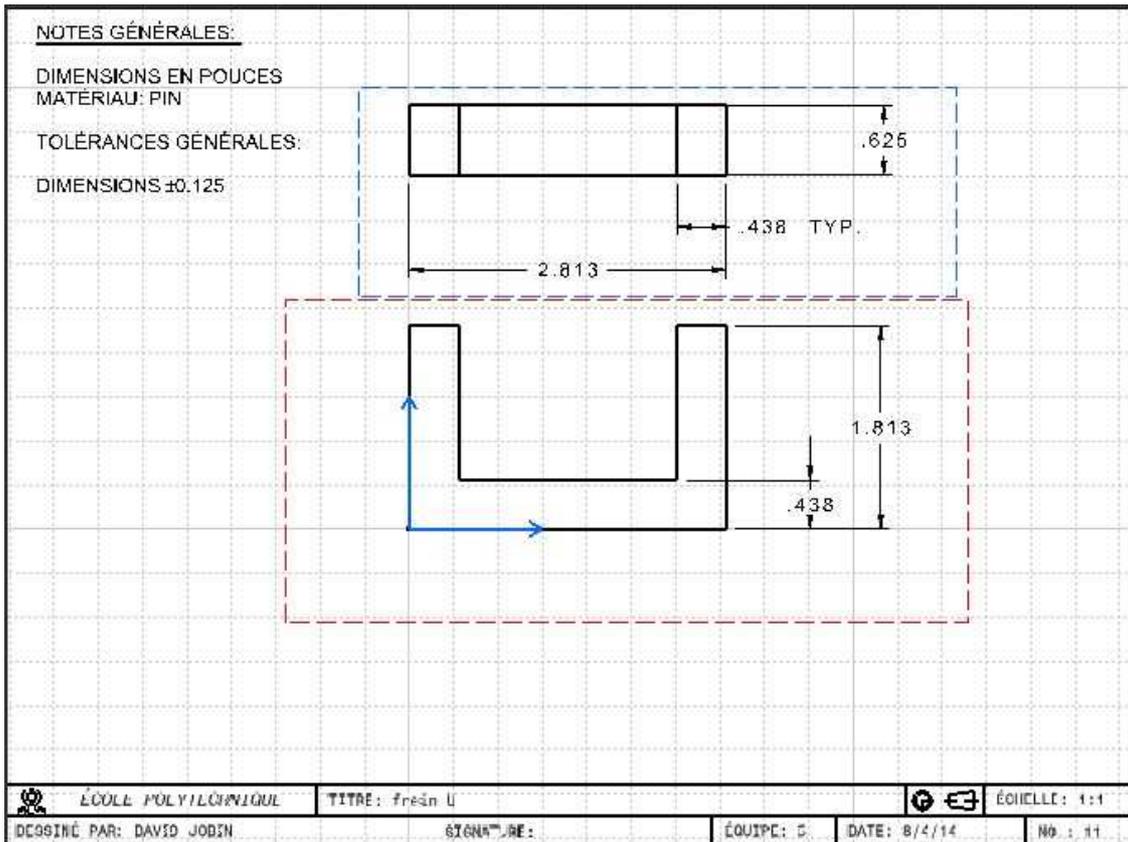


Figure H.16 : Dessin technique frein de support en U (pièce frein)

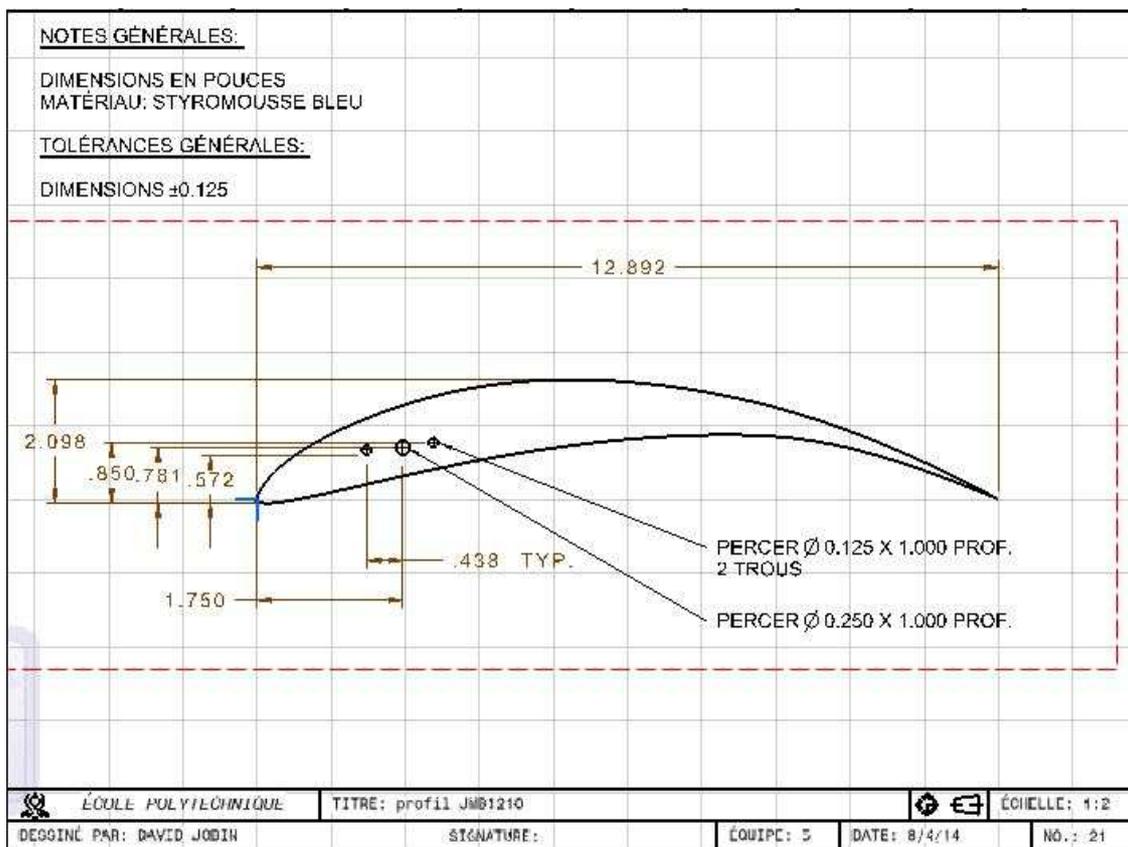


Figure H.17 : Dessin technique du profil d'aile JMB1210

Annexe L – Feuille de temps

SEMAINE	DATE	CATEGORIE	TACHE	SIMON DUCHESNE	SOUFIANE OUARTASSI	LYSSA GUILBAULT	DAVID JOBIN	SAMUEL MESSIER	HANNA TERRANOVA	BENOIT TESSIER	TOTAL / SEMAINE	
											EN MINUTES	EN HEURES
8	11-03-14	Séance	Consignes EdC3	30	30	30	30	30	30	30	210	17h 30m
		Séance	Étude des configurations et compagnie	60	60	60	60	60	60	60	420	
		Réunion 8	Génération d'idées	60	60	60		60	60	60	360	
		Travail	S08-PTÉC3		30					30	60	
9	18-03-14	Séance	Sélection de solutions	180	180	180	180	180	180	180	1260	30h 30m
		Réunion 9	Sélection de solutions	60	60	60	60	60	60	60	420	
		Travail	S09-D2		20	20	20	30	30	30	150	
10	25-03-14	Séance	Précision de la solution	160	160	160	160	160	160	160	1120	60h 40m
		Réunion 10	Précision de la solution	45	45		45	45	45	45	270	
		Travail	Recherche du profil d'aile			150					150	
		Travail	Construction soufflerie	420		420	420	240	300	300	2100	
11	01-04-14	Séance	Construction soufflerie	280	280	280	280	280	280	280	1960	140h 10m
		Réunion 11	Construction soufflerie	120		120	180	180		120	720	
		Travail	Construction et tests soufflerie	180		240	375	375			1170	
		Travail	Rapport	600	420	840	360	360	1500	480	4560	
TOTAL / PERSONNE			EN MINUTES	2195	1345	2620	2170	2060	2705	1835	248h 50m	
			EN HEURES	30h 0m	22h 25m	43h 40m	36h 10m	34h 20m	45h 5m	30h 35m		

Étud

ANNEXE N – FACTURE

À l'attention de :	Éric Morissette
Courrier électronique:	emorissette@educmdp.org
Nom de l'entreprise :	Centre de développement pédagogique
Nom du projet	Mesure de portance dans une soufflerie artisanale
Description du projet :	Vulgarisation d'éléments du programme scolaire
N° bon de commande	05 - 01
Numéro de facture	2
Date:	08-04-2014

Description	Quantité	Prix à l'unité	Montant
Travail d'ingénierie (heures)	181,16	100,00 \$	18 116,00 \$
Travail de conception manuelle (heures)	67,67	75,00 \$	5 075,25 \$
Coût des matériaux			
Bois	1	39,31 \$	39,31 \$
Plexiglass	1	42,47 \$	42,47 \$
Styromousse	1	28,74 \$	28,74 \$
Tige filetée	1	4,66 \$	4,66 \$
Éléments de liaison (clous, écrous, etc.)	1	10,87 \$	10,87 \$
		Sous-total	23 317,30 \$
	TPS	5,00 %	1 165,87 \$
	TVQ	9,98 %	2 325,90 \$
	Total		26 809,07 \$

PAYABLE À L'ÉQUIPE 5,
 Simon Duchesne
 Soufiane El Ouatarssi
 Lyssa Guilbault
 David Jobin
 Samuel Messier
 Hanna Terranova
 Benoît Tessier

ANNEXE O – FICHE DU SYSTÈME DE MESURE

<u>Matériau</u>	<u>Dimensions des pièces</u>
<p>Acier :</p> <p>Contrainte limite de cisaillement → 65 → MPa</p> <p>Bois :</p> <p>Contrainte limite de cisaillement → 10 → MPa</p> <p>Contrainte limite d'élasticité → 12000 → MPa</p> <p>Contrainte limite de compression → 47 → MPa</p> <p>Contrainte limite de flexion → 87 → MPa</p> <p>(2014).Caractéristiques du bois. Tiré de:http://www.crit.archi.fr/web%20folder/bois/bois/3.caracteres/CARACMECANIQUES2E NIV.HTML</p>	<p>Vis : A → 8.0 mm²</p> <p>Pièce de bois:</p> <p>#1A A → 806 mm²</p> <p>#1B : A → 19516.09 mm²</p> <p>#2: A → 485.14 mm²</p> <p>#3 : A → 424 mm²</p> <p>#4: A → 485.14 mm²</p> <p>#5 : A → 968 mm²</p> <p>#6 : A → 8.0 mm²</p>
<u>Contraintes maximales et respect des contraintes limites</u>	
Cisaillement vis	→ $\tau = F / A$ → 7.76 MPa < 65 MPa
Cisaillement bois	→ $\tau = F / A$ → 0.5461 MPa < 10 MPa
Compression bois	→ $\sigma = F / A$ → 127.96*10 ⁻³ MPa < 47 MPa
Élasticité bois	→ $\sigma = F / A$ → 32.0*10 ⁻³ MPa < 12 000 MPa
Flexion bois MPa	→ $\sigma = F / A$ → 0.048 MPa < 12 000