

AER1110- PROJET INITIAL EN GÉNIE AÉROSPATIAL

Groupe-cours n°1

ÉTUDE DE CAS 3, Conception d'une soufflerie artisanale

Présenté à

Monsieur Jean-Paul Lemarquis, ing. et Monsieur Patrice Rémy, ing.

Par

L'équipe n°7

Pierre-Olivier Alain, 1689388

Daphnée Lacasse, 1690795

Samuel Leblanc, 1690738

Félix Lessard, 1678735

Thanh Tri Nguyen, 1683066

Simon Munger, 1683944

Adam Samson, 1691695

Le 8 avril 2014

À Montréal

Résumé

Ce document a été écrit suite la rédaction de *l'Étude de Cas 1*, rapport transcrivant les besoins d'un client en caractéristiques d'ingénierie, et *l'Étude de Cas 2, Conception d'une soufflerie artisanale*, rapport analysant plusieurs solutions pouvant répondre à ces mêmes besoins. *L'Étude de Cas 2, Conception d'une soufflerie artisanale* a permis de déterminer la solution la plus avantageuse. Ces rapports ont été réalisés suite à l'obtention d'un mandat de fabrication d'une soufflerie pour le Centre de Développement Pédagogique du Québec. Le présent document informe les lecteurs quant aux détails de conception et de fabrication de la soufflerie. Pour ce faire, il fait l'analyse détaillée du sous-système que l'équipe de travail a été chargée d'étudier : la mesure de la portance. Plusieurs tableaux et schémas illustrent les points discutés dans ce document.

Ce rapport expose l'analyse et la présentation du concept de façon complète. La solution est étudiée de sorte que ses éléments sont réalisables et en accord avec les domaines de la statique, de la résistance des matériaux, du dessin technique et de la cotation. Les calculs sont basés sur des hypothèses discutées dans le rapport. Chaque élément du sous-système ainsi que le profil d'aile test utilisé sont étudiés sur des fiches techniques d'analyse et de réalisation. Le protocole de mesure ainsi que la fiche de prise de données sont également présentés dans ce document.

Le sous-système de la prise de mesures est composé d'une plaque roulante et d'un dynamomètre pour mesurer la traînée, d'une balance pour mesurer la portance et d'un support à angle d'attaque variable pour tenir l'objet à tester. L'analyse de la résistance des matériaux et de la statique du produit nous ont permis de déterminer que le concept est réalisable. L'utilisation de dessins techniques, de la cotation ainsi que la fabrication d'un prototype nous ont quant à eux permis de démontrer la faisabilité de la solution.

Mots Clés: *Étude de Cas ; Étude de Cas 2, Conception d'une soufflerie artisanale; Statique; Résistance des matériaux; Dessin technique; Cotation, concept est réalisable, faisabilité de la solution.*

Abstract

This document follows *Case Study 1* which translated customer's needs into engineering characteristics, and *Case Study 2: Designing wind tunnel* report analyzing several solutions that meet those needs. *Case Study 2: Designing a wind tunnel* was used to determine the most advantageous solution. These reports were made after obtaining a contract for manufacturing a wind tunnel for the Educational Development Centre of Quebec. This document informs the reader upon the details of design and manufacturing of the wind tunnel. In order to do this, it details the analysis of the subsystem that the work team had to study: lift measurement. Several tables and diagrams illustrate the points discussed in this document.

This report presents the analysis and presentation of the concept completely. The solution is designed so that its elements are feasible and following conventions of statics, strength of materials, technical drawing and quotation. The calculations are based on assumptions discussed in the report. Each element of the subsystem and the test airfoil used are studied on analysis and implementation cards. The measurement protocol as well as the data tables are also presented in this document.

The subsystem of taking measurements includes a movable platform and a load cell for measuring the drag, a scale for measuring lift and a support with variable angle of attack to hold the test object. The analysis of the strength of materials and static product allowed us to determine that the concept is feasible. The use of technical drawings, trading and manufacturing of a prototype demonstrated the feasibility of the solution.

Keywords : *Case Study ; Case Study 2 , Designing a homemade wind tunnel; Static ; Strength of materials ; Technical drawing ; Trading concept is feasible, feasibility of the solution.*

Table des matières

Table of Contents

Résumé.....	i
Abstract	ii
Tableaux et figures.....	v
Introduction.....	1
Sommaire des requis conceptuels et techniques	2
Description, données et restrictions	2
Suppositions, hypothèses de départ et interprétation	3
Analyse – Efforts externes du profil d’aile	4
Suppositions, données et restrictions :	4
Vitesse du vent :	4
Superficie du profil	4
Portance.....	5
Traînée du profil d’aile	6
Description des charges, schémas et diagrammes de corps libres :	7
Résultats anticipés et graphiques de différentes configurations	8
Analyse – Efforts internes.....	11
Essieux	15
Réalisation – Profils d’aile et systèmes de mesure	21
Calculs, choix et justifications	21
Choix des instruments de mesure	22
Fixation des instruments de mesure	23
Système de support du profil	24

Fabrication et essais	26
Fabrication du système de mesure de portance.....	26
Fabrication du profil d'aile	26
Fabrication du support du profil	26
Fabrication du système de mesure de portance.....	26
Fabrication du système de mesure de traînée	26
Interfaçage avec les autres sous-systèmes	27
Liens Génération de flux d'air – Système de mesure de la portance.....	27
Liens Structure – Système de mesure de la portance.....	27
Limites d'opération.....	29
Validité à haute vitesse	30
Protocole type	31
Conclusion	33
Remerciements.....	34
Annexe A: Profils d'aile	35
Table 1: Informations sur le profil S1223:.....	35
Table 2: Informations sur le profil NACA 63-210	36
Table 3: Informations sur le profil NASA SC-1010.....	37
Annexe B: Fiches analyse et réalisation	38
Fiche Analyse – Profil d'aile	38
Fiche analyse – Système de support de profil.....	39
Fiche Réalisation – Profil d'aile	40
Fiche réalisation – système de mesure.....	41
Fiche réalisation – système support du profil portant.....	41

Fiche réalisation – essieux	43
Annexe C: Factures des pièces	40
Annexe D: Facture de temps.....	41
Annexe E: Rendu numérique d’assemblage	43
Annexe F: Analyse de résistance des matériaux sur le système de support du profil	44
Annexe G : Calcul de réalisation sur le système de support du profil.....	59
Annexe H: Échéancier	63
Annexe I: Bibliographie.....	77
Annexe J: Dessins de détails.....	80

Tableaux et figures

Figure 1: Paramètre d'un profil d'aile.....	7
Figure 2: Profil d'aile dans un écoulement.....	7
Figure 3: Disprtribution de pression sur un profil.....	8
Figure 4: Portance en fonction de la surface et du profil d'aile	9
Figure 5: Force de portance en fonction du profil d'aile à 15m/s	9
Figure 6: Traînée d'un profil d'aile en fonction de la vitesse du flux d'air et de la longueur de corde.....	10
Figure 7: DCL de la tige support	12
Figure 8: Illustration des contraintes dans la tige	12
Figure 9: Diagrammes de poutres en flexion.....	12
Figure 10: DCL de la plaque.....	13
Figure 11: DCL simplifié du système de mesure.....	13
Figure 12: Contraintes dans la tige en fonction du diamètre	14

Figure 13: Schéma du système de mesure	15
Figure 14: Schéma d'un essieu et des forces appliquées.....	17
Figure 15: Graphiques des efforts tranchants et moments fléchissants en fonction de la distance de l'extrémité gauche de la tige	18
Figure 16: Portance d'un profil S1223 en fonction de la vitesse du flux d'air et de la longueur de corde.....	21
Figure 17: DCL du système de mesure.....	24
Figure 18: Traçage du contour de l'aile	26
Figure 19: Schéma du faux fond.....	27
Figure 20: Système de mesure de portance (photo).....	28
Figure 21: Coefficient de portance en fonction de la surface	32
Figure 22 : Diagramme de corps libre du système	48
Figure 23: DCL de chargement uniaxial.....	50
Figure 24: DCL, DET et DMF de la flexion de la tige.....	51
Figure 25: Section de la tige	52
Figure 26: Division de l'aire de la section au plan neutre	53
Figure 27 : Coupe des contraintes dues à la flexion	53
Figure 28: Superposition des contraintes normales	54
Figure 29: DCL de la plaque (encastrement).....	55
Figure 30: DCL simplifié du système.....	57

Introduction

Dans le cadre du cours Projet initial en Génie aérospatial (AER1110), la conception d'un produit devant répondre aux attentes d'un client est évaluée. Une analyse des besoins du client basée sur l'approche "Quality Function Deployment" (QFD) a été faite en utilisant la maison de la qualité. Par la suite, un premier rapport, *Étude de Cas 1* a été produit afin de traduire les besoins du client en caractéristiques d'ingénierie. Un second rapport, *Étude de cas 2, Conception d'une soufflerie artisanale* a été réalisé afin de déterminer la solution optimale.

En classe, un représentant du Centre de Développement Pédagogique du Québec, Éric Morissette, a communiqué ses besoins vis-à-vis son désir d'acquérir une soufflerie. Une deuxième cliente, Sonia Saumier, professeure de sciences et technologies au secondaire, fût également interrogée afin de cerner les critères auxquelles devra répondre la soufflerie. Le présent rapport permet donc l'analyse du produit suite au choix de la solution la plus avantageuse. Une soufflerie est également construite afin de présenter le produit au client.

La solution analysée dans le document est basée sur ce que les deux clients consultés ont énoncé comme besoins. En effet, ces besoins ont été traduits en fonctions, puis en caractéristiques d'ingénierie qui ont été intégrées dans la solution finale. Les deux clients constituent donc un échantillon insuffisant, puisque le produit est destiné aux écoles de plusieurs commissions scolaires différentes. Les commentaires des clients sont représentatifs, mais ils ne constituent pas la vérité absolue. Il est donc possible que la solution retenue ne soit pas exactement la meilleure.

La solution optimale pour le sous-système de la mesure de la portance a été retenue de *L'Étude de cas 2, Conception d'une soufflerie artisanale*. Elle a été étudiée davantage et adaptée aux autres sous-systèmes de la soufflerie. Par la suite, le produit a été construit et certains tests ont été effectués sur celui-ci.

Le présent rapport fait le sommaire des requis conceptuels et techniques, il fait l'analyse des efforts externes (profil d'aile, génération flux, structure) et internes (systèmes de mesure). Ce document présente également la réalisation du produit ainsi que son processus de fabrication et certains tests qui ont été effectués. Un tableau synthèse des pièces et du produit ainsi que plusieurs dessins techniques et schémas sont également présentés.

Sommaire des requis conceptuels et techniques

Description, données et restrictions

Le présent rapport se concentre sur l'analyse du sous-système de la mesure de la portance. Premièrement, cette partie du produit est sujette à certaines restrictions dictées par le client. Celui-ci a exprimé certains besoins qui ont été analysés en détail dans *l'Étude de cas 1*. Essentiellement, cette étude révèle que le produit doit être reproductible facilement, doit être fonctionnel (adapté au milieu scolaire et facilement transportable) et doit être pédagogique. Il doit être polyvalent et doit permettre la prise de mesures de qualité. Aussi, le coût est une contrainte non négligeable. L'ensemble de la soufflerie doit coûter moins de 1 000\$ à produire. La conception du sous-système a été basée sur ces critères :

- L'utilisation de matériaux et d'instruments facilement accessible simplifie la reproduction du produit;
- L'utilisation de grillages et de plexiglas dans les zones critiques permet un usage sécuritaire de la soufflerie en milieux scolaires;
- L'ensemble de la soufflerie est démontable, elle est donc transportable facilement;
- Les systèmes d'attache permettent une utilisation polyvalente de la soufflerie, plusieurs objets peuvent être placés dans la soufflerie, plusieurs angles d'attaques peuvent être testés sur un profil d'aile;
- La soufflerie permet la mesure de la portance ainsi que la mesure de la traînée.

Deuxièmement, afin de rendre possible la fabrication du sous-système, certains requis ont été transmis aux équipes de travail se concentrant sur les autres sous-systèmes de la soufflerie, les voici :

- Une grande vitesse de flux d'air: Une vitesse de flux d'air minimale assure la visibilité de la force de traînée sur l'échelle du dynamomètre. Un flux d'air trop faible ne générerait pas assez de traînée;
- Un flux d'air laminaire (Situation idéale quasi impossible);
- Un flux d'air minimalement turbulent : Le flux d'air doit être le moins turbulent possible afin d'assurer la validité des résultats. Un flux d'air trop turbulent réduirait énormément la portance de l'aile. Le calcul du coefficient de portance serait donc faussé. Il en serait de même pour la traînée;
- Un faux fond : Un faux fond réduit la force de traînée engendrée en réduisant la surface de l'équipement exposée au flux d'air. Seuls les éléments essentiels se situent à l'intérieur de la veine d'essai, c'est-à-dire la tige supportant le profil et une partie du support de tige;
- Un faux fond transparent : Permet la lecture de la mesure de portance;
- Un côté ouvert pour le faux fond : permet une meilleure visibilité de la mesure de traînée sur le dynamomètre;
- Un crochet au plafond : Dispositif permettant l'attache de certains véhicules spéciaux. (Ex. : fusée);

- Une veine d'essai transparente : Permet la visibilité de l'expérience;
- Un trou oblong dans le faux fond : permet le passage et le déplacement de la tige supportant le profil d'aile.

Suppositions, hypothèses de départ et interprétation

La conception du produit prend en compte certaines hypothèses. Ces considérations permettent de simplifier les calculs de résistance des matériaux contenus dans le rapport. On suppose un écoulement d'air laminaire afin de simplifier la situation. Aussi, on néglige le poids de l'objet testé ainsi que celui de la tige. On suppose également que les matériaux utilisés sont continus, homogènes et isotropes. On présume aussi que les contraintes dans la colle sont négligeables, et que la force de portance qui tend à réduire le poids de l'ensemble est négligée.

Analyse – Efforts externes du profil d'aile

Suppositions, données et restrictions :

Vitesse du vent :

- Nous prenons pour acquis que la vitesse du vent maximale avant la tuyère est de 16.5m/s, car c'est une donnée qui nous a été fournie par l'équipe de génération de flux d'air.

Aire d'entrée de l'air	Aire de sortie de l'air (veine d'essai)
$35.6\text{cm} \times 35.6\text{cm} = 0.1267\text{m}^2$	$25\text{cm} \times 25\text{cm} = 0.0625\text{m}^2$

Tableau 1: Donnée de la tuyère selon équipe 2

$$\text{Rapport d'aire} = \frac{A_{\text{entrée}}}{A_{\text{sortie}}} = 2.0272$$

Donc le rapport de vitesse à l'entrée de la tuyère et à sa sortie devrait être inversement proportionnel à celui-ci :

$$\text{Rapport de vitesse} = 2.0272 = \frac{V_{\text{sortie}}}{V_{\text{entrée}}}$$

$$V_{\text{sortie}} = 16.5 * 2.0272 = 33.50\text{m/s}$$

La vitesse du vent ci-dessus est cependant une vitesse limite du système. Nous nous attendons plus à une vitesse d'environ 20m/s.

Superficie du profil

- Puisque la corde est constante sur toute l'envergure du profil et que la superficie correspond à la projection de l'aile dans le plan :

$$S = cb$$

S: Superficie ou "wing area" (m²)
c: Corde (m)
b: envergure du profil (m)

- *Hypothèse* : La veine d'essai a une section de 25 cm par 25 cm, je suppose que l'envergure des profils sera 2 cm moins longue que la largeur de la section

$$b = 25 - 2 = 23 \text{ cm} = 0,23 \text{ m}$$

- *Hypothèse* : On suppose que la corde du profil sera au maximum aussi longue que 40cm. Puisqu'une corde plus élevée augmente les contraintes dans les matériaux, on utilise la valeur maximale pour nos calculs.

$$c = 0.40\text{m}$$
$$S = 0,0920 \text{ m}^2$$

Portance

- *Données* : La portance d'un profil d'aile dépend de plusieurs caractéristiques de celui-ci :
 - Plus la cambrure d'un profil d'aile augmente, plus la portance maximale augmente.
 - Un profil plus épais génère plus de portance qu'un profil mince. Par épaisseur ici nous entendons la distance entre l'intrados et l'extrados du profil.
 - Plus l'angle d'incidence augmente, plus la portance augmente, jusqu'à l'arrivée du décrochage

<http://www.odpf.org/antérieures/xi/gr-10/memoire.pdf>

- *Hypothèse* : On prend pour acquis un nombre de Reynolds inférieur à 200000. Pour arriver à ces résultats, il a fallu calculer le calculer de la façon suivante :

Où :

$$Re = \frac{\rho V l}{u}$$

V=Vitesse de l'air

l=corde

ρ =densité de l'air

u=viscosité dynamique de l'aire

- *Hypothèse* : Grâce au site <http://airfoiltools.com/>, nous avons pu déterminer que notre nombre de Reynolds maximal serait dans les environs de 250000.Également, selon nos sources, il a été défini que notre soufflerie n'aurait pas un écoulement laminaire, donc la catégorie dans laquelle nous l'avons mise est celle des « dirty wind tunnels ». Ce choix est justifié en raison de l'absence de section pour rendre l'écoulement laminaire dans notre soufflerie.
- *Données* : Le coefficient de portance est en fonction de l'angle d'incidence et de la forme du profil.
- *Hypothèse* : Les meilleurs profils trouvés grâce aux recherches ont un coefficient de portance maximum de 2.25 ce que nous utiliserons pour nos calculs de réalisation.

Profil d'aile	$C_L = 2.25$ $C_L \text{ max}$
NASA SC-1010	1.3
S1223	2.25
NACA 63-210	1.0

Tableau 2: Coefficients de portance des différents profils

Référence : <http://airfoiltools.com/>

- *Hypothèse* : La vitesse du flux d'air est théoriquement d'environ 20 m/s (donnée fournie par l'équipe de génération de flux d'air). Nous prenons d'ailleurs pour hypothèse une densité de l'air qui est de 1.184kg/m³ (À 25 degrés Celsius). Ce qui fait que la portance sera en fonction de cette relation :

$$L = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_L$$

ρ : Densité de l'air $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$

v : vitesse du flux $\left(\frac{m}{s}\right)$

C_L : Coefficient de portance

$L = \text{Portance (N)}$

Traînée du profil d'aile

- *Données* : La traînée d'un profil d'aile dépend de plusieurs caractéristiques de celui-ci :
 - Plus la cambrure d'un profil d'aile augmente, plus la traînée maximale augmente.
 - Un profil plus épais génère plus de traînée qu'un profil mince. Par épaisseur ici nous entendons la distance entre l'intrados et l'extrados du profil.
 - Plus l'angle d'incidence augmente, plus la traînée augmente, même avec l'arrivée du décrochage
- *Données* : Le coefficient de traînée est en fonction de l'angle d'incidence et de la forme du profil.
- *Hypothèses* : La vitesse du vent et la densité seront les mêmes préalablement établies. Le coefficient de traînée minimal sera celui choisi pour les conditions critiques sur notre profil d'aile, car nous souhaitons pouvoir déterminer la plus petite mesure que nous serons en possibilité de prendre lors des essais avec les conditions d'utilisation. Cependant, il faudra prendre le coefficient de traînée correspondant au coefficient de portance choisi pour le profil idéal calculé en fonction du site airfoiltools.com. Pour le coefficient de portance de 2.25 vu précédemment, le coefficient de traînée correspondant est de 0.04. Cependant, le coefficient de traînée maximal pour nos profils générés est de 0.10.
- La traînée découlant du coefficient de traînée est calculée à partir de cette relation :

$$D = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_d$$

C_d : Coefficient de traînée

D = Traînée

Description des charges, schémas et diagrammes de corps libres :

Schéma d'un profil d'aile, avec différentes caractéristiques

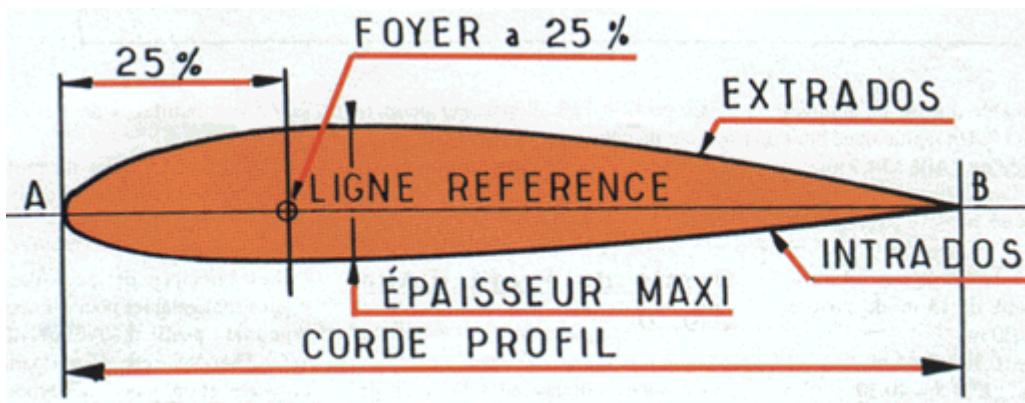
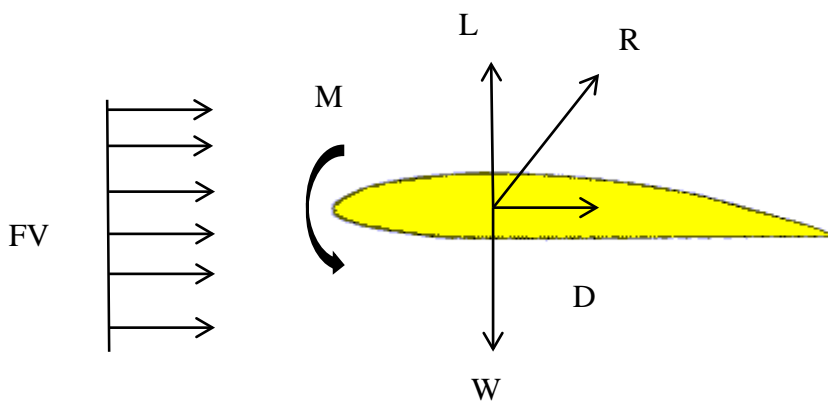


Figure 1: Paramètre d'un profil d'aile

- Épaisseur maximale = |Extrados max| – |Intrados max|
- Foyer est le centre aérodynamique et se situe généralement au quart de la corde à partir du bord d'attaque en vitesses subsoniques, ce qui est notre cas. (Ion Paraschivoiu : *Aérodynamique Subsonique*, Éditions de l'école polytechnique de Montréal)



Où :

- FV=Force du vent
- MP=Moment piqueur
- L=Portance
- D=Traînée
- RA=Résultante aérodynamique
- W=Poids du profil

Figure 2: Profil d'aile dans un écoulement

Schéma de distribution de la pression d'air

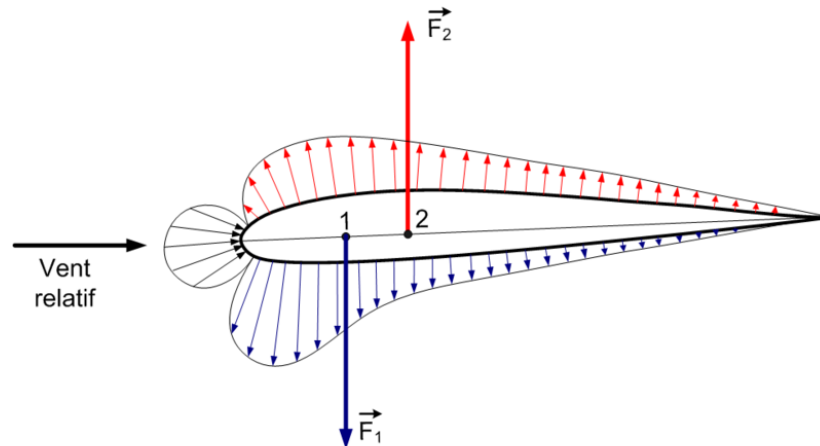


Figure 3: Distribution de pression sur un profil

- Ici, on voit bien que la portance résultante sera $F_2 - F_1$. Par contre, il y a également un moment créé par ces deux forces, ce qu'on appelle le moment piqueur. Celui-ci est dû à la distribution de part et d'autre du profil d'aile de la pression qui est distribuée asymétriquement. Le centre de pression n'étant pas le même à l'extrados et à l'intrados, ce moment piqueur sera créé.
- Pour contrer ce moment piqueur, il faudra choisir judicieusement l'endroit où l'on fixe le profil d'aile, de manière à annuler l'effet de ce moment. Si le moment tend à faire piquer l'avion vers le bas, il faudra fixer le profil devant le foyer, pour que la réaction aux appuis vienne annuler le moment.

Résultats anticipés et graphiques de différentes configurations

- Pour l'élaboration du concept de notre profil d'aile, on a vu que l'on avait une certaine maniabilité avec la longueur de la corde, car la veine d'essai est de 60cm de long. On a également vu que la portance est proportionnelle à la superficie du profil d'aile, donc voici un graphique représentant la portance en fonction de la variation de la longueur de la corde pour une liste de profils préalablement choisis en fonctions de leur coefficient de portance.

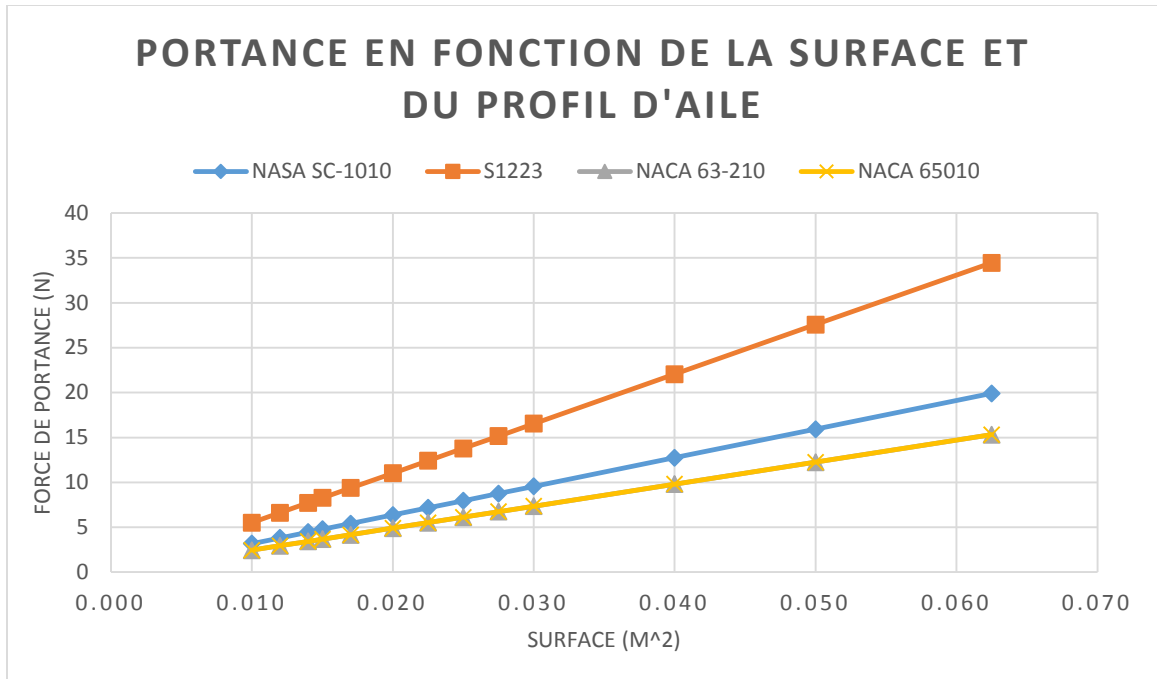


Figure 4: Portance en fonction de la surface et du profil d'aile

- On peut également voir la différence de portance en fonction du coefficient de portance différent de chacun des profils choisis :

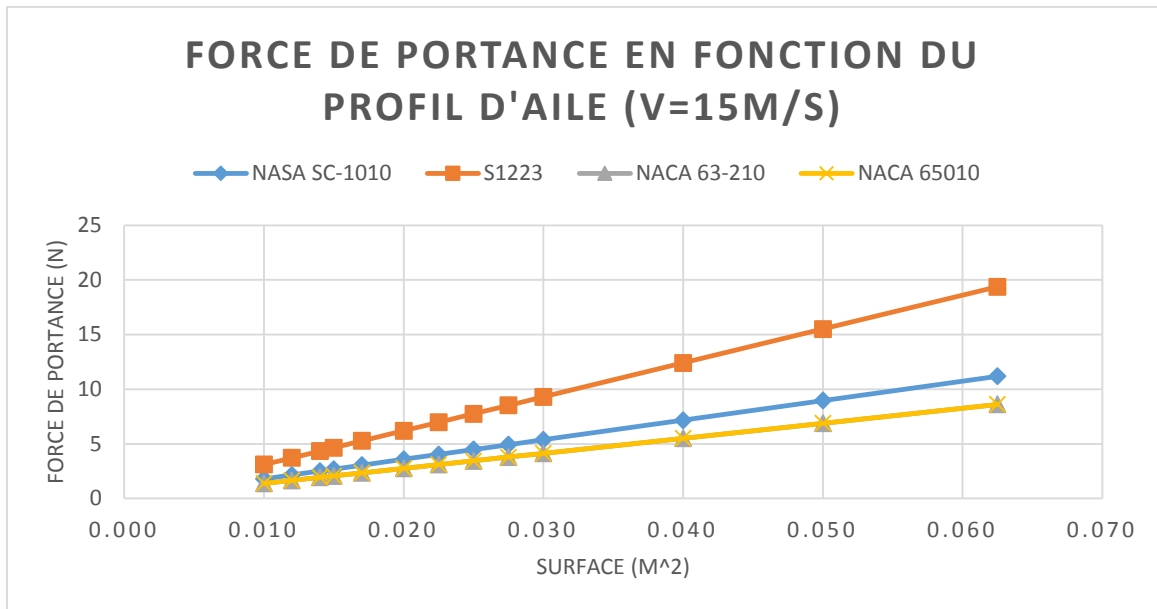


Figure 5: Force de portance en fonction du profil d'aile à 15m/s

- Puisque notre équipe a l'intention de mesurer la traînée, il est donc nécessaire de voir comment la variation de la longueur de la corde et de la vitesse de l'écoulement vont influencer la traînée.

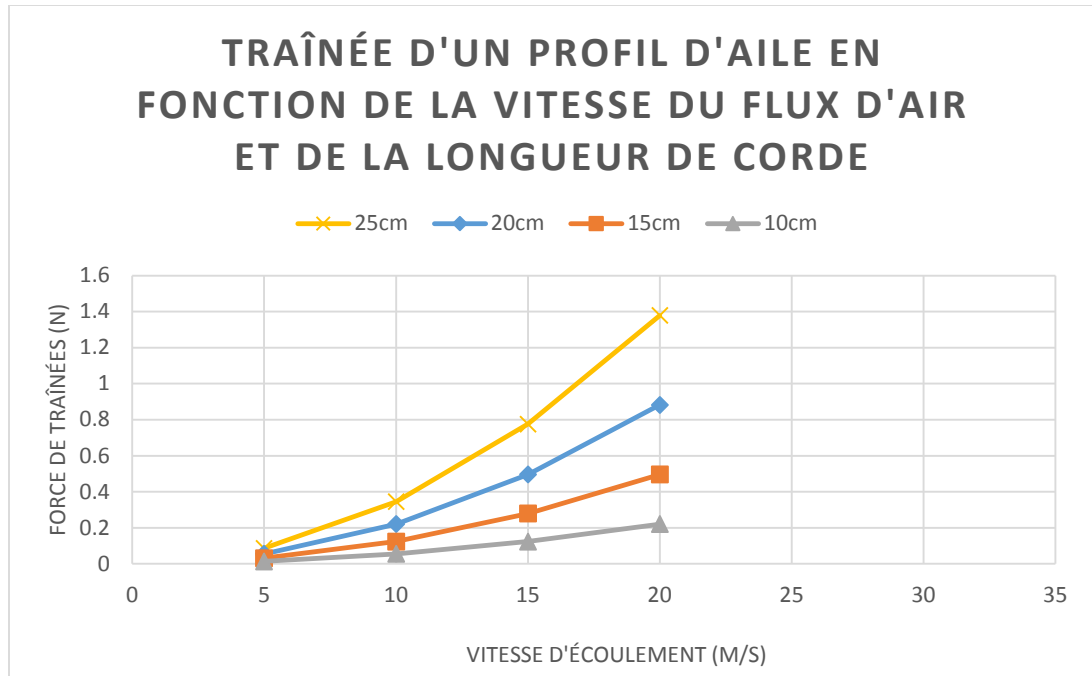


Figure 6: Traînée d'un profil d'aile en fonction de la vitesse du flux d'air et de la longueur de corde

Note : Le profil utilisé pour ce graphique est avait un coefficient de traînée de 0.09

- Avec ces informations, il est évident qu'il faudra maximiser la superficie du profil à tester, son coefficient de portance et son emplacement de fixation pour réduire le moment piqueur.

Analyse – Efforts internes

Dans cette section, les données décrites peuvent être absolues ou en fonction du diamètre de la tige. Les équations, schémas et variables sont détaillés dans l'Annexe F. Plusieurs hypothèses ont été faites afin de déterminer les conditions limites, les chargements, les contraintes maximales du système. Le tableau ci-dessous résume les plus importantes.

Hypothèse	Justification
L'envergure des profils sera au moins 2 cm plus courte que la largeur de la section.	Les profils doivent pouvoir être entrés facilement dans la veine d'essai.
L'envergure des profils testés ne dépassera pas 40 cm.	Un profil plus long risquerait d'être instable sur le système d'attache.
Le coefficient de portance maximal est de 2,25.	Le meilleur profil trouvé lors de nos recherches a ce coefficient maximal.
La tuyère est idéale (isentropique) et l'évolution est quasi-statique.	C'est dans ces conditions que la vitesse de l'écoulement serait maximale.
La densité de l'air est constante.	La vitesse de notre écoulement n'est pas très grande. (faible variation de la densité)
La tige filetée est assimilable à un cylindre infini perpendiculaire à l'écoulement.	La tige est de forme cylindrique et la traînée supplémentaire due aux filets est faible (à basse vitesse).
Le poids de la tige est négligeable.	Calculs justificatifs en Annexe
Le poids du profil est négligeable.	Calculs justificatifs en Annexe
Les matériaux sont continus homogènes et isotropes.	Hypothèses de base de résistance des matériaux
Avant l'application des charges, il n'y a pas de forces internes dans les matériaux.	Hypothèse de base de résistance des matériaux
La contrainte normale du chargement uniaxial est répartie uniformément sur la section.	Hypothèse commune en résistance des matériaux
La colle peut supporter les mêmes contraintes que si elle était appliquée sur de l'acrylique (contrainte de cisaillement) ou de l'aluminium (contrainte normale en tension).	Ces contraintes permises sont les plus faibles fournies par le fabricant.

Tableau 3: Hypothèses utiles à l'analyse des efforts internes

Les conditions limites composées de la portance maximale du profil, de sa traînée maximale et de la traînée maximale de la tige ont été déterminées grâce aux équations suivantes :

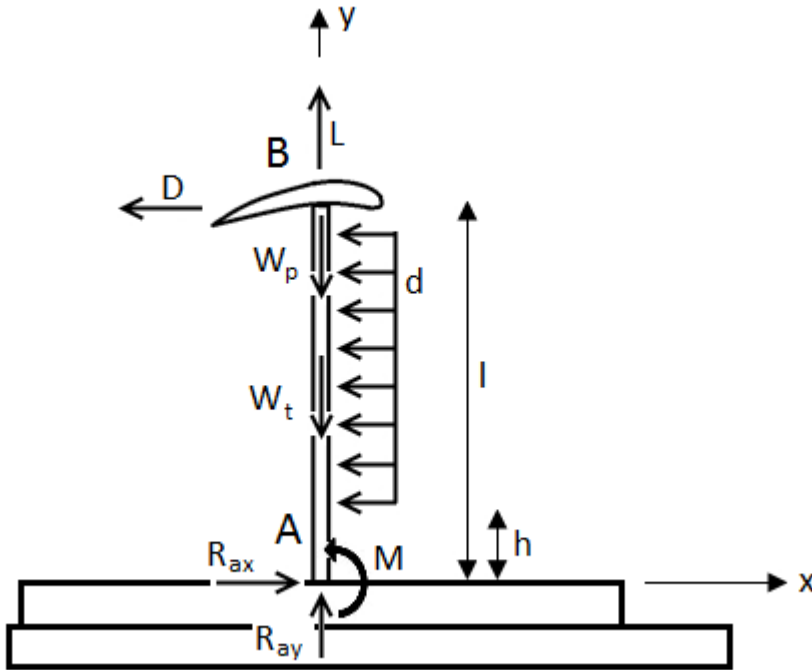
$$L = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_L$$

$$D = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_d$$

C'est la comparaison des poids de la tige et du profil avec la portance maximale qui permet de déterminer qu'ils sont négligeables.

Le schéma suivant est un diagramme de corps libre (DCL) du système et sert à calculer les réactions aux appuis grâce à l'équilibre.

Figure 7: DCL de la tige support



Les équations d'équilibre ont été utilisées pour déterminer les réactions aux appuis. Pour déterminer la contrainte normale exercée dans la tige par la tension, un DCL d'une section de la tige a été utilisé (Voir Annexe F). L'équation de la contrainte normale en tension est la suivante :

$$\sigma_{y(u)} = \frac{F}{A}$$

Le schéma à droite est composé du diagramme de corps libre (DCL), du diagramme d'effort tranchant (DET) et du diagramme de moment fléchissant (DMF) de la tige en flexion. On constate que le moment fléchissant maximal et l'effort tranchant maximal se situent au niveau de l'encastrement. Les équations suivantes ont été utilisées pour déterminer les contraintes maximales causées par la flexion.

$$\sigma_{y(f)} = -\frac{Mx}{I_z}$$

$$\tau_{yx} = \frac{VQ_{z,A'}}{I_z b}$$

La contrainte normale maximale correspond à la superposition des contraintes maximales.

$$\sigma_{y(t)max} = \sigma_{y(u)} + \sigma_{y(f)max}$$

Le schéma suivant présente une coupe de la section critique c'est-à-dire une coupe de la tige ainsi que les contraintes présentes. Les valeurs sont maximales au niveau de l'encastrement. On remarque que le plan neutre n'est pas le plan YZ puisque l'on a superposé deux modes de chargements dont la répartition de la contrainte est différente.

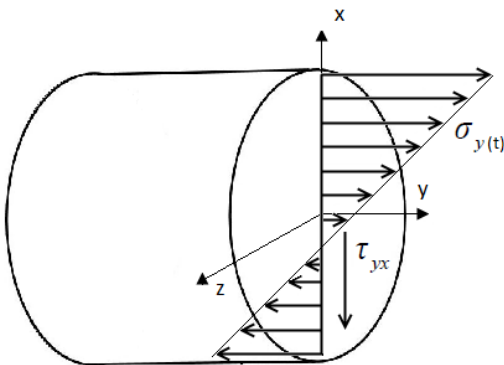


Figure 8: Illustration des contraintes dans la tige

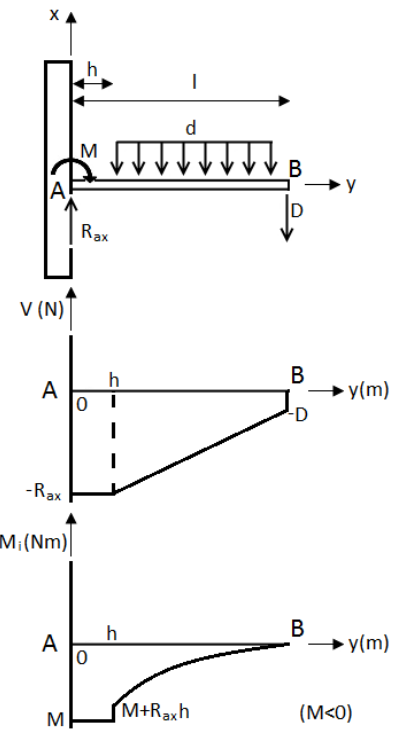


Figure 9: Diagrammes de poutres en flexion

Le diagramme de corps libre suivant sert à déterminer les efforts exercés dans la colle sous la plaque de l'encastrement.

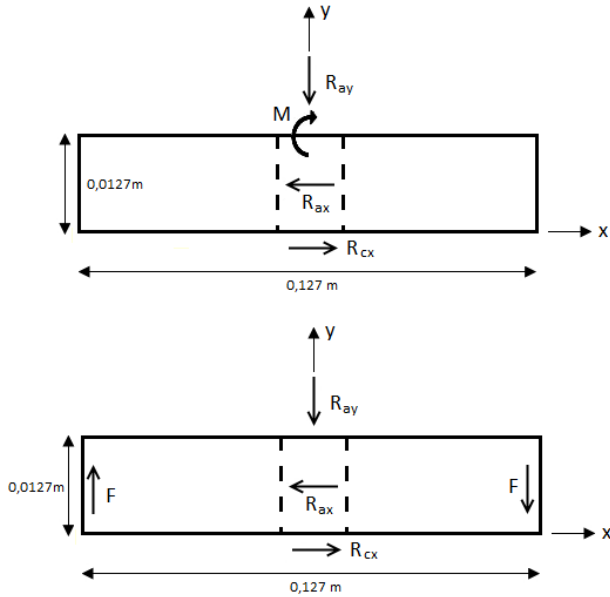


Figure 10: DCL de la plaque

En calculant les contraintes dans la colle, on a pu déterminer qu'elles seraient négligeables comparées à celles permises puisque le diamètre de la tige ne serait pas très grand (Voir Annexe F).

Le tableau suivant résume les contraintes maximales selon le diamètre de la tige, les contraintes maximales permises et les limites sur le diamètre de la tige.

Contrainte	Valeur en fonction de d_t (Pa)	Contrainte maximale permise (MPa)	Source	Limite sur le diamètre de la tige
τ_{yxmax}	$-\frac{21,36}{d_t^2} - \frac{400,9}{d_t}$	250	(Engineering Toolbox, sans date)	$d_t \geq 0,3 \text{ mm}$
$\sigma_{y(t)max}$	$\left(\frac{10,59}{d_t^3} + \frac{292,05}{d_t^2}\right)$	250	(Engineering Toolbox, sans date)	$d_t \geq 3,6 \text{ mm}$
$\sigma_{ymax(colle)}$	$9\,213,2 + 5369,2d_t$	13,4	(Henkel, 2010)	$d_t \leq 2\,494 \text{ m}$
$\tau_{colle(plaque)}$	$390 + 7320d_t$	5	(Henkel, 2010)	$d_t \leq 683 \text{ m}$
$\tau_{colle(membrane)}$	$19500 + 366017d_t$	5	(Henkel, 2010)	$d_t \leq 13,6 \text{ m}$

Tableau 4: Différentes contraintes, leur équation et leur valeur maximale

On y a remplacé le moment par un couple de forces situées aux extrémités de la plaque. Les contraintes exercées dans la colle sont déterminées par la répartition des efforts sur la surface de colle. On procède de la même manière pour déterminer la contrainte de cisaillement dans la colle sous la membrure en L. Le DCL simplifié de ce système est le suivant.

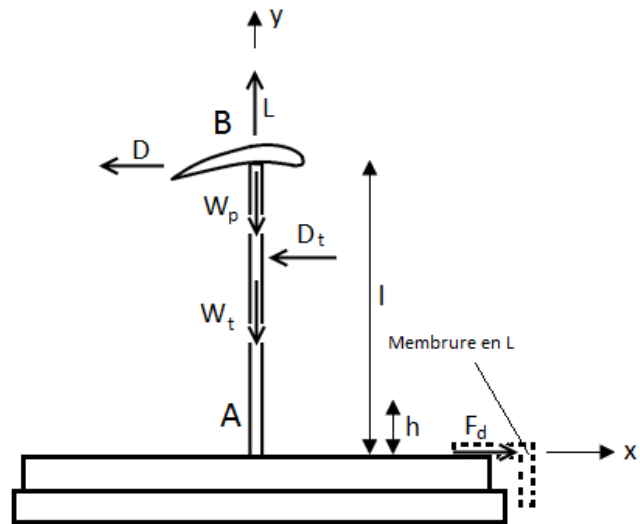


Figure 11: DCL simplifié du système de mesure

Le graphique suivant présente la contrainte de cisaillement et normale maximales exercées dans la tige selon son diamètre.

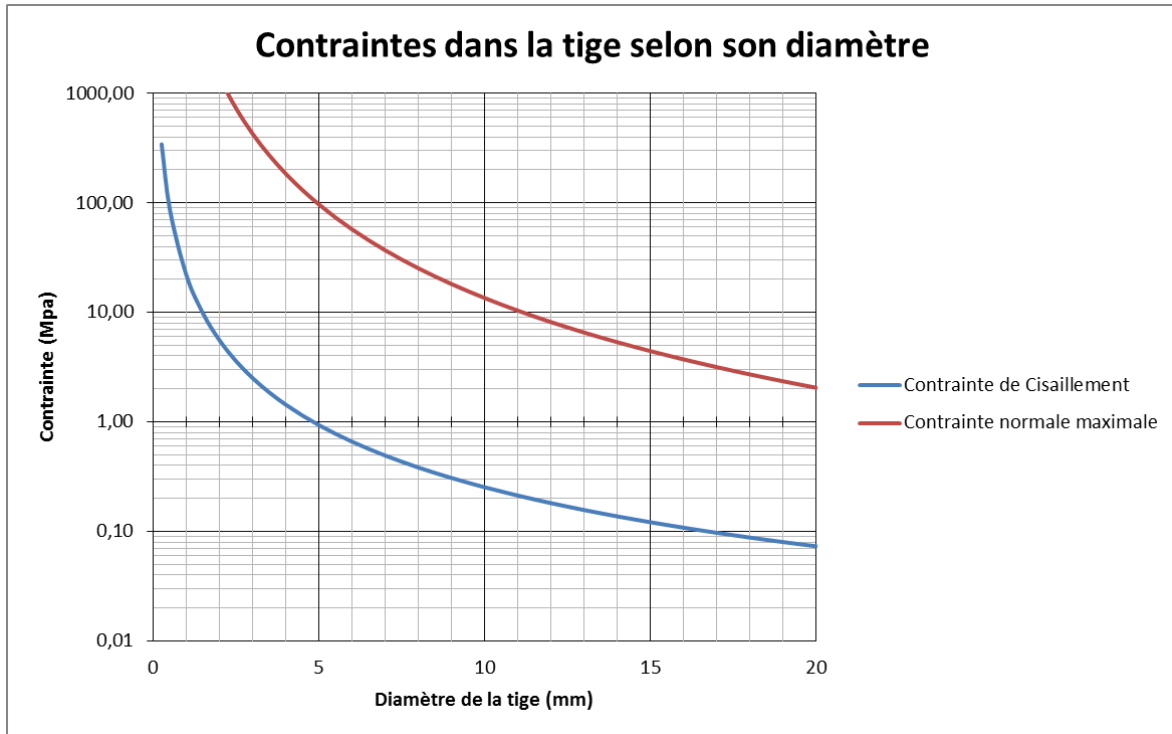


Figure 12: Contraintes dans la tige en fonction du diamètre

La contrainte limitant le diamètre de la tige est la contrainte normale maximale. En effet, si l'on calcule le diamètre minimal requis pour respecter la contrainte permise, on obtient un diamètre de 3,6 mm. Pour s'assurer de choisir un diamètre adéquat nous avons appliqué un facteur de sécurité de 1,5 aux contraintes. Ce facteur est la norme habituelle en aéronautique (Transport Canada, 2013). Le diamètre minimal ainsi obtenu est de 4,1 mm.

Essieux

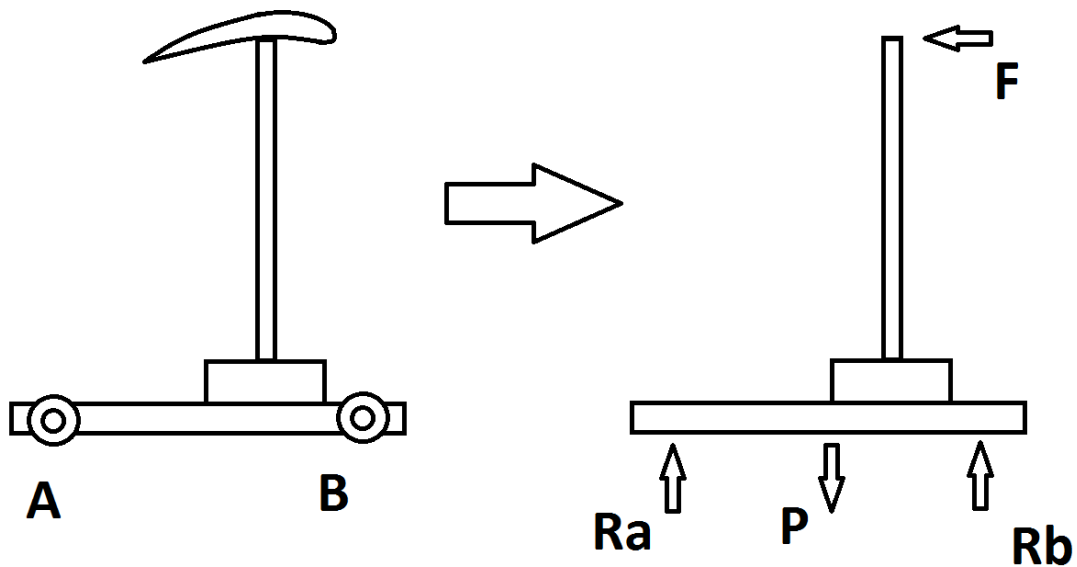


Figure 13: Schéma du système de mesure

Hypothèses :

- La force de portance qui tend à réduire le poids de l'ensemble est négligée.
- Le centre de masse est obtenu avec un rapport de poids et de centre de masse de la balance et des autres composantes qui sont décentrées par rapport à celle-ci.
- Le poids des tiges elles-mêmes n'entre pas dans les calculs.
- Le profil d'aile crée une traînée maximale de 5.0N surévaluée avec un flux d'air de 30 m/s et une envergure maximale.
- La hauteur de la tige est la hauteur maximale que l'on possède pour maximiser le moment.
- Les filets présents sur les tiges ne sont pas considérés.

4 forces agissent sur l'assemblage balance/profil/composantes :

- F : Force de traînée créée sur le profil d'aile dû au flux d'air.
- P : Poids de la totalité de l'assemblage.
- Ra : Force reprise par le roulement à billes A.
- Rb : Force reprise par le roulement à billes B.

2 équations ($\sum F_y$ et $\sum M_a$) et 2 inconnus (Ra et Rb).

$$\sum F_y = 0$$

$$\rightarrow -P + R_a + R_b = 0$$

$$\rightarrow R_a = P - R_b \quad \textcircled{1}$$

Où P est la somme des masses listées ci-dessous :

- Profil d'aile le plus lourd (NACA SC2-1010) : 34g
- Penture + vis + boulon + élastique : 40g
- Tige la plus longue : 29g
- Tube de laiton : 33g
- Vis du tube de laiton : 7g
- Plaque de bois : 135g
- Balance : 210g
- Équerre en « L » qui tient le crochet suivant : 15g
- Crochet et boulons qui tiennent le dynamomètre : 9g

$$P = \sum \text{masses} * g = 0.512 \text{ Kg} * 9.81 = 5.0 \text{ N.}$$

$$\sum M_a = 0$$

$$\rightarrow -D1 * P + D2 * R_b + D3 * F = 0$$

$$\rightarrow D2 * R_b + D3 * F = D1 * P \text{ (2)}$$

Où D1, D2 et D3 sont les bras de levier de chacune des forces (la distance séparant la force du point A où est calculé l'équilibre).

Le poids de la balance est à 2¼" de Ra, alors que le poids du reste des composantes est à 3¼". La balance pèse 210g et le reste 300g.

$$D1 = (210 * 2\frac{1}{4} + 300 * 3\frac{1}{4}) / 510 = 2.838" = 72.1 \text{ mm}$$

$$D2 = 4\frac{1}{2}" = 114.3 \text{ mm}$$

$$D3 = 7" = 177.8 \text{ mm}$$

Avec (2) il est possible d'isoler Rb.

$$R_b = (D1 * P - D3 * F) / D2$$

$$R_b = (72.1 * 5.0 - 177.8 * 5.0) / 114.3 = -4.62 \text{ N}$$

On voit que le moment est assez puissant pour soulever l'assemblage et la force Rb causée par les rails est vers le bas et non vers le haut.

Avec (1) et Rb il est possible d'isoler Ra.

$$R_a = P - R_b$$

$$R_a = 5.0 - (-4.62) = 9.62 \text{ N.}$$

Comme la tige en Ra reprend la plus grande force, les calculs seront faits à cet endroit.

Ra et Rb sont chacun repris équitablement par deux roulettes (le poids est au centre et le flux agit perpendiculairement à l'axe reliant les deux roulettes).

Pour Ra

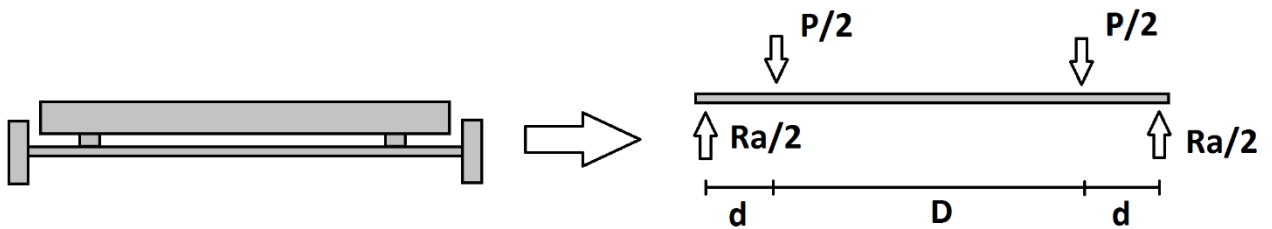


Figure 14: Schéma d'un essieu et des forces appliquées

Où $d = 47.6\text{mm}$ et $D = 79.4\text{mm}$.

Pour des raisons de symétrie évidentes, les deux forces P sont égales.

$$\sum F_y = 0$$

$$\rightarrow -P/2 - P/2 + R_a/2 + R_a/2 = 0$$

$$\rightarrow P = R_a = 9.62 \text{ N}$$

Premier test : Si la tige résiste au moment fléchissant maximum et à l'effort tranchant maximum.

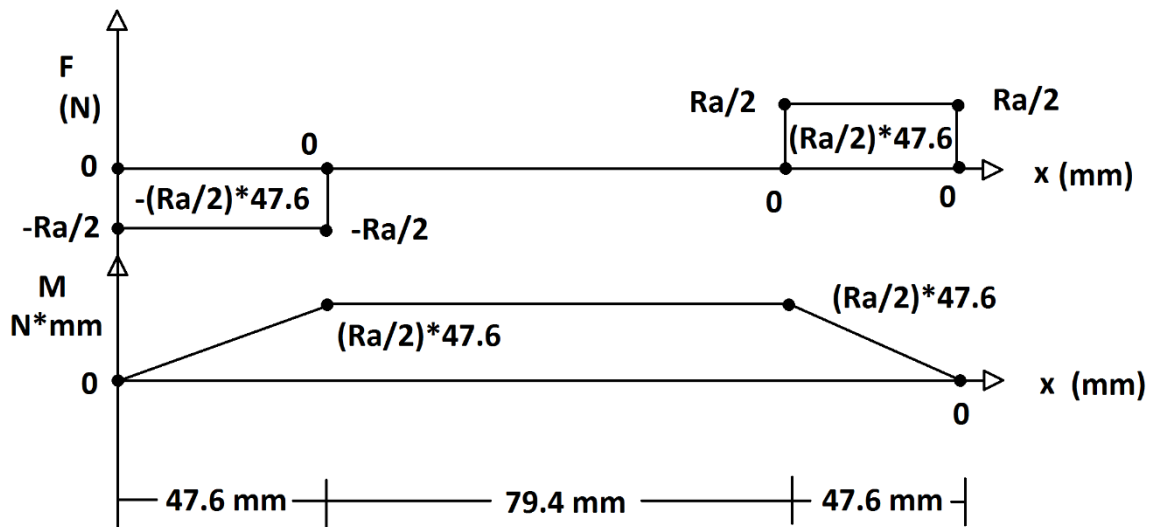


Figure 15: Graphiques des efforts tranchants et moments fléchissants en fonction de la distance de l'extrémité gauche de la tige

On voit, par les graphiques, que l'effort tranchant maximum est $Ra/2 = 4.81$ N.

Le moment fléchissant maximum est $(Ra/2)*47.6 = 228.956$ N*mm.

Contraite de cisaillement maximale dans la tige : $\sigma = (M_{\max} * r) / I$

I : Second moment de section = $(\pi * r^4) / 4 = (\pi * (3.175 \text{ mm})^4) / 4 = 79.81 \text{ mm}^4$.

$\sigma = (228,956 * 3.175) / 79.81 = 9.108$ MPa.

La contrainte maximale de cisaillement permise dans l'acier est : 250 MPa.

(engineeringtoolbox.com)

Il n'y a donc aucun risque que la tige cède à cause d'une contrainte de cisaillement.

Contraite normale maximale dans la tige (approximation) : $\tau = V_{\max} / A = 4.81 / (\pi * 3.175^2) = 0.1519$ MPa.

La contrainte maximale normale permise dans l'acier est : 250 MPa.

(engineeringtoolbox.com)

L'approximation est très loin de la valeur critique de la contrainte, donc on déduit que la valeur réelle l'est tout autant. Il n'y a donc aucun risque que la tige se déforme à cause d'une contrainte normale.

Second test : Si l'angle de déformation aux extrémités de la tige est tolérable.

Équations de singularité :

$$q(x) = Ra/2\langle x \rangle_{-1} - P/2\langle x - 47.6 \rangle_{-1} - P/2\langle x - 127 \rangle_{-1} + \dots$$

$$-V(x) = Ra/2\langle x \rangle^0 - P/2\langle x - 47.6 \rangle^0 - P/2\langle x - 127 \rangle^0 + \dots$$

$$M(x) = Ra/2\langle x \rangle^1 - P/2\langle x - 47.6 \rangle^1 - P/2\langle x - 127 \rangle^1 + \dots$$

$$E \cdot I \cdot \Phi(x) = Ra/4\langle x \rangle^2 - P/4\langle x - 47.6 \rangle^2 - P/4\langle x - 127 \rangle^2 + \dots + C_1$$

Où $\Phi(x)$ est la pente de la flèche de la tige à une distance x de l'extrémité gauche de cette même tige.

Comme le chargement est symétrique de part et autre du centre de la tige, on déduit que cette pente est nulle en son centre ($x = 87.3\text{mm}$).

$$\Rightarrow E \cdot I \cdot \Phi(0) = 9.62/4 \cdot \langle 87.3 \rangle^2 - 9.62/4 \cdot \langle 87.3 - 47.6 \rangle^2 - 9.62/4 \cdot \langle 87.3 - 127 \rangle^2 + C_1$$

$$\Rightarrow C_1 = -14\,539 \text{ Nmm}^2$$

E : Module d'élasticité pour l'acier = 210 000 N/mm². (simulationmatériaux.com, Propriétés des matériaux)

Avec C_1 , E et I on peut calculer la pente de la flèche à l'extrémité gauche de la tige ($x = 0$).

$$\Rightarrow 210000 \cdot 79.81 \cdot \Phi(0) = 9.62/4 \cdot \langle 0 \rangle^2 - 9.62/4 \cdot \langle 0 - 47.6 \rangle^2 - 9.62/4 \cdot \langle 0 - 127 \rangle^2 - 14\,539$$

$$\Rightarrow \Phi(0) = -0.00086746$$

Comme prévu, la tige a une pente négative à son extrémité gauche et tend à former un « U ».

Conversion de la pente en inclinaison en degré : $\tan^{-1}(-0.00086746) = -0.050^\circ$.

De la même façon, on calcule que si une tige d'un diamètre de 1/8 " avait été utilisée, l'angle aux extrémités aurait été de -0.80° .

Comme démontré, il n'y a aucun danger que la tige ne cède ou qu'elle fléchisse de façon trop prononcée, car sa déformation et ses contraintes internes restent très petites même avec une surestimation du chargement.

Une tige de diamètre 1/4" est donc un bon choix pratique, car elle permet un facteur de sécurité très élevé contre les incidents, est légère, est facilement retrouvable et possède un volume réduit.

Réalisation – Profils d’aile et systèmes de mesure

Plusieurs profils ont été retenus et fabriqués puisque le coût de fabrication était relativement bas. Ceci permet de tester différents profils dans les mêmes conditions afin de vérifier la validité des résultats obtenus. Les profils NACA 63-210, NASA SC-1010 ainsi que S1223 ont été sélectionnés. (Voir annexe pour graphique des profils) Ces profils ont été choisis en raison de leur coefficients de portance variés: un grand (>2), moyen (~ 1.5) et faible (~ 1). Ils permettront de tester le système de collecte de données avec différentes portances et traînée. Afin de maximiser la mesure de portance, le profil S1223 sera utilisé pour rivaliser avec les autres équipes.

Calculs, choix et justifications

Les profils d’aile sont conçus avec l’envergure maximale que la soufflerie peut accueillir : c’est-à-dire 23cm. 1cm de jeu existe de chaque côté afin de pallier à l’incertitude de fabrication et aux déplacements du profil causé par les vibrations.

Afin de générer le plus de portance lors des essais, l’angle d’attaque de chaque profil est optimisé. Les angles optimisés sont déterminés grâce à *Airfoil Tools* : une base de données en ligne d’informations sur les différents profils d’aile.

Les graphiques de chaque profil illustrent les relations entre le coefficient de portance et celui de traînée, le coefficient de portance et l’angle d’attaque, le centre de masse et l’angle d’attaque ainsi que le coefficient de traînée et l’angle d’attaque. (Voir les graphiques en annexe.)

Les performances attendues ont été calculées selon les hypothèses formulées précédemment. Les graphiques suivants illustrent les valeurs de portance calculées à partir des coefficients de portance trouvés sur *Airfoil Tools*.

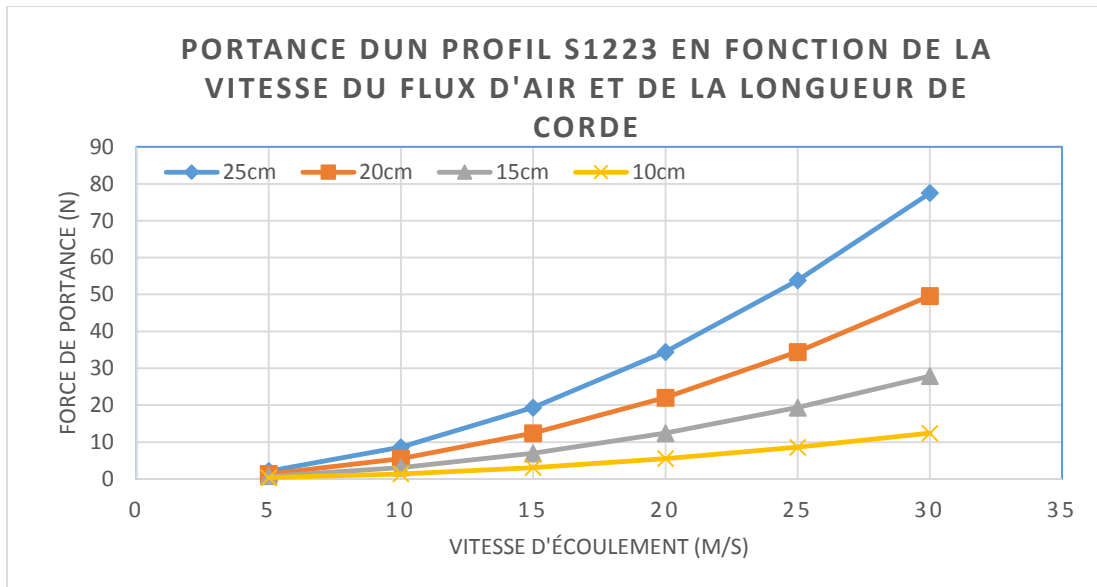


Figure 16: Portance d'un profil S1223 en fonction de la vitesse du flux d'air et de la longueur de corde

Le graphique ci-haut illustre bien que la portance est maximisée lorsque la corde est maximale. Dans le cas ci-haut, le profil est assumé carré : c'est-à-dire que la corde est égale à l'envergure. Or dans le cas de notre soufflerie, il serait possible d'augmenter l'aire du profil en augmentant la corde et en fixant l'envergure au maximum possible. Ce maximum a été fixé à 23cm. Le cm de jeu de chaque côté du profil permet un certain déplacement du profil à l'intérieur de la soufflerie.

En supposant une aile carrée, on peut estimer les forces de portance et de traînée générées.

PROFILS	PORTANCE (N)	
	Max	Min
S1223	34	9
NASA SC-1010	20	5
NACA 63-210	15	4

TABLEAU 5: PORTANCE MINIMALE ET MAXIMALE DES DIFFÉRENTS PROFILS

TRAÎNÉE (N)	
MAX	Min
1.4	0.3

Tableau 6: Traînée maximale et minimale

Ces valeurs sont calculées avec une superficie de 0.0625m² et une vitesse d'écoulement se situant entre 20 et 10m/s

Afin de réduire la traînée causée par le système de mesure lui-même. La majorité de l'assemblage sera « caché » sous un faux fond juste en dessous de la veine d'essai. Ce double fond comporte un trou oblong afin de laisser amplement d'espace au déplacement de la tige. La construction ainsi que la conception ont été attribuées à l'équipe de structure. Les dimensions du système de mesures leur ont été fournies afin qu'ils ajustent les leurs en conséquence.

Le moment piqueur du profil d'aile est neutralisé en fixant l'aile à l'aide de trois vis au centre de masse. Celui-ci étant relativement proche du centre de pression aérodynamique, le bras de levier en est donc réduit à une distance jugée négligeable.

Choix des instruments de mesure

Étant donné le contexte pédagogique de l'utilisation de la soufflerie, la polyvalence de celle-ci doit être assurée. Il est donc probable que d'autres géométries que des profils d'aile soient testées. Différentes géométries ont donc aussi été considérées pour le système de mesure de traînée (ces géométries n'étant pas conçues pour générer de la portance, la mesure de celle-ci est mise de côté). Le tableau suivant illustre différentes géométries ainsi que leur traînée maximale à 20m/s et une surface de 20cm x 20cm.

GÉOMÉTRIE	COEFFICIENT DE TRAÎNÉE	FORCE DE TRAÎNÉE
-----------	------------------------	------------------

		MAXIMALE
SPHÈRE	0.47	4.61
DEMIE-SPHÈRE	0.42	4.12
CÔNE	0.5	1.90
CUBE	1,05	10.29
CUBE À 45°	0.8	7.84
LONG CYLINDRE	0.82	8.04
COURT CYLINDRE	1.15	11.27

Tableau 7: Coefficients de traînée et force maximale de différentes géométries

(UMBC, sans date).

On constate une dichotomie entre l'échelle de traînée des profils d'aile ainsi que celle des géométries variées. Afin de pallier à ce problème, il a été convenu que le dynamomètre serait interchangeable. Ainsi, il pourra être mieux adapté à l'objet testé en soufflerie. Pour les profils d'aile, un dynamomètre de 2.5N suffit et un de 5 ou 10N (selon disponibilité) servira aux autres géométries. L'erreur sur un dynamomètre 2.5N est de $\pm 0.025N$. Sur une mesure de 0.3N cela représente une erreur d'un peu plus de 8%. Sur un dynamomètre 5N, l'erreur est de $\pm 0.05N$ ce qui est plus que suffisant pour les formes grossières. Malgré le fait que l'erreur est supérieure à la norme ($\pm 5\%$), cet outil reste approprié pour une utilisation dans les écoles secondaires.

Pour la mesure de la portance, les mesures en Newton sont converties en grammes afin de déterminer l'échelle de la balance électronique à acheter. Puisque $F = mg$ où on connaît F et g , on peut déterminer la masse affichée par la balance.

PROFILS	PORTANCE (N)		POIDS AFFICHÉ (KG)	
	Max	Min	Max	Min
S1223	34	9	3.5	0.9
NASA SC-1010	20	5	2.0	0.5
NACA 63-210	15	4	1.5	0.4

Tableau 8: Portance et poids affiché sur la balance de différents profils

La balance *Starfrit* a été choisie pour sa capacité (jusqu'à 5kg), sa petitesse ainsi que sa disponibilité. L'incertitude sur une balance électronique est plus ou moins la plus petite unité mesurée. Dans le cas ci-présent, il s'agit du gramme. Ceci représente une erreur de $\pm 2.5\%$ sur la portance la plus faible de 1.5N. C'est une incertitude acceptable inférieure à la norme ($\pm 5\%$).

Fixation des instruments de mesure

Puisque les forces agissant sur le dynamomètre sont relativement faibles, il a été convenu que ce dernier serait attaché à l'aide d'équerres collées à la structure.

Du côté du profil d'aile, le moment piqueur causé par la distance entre le centre de pressions aérodynamiques et le centre de masse est annulé par le moment causé par la distance entre le dynamomètre et la traînée.

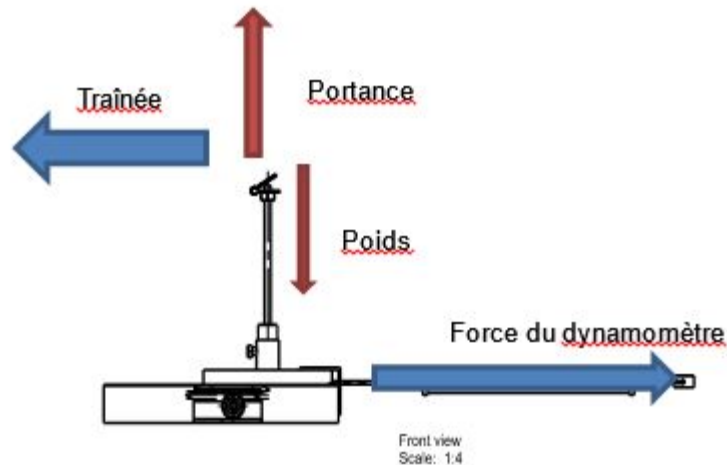


Figure 17: DCL du système de mesure

L'excédent, lorsque ces deux moments ne sont pas égaux, est repris par des rails en U entourant les roulements à billes. Les rails sont en acier et ont été choisis pour leur accessibilité en magasins de grande surface.

Système de support du profil

L'analyse du système de support du profil indiquait qu'un diamètre de la tige fileté de 4,1 mm était suffisant pour répondre aux contraintes maximales estimées. Cependant, les diamètres des tiges filetées en acier présentes sur le marché sont standardisés. Il est possible de s'en faire fabriquer une sur mesure mais les coûts impliqués seraient beaucoup trop élevés pour notre client. Une tige d'un diamètre ¼ de pouce a donc été choisie pour des raisons économiques et pour faciliter son soutien dans le tube de laiton. Le tableau suivant résume les principales dimensions nominales utiles aux calculs.

Tableau 9: Dimensions nominales finales des éléments

Dimension	Système impérial	Système International
Diamètre de la tige	¼ po	0,00635 m
Hauteur de la plus longue tige	6,5 po	0,1651 m
Côtés de la plaque carrée (encastrement)	5 po	0,127 m
Diamètre de l'encastrement	½ po	0,0127 m
Surface de colle (membrure)	½ po X 1 po	0,0127 m X 0,0254m

Grâce aux équations des contraintes maximales selon le diamètre de la tige, on peut déterminer les contraintes maximales prévue aux conditions limites. Le tableau suivant résume ces résultats. Les calculs est équations sont donnés dans l'annexe G.

Tableau 10: Contraintes maximales prévues aux conditions limites

Contrainte	Symbole	Valeur
Normale maximale (Tige)	$\sigma_{y(t)max}$	48,6 MPa
Cisaillement maximale (Tige)	τ_{yxmax}	0,59 MPa
Normale maximale (Colle sous la plaque)	$\sigma_{ymax(colle)}$	0,00925 MPa
Cisaillement maximale (Colle sous la plaque)	$\tau_{colle(plaque)}$	436 Pa
Cisaillement maximale (Colle sous la membrure)	$\tau_{colle(membrure)}$	0,0218 MPa

Le diamètre de la tige étant plus élevé, la contrainte normale maximale devient plus faible ce qui augmente le facteur de sécurité. On passe donc d'un facteur de sécurité de 1,5 à un facteur de 5,1. Une fois le diamètre déterminé, il est possible de calculer les différents efforts maximaux permis selon les contraintes permises. Le tableau suivant présente les efforts maximaux permis. Ces efforts ne prennent pas en compte la superposition des contraintes normales.

Tableau 11: Efforts réels permis

Effort permis	Symbole	Valeur	Limité par
Tension/compression dans la tige	$ F $	$\leq 79,2 \text{ kN}$	$\sigma_{acier(max)}$
Moment fléchissant maximal dans la tige	$ M $	$\leq 6,28 \text{ Nm}$	$\sigma_{acier(max)}$
Effort tranchant maximal dans la tige	$ V $	$\leq 2,97 \text{ kN}$	$\tau_{acier(max)}$
Effort en tension maximal dans la colle (Sous la plaque)	F_{ymax}	$\leq 216 \text{ kN}$	$\sigma_{colle(p)}$
Effort en cisaillement dans la colle (Sous la plaque)	$ F_x $	$\leq 80,6 \text{ kN}$	$\tau_{colle(p)}$
Effort en cisaillement dans la colle (Sous la membrure)	$ F_{xm} $	$\leq 1,61 \text{ kN}$	$\tau_{colle(p)}$

Ces résultats indiquent que notre système de support du profil portant devrait pouvoir supporter les charges prévues par un usage non abusif de la soufflerie puisque les efforts en maximaux prévus sont plus faibles que les efforts permis.

Fabrication et essais

Fabrication du système de mesure de portance

La fabrication du système de mesure de portance a été divisée en quatre étapes différentes et structurées à l'avance pour faciliter le montage et optimiser le temps de fabrication. Voici la liste des étapes :

- Création d'une liste des pièces et matériaux ainsi que les outils utilisés
- Achat des pièces et matériaux
- Réalisation des pièces finales
- Assemblage des sous-systèmes

La réalisation des pièces finales et l'assemblage se sont faits en parallèle pour chacun des sous-systèmes. En effet, chacun des membres de l'équipe préparait et assemblait leurs sous-systèmes pour les mettre ensemble à la fin dans la soufflerie.

Fabrication du profil d'aile

Le profil d'aile a été façonné puis découpé à partir d'un bloc de Styrofoam. Avec un profil choisi et imprimé à l'ordinateur, on découpe un profil en bois MDF qui sert de guide pour le découpage final. À l'aide d'un fil chauffant, il est alors très facile de découper un profil avec précision en suivant le guide en bois.

Fabrication du support du profil

Le support du profil est un sous-système simple qui ne requiert pas beaucoup de préparation : perçage de la penture, découpage d'une tige filetée et perçage de l'attache de laiton. Les pièces s'emboîtent et se vissent alors ensuite pour l'assemblage. (Figure X. : Fabrication du guide en bois)



Figure 18: Traçage du contour de l'aile

Fabrication du système de mesure de portance

Ce système englobe la balance et les éléments qui sont reliés à son bon fonctionnement. Il a fallu tout d'abord sabler le dessus de la balance, qui est en verre, dans le but d'offrir une surface rugueuse pour améliorer l'adhésion de la colle. On y colle par la suite une planche de bois en MDF qui permettra d'y visser l'attache en laiton, le trou pour cette dernière étant préalablement percée au centre de la planche. Ce montage sera par la suite collé sur des tiges roulantes. Ces tiges sont collées sur les jauges de déformation situées en dessous de la balance pour qu'une valeur de portance puisse être récoltée.

Fabrication du système de mesure de traînée

Ce système englobe le dynamomètre et les éléments qui sont reliés à son bon fonctionnement. La première étape était de créer les tiges roulantes mentionnées plus haut à partir de tiges filetées, d'écrous et de roulements à billes. Ces roulements à billes permettent à l'ensemble de glisser doucement et avec peu de friction, ce qui permet d'avoir une mesure de traînée plus précise. Ils roulent dans des rails en U qui sont fixés au faux fond. Les deux extrémités du dynamomètre sont attachées à deux équerres en L, une qui est fixée à la planche de bois, l'autre qui est fixé à la paroi du faux fond.

Pour une description plus en détail des étapes de fabrication de l'ensemble du système, il est possible de consulter la gamme de fabrication de la soufflerie.

Interfaçage avec les autres sous-systèmes

Liens Génération de flux d'air – Système de mesure de la portance

Pour notre part, il n'y a pas eu d'interfaçage lors de la construction à faire entre le système de mesure de portance et le système de génération de flux d'air.

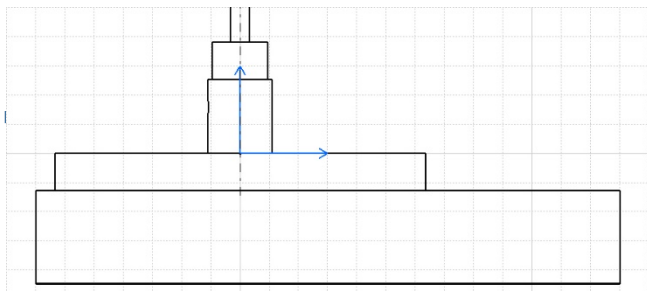
Liens Structure – Système de mesure de la portance

La totalité de l'interfaçage a été faite avec l'équipe de structure compte tenu du fait que le système de mesure de portance s'attache directement à la structure et à la veine d'essai. Voici une liste des points abordés lors de l'intégration des deux sous-systèmes :

- Hauteur du faux fond
- Fixation des rails à la base
- Fixation du dynamomètre à la paroi du faux fond
- Position et grandeur du trou dans le fond en plexiglas

Tout d'abord, il était nécessaire de déterminer la hauteur du faux fond afin d'avoir assez d'espace pour accommoder le système de mesure de la portance. Lorsque le montage balance-planche de bois rentrait dans les rails, la balance arrivait à la même hauteur que le bord supérieur des rails et seule la planche de bois dépassait ces derniers. Avec le fait que l'attache de laiton passe dans un trou fait dans le fond en plexiglas, il n'était pas nécessaire de l'inclure dans le choix de la hauteur du faux fond. La mesure minimale de la hauteur du faux fond est alors la somme de la hauteur des rails ($7/8$ de pouces) et celle de la planche de bois ($1/2$ pouces), qui est alors de $1\ 3/8$ pouce. De plus, il ne fallait pas que la hauteur du faux fond soit trop élevée pour que le fond en plexiglas soit assez éloigné de la vis papillon pour permettre à l'utilisateur de visser cette dernière sans difficulté. Étant donné que le trou pour la vis papillon a été fait juste au-dessous des filetages supérieurs de l'attache en laiton, il a été convenu de faire arriver le faux fond au milieu de l'attache de laiton, ce qui permet à l'utilisateur de visser facilement la vis et de laisser un jeu pour éviter de la friction entre la planche de bois et le fond en plexiglas. La hauteur finale du faux fond est de 50 mm. (Figure X : Hauteur du faux fond par rapport à l'attache)

Par la suite, il a fallu fixer la position des rails dans le faux fond ainsi que la façon de les fixer. La colle époxy a été choisie, car c'était la méthode la plus simple vu la géométrie des rails et elle était suffisante pour résister à toutes les contraintes. Vu que les rails sont en forme de U, il était trop compliqué de les visser au fond en bois.



Pour la fixation du dynamomètre à la paroi du faux fond, le même raisonnement a été fait que pour les rails. La colle époxy était la solution la plus simple pour fixer l'équerre

Figure 19: Schéma du faux fond

en L à la paroi.

Finalement, il a fallu décider de la position et de la grandeur du trou dans le fond en plexiglas où passe l'attache en laiton. Comme la position de l'attache de laiton est centrée en largeur dans le faux fond, à 12,5 cm de chaque bord de la veine d'essai, le trou aussi devait être centré en largeur. La largeur du trou est déterminée par le diamètre de l'attache de laiton, qui est de $\frac{1}{2}$ pouces, donc $\frac{1}{4}$ de pouces de chaque bord du centre de l'attache. Un jeu a été rajouté pour éviter de la friction entre l'attache de laiton et le fond en plexiglas, ce qui fait en sorte que la largeur finale du trou est de $\frac{3}{4}$ de pouce. Pour la longueur du trou, elle a été fixée de façon à permettre à la balance d'atteindre sa position maximale sans problème, ce qui fait que la longueur finale est de $3\frac{3}{4}$ pouces. (Figure X. Trou qui permet à l'attache de traverser le fond en plexiglas)



Figure 20: Système de mesure de portance (photo)

Limites d'opération

Afin d'assurer la validité des résultats pris avec la soufflerie, nous devons nous assurer que le l'objet à mesurer produit une portance d'un minimum de 20 fois supérieur à l'incertitude de la prise de la mesure. Ainsi, l'incertitude est maximale de 5% et permet donc une prise de mesures réaliste. Sur la mesure de portance influent de façon majeure trois paramètres dans l'équation suivante :

$$L = 1/2 \cdot C_L \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \quad \text{Où}$$

- ρ est la densité de l'air.
Nous évaluons la densité constante due aux conditions stables d'utilisation qui sont peu variables d'une commission scolaire à l'autre.
- v^2 est le carré de la vitesse de l'écoulement de l'air autour du profil portant.
Nous avons aussi une vitesse de flux d'air limite, celle-ci est d'environ 10m/s tels que les tests préliminaires nous ont donnés.
- Et C_L et S sont les caractéristiques du profil portant.
Le coefficient de portance varie selon la surface du profil aérodynamique et de sa surface.

Les deux premières variables étant fixes, la limite d'utilisation de la soufflerie dépend de la troisième variable elle-même dépendante de la surface maximale du profilé constante, car limitée par les dimensions de la soufflerie, et le coefficient de portance du profil.

Puisque le coefficient de portance est la seule variable libre, il s'agit de la variable limite. Le tableau suivant récapitule les paramètres fixes et leurs valeurs minimales où nous avons choisi 2 valeurs de S afin de fournir une approximation de l'impact de la variation de S sur la limite d'opération. Puisque la balance mesure une force en Newtons et la convertie en grammes, et que l'incertitude est en la plus petite valeur sur un affichage numérique, l'incertitude est de 1g.

	L	ρ	v	S_1	S_2
Justification	20xincertitude	Constante	Valeur max	S limite 1	S limite 2
Calcul	$20g \cdot 9,8 \cdot 10^{-3}$	25° 101.325 kPa	C	24cm · 20cm	20cm · 20cm
Valeur	0,196N	1.1839 kg · m ⁻³	10m/s	0,06m ²	0,04m ²

Tableau 12: Valeurs et calculs des différents paramètres affectant l'incertitude

$$1. C_L = \frac{2 \cdot 0,196N}{1.1839 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3} \cdot 10\text{m}/\text{s}^2 \cdot 0,048} = 0,06898$$

$$2. C_L = \frac{2 \cdot 0,196N}{1.1839 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3} \cdot 10\text{m}/\text{s}^2 \cdot 0,04\text{m}^2} = 0,08277$$

La limite de validité des mesures est donc fonction du profil d'aile choisi. Un profil d'aile à un angle déterminé dont le coefficient de portance inférieur à 0,06818 pour une surface de 0,06m² est donc hors de la zone de validité et l'incertitude sur la mesure représente plus de 5% de la valeur. Il en va de même pour un profil ayant un coefficient inférieur à 0,08277 pour une surface de 0,04m². Puisque C_L est inversement proportionnel à S, toute valeur de C_L se trouvant au-dessus la courbe $C_L \text{ max}$ présentée en annexe dans le graphique #1 est hors de la zone de validité de résultat ainsi que toutes les valeurs inférieures à $C_L \text{ min}$.

La limite physique de la soufflerie à rendre une mesure de portance valide en cas de hautes valeurs est donnée par la mesure maximale que peut prendre la balance, soit 5kg avec une vitesse inférieure à celle maximale puisqu'elle est variable, 5m/s a été choisi pour le calcul, donc un C_L maximal de 1,7245 pour une superficie de 0,048m.

$$3. C_L = \frac{2 \cdot 49N}{1.1839 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3} \cdot 5\text{m}/\text{s}^2 \cdot 0,048} = 1,7245$$

Or, avant d'atteindre les 45N nécessaires afin de dépasser la limite supérieure d'affichage, le montage total devrait se soulever et rendre la prise de mesure impossible. Il faut donc rajouter des poids sur la balance jusqu'à un maximum de poids total atteignant le 5kg.

La limite d'utilisation en fonction de la traînée dépend seulement du dynamomètre utiliser. Un jeu de longueur de 2pouces et demi est disponible à l'allongement du ressort. Il faut donc choisir un dynamomètre permettant une prise de mesure valide selon l'ordre de grandeur de la force à mesurer en respectant l'allongement maximal.

Validité à haute vitesse

Dans la mesure où nous avons à mesurer une valeur de portance aux paramètres associés au vol d'un Global 5000 à vitesse de croisière élevé, soit à une vitesse de 0,89Mac, une température de -50°C, une altitude de 51000 pieds et un angle d'attaque de 0°C, il faut évaluer les modifications à apporter à notre système afin de permettre la prise de mesures.

À cette altitude et température, la densité de l'air est de 0,1793kg/m³. Et la vitesse du son est de 295,07m/s.

En utilisant l'équation de la portance et le Cl maximal des profils que nous utilisons, soit de 2,25 et une surface de 0,06m², nous obtenons une portance de 1037N. Sur notre balance actuelle, celle-ci ne peut afficher que 5Kg, et cette mesure de portance nécessiterait un affichage de 10,32kg. Dans ce cas, nous pourrions empiler 3 balances les unes sur les autres et sommer la différence de poids afin d'obtenir la portance totale. Avec une finesse égale à 2,25/0,1 soit de 22,5, la traînée ressentie est donc de 46,088N. Il faudrait donc changer le dynamomètre afin d'en posséder un qui prend des mesures jusqu'à 50N soit 5% supérieur à la valeur de traînée maximale

mesurable à ces conditions. Il s'agit d'un dynamomètre de même marque que celui utilisé précédemment et de même taille, facile à se procurer.

Protocole type

Voici un protocole type d'utilisation de la soufflerie. Prendre note de que certains ajustements peuvent dépendre de l'objet ou le profile que vous testez.

1. Estimer l'ordre de grandeur de la traînée produite et choisir un dynamomètre approprié.
2. Installer le dynamomètre dans les crochets sur la base et la balance.
3. Ajuster le dynamomètre à zéro pour un allongement et un déplacement zéro donné lorsque le support à tige est en contact avec la visière en plastique.
4. Installer la tige de support dans le support à tige.
5. Choisir l'angle d'attaque du profile en enfonçant vissant l'embout de la tige dans la tige jusqu'à obtention de l'angle désirer.
6. Visser en place l'embout en vissant le contre-écrou.
7. Fixer la tige dans le support à tige à l'aide de la vis afin d'orienter l'avant du support vers l'avant de la soufflerie.
8. Partir le moteur à la vitesse désirée et noter la traînée du montage.
9. Fixer le profil d'aile choisi et initialiser le zéro de la balance.
10. Partir la soufflerie, noter la portance sur la balance et noter la traînée sur le dynamomètre.
11. Si la portance générée est trop élevée pour la prise de mesure, ajouter des poids sur la balance et reprendre à l'étape 8.
12. Fermer le moteur.

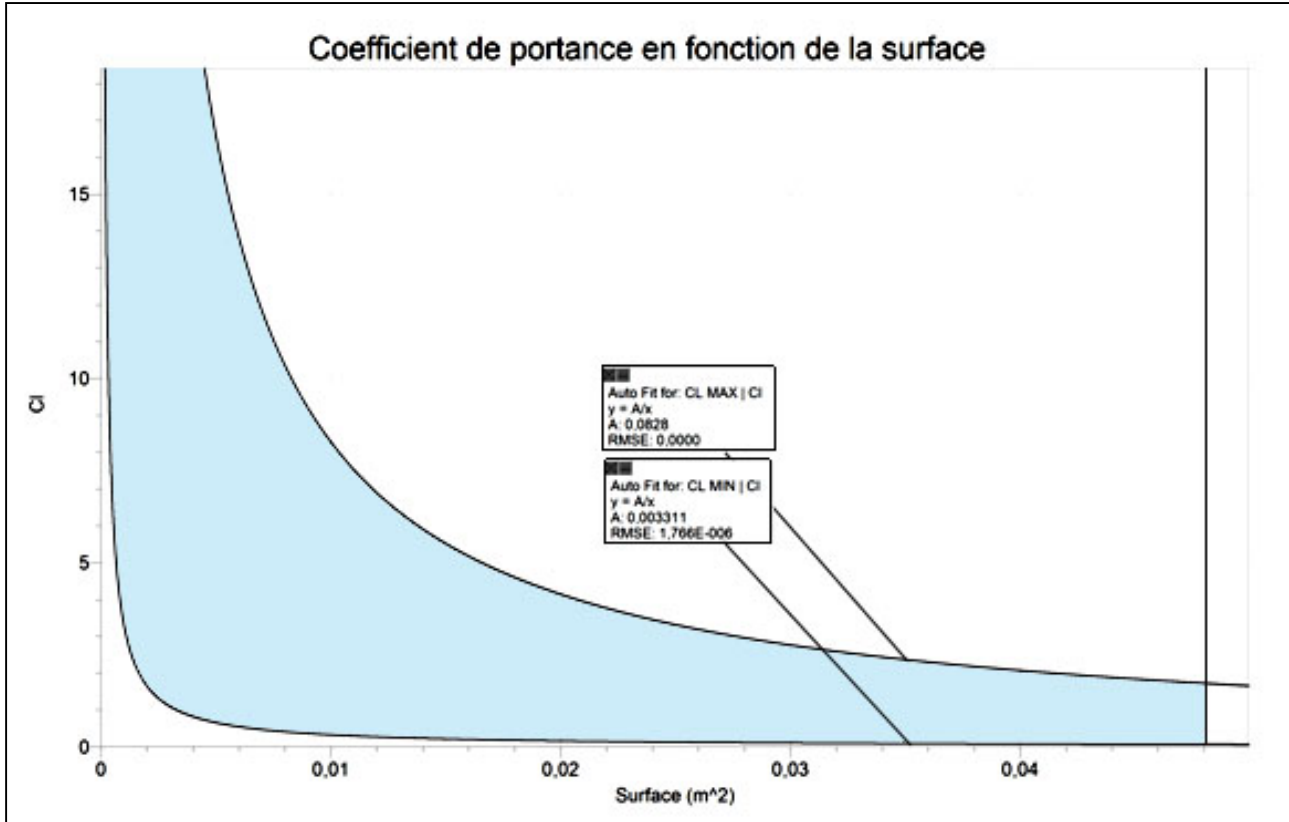


Figure 21: Coefficient de portance en fonction de la surface

Conclusion

La troisième étape du processus de conception d'une soufflerie à caractère pédagogique selon le *Quality Function Development* est présentée dans ce document. Celui-ci est basé les deux rapports le précédent, *Étude de Cas 1* et *Étude de cas 2, Conception d'une soufflerie artisanale*. Il s'appuie sur les caractéristiques obtenues dans la première étude et sur le choix de la solution retenue dans la seconde. Les principaux buts de ce rapport ont été atteints puisque la résistance des matériaux ainsi que la statique du produit ont été étudiées avec succès et certains dessins techniques y sont présentés.

La solution finale est composée d'une plaque roulante et d'un dynamomètre pour mesurer la traînée, d'une balance pour mesurer la portance, d'un support à angle d'attaque variable pour tenir l'objet à tester, de parois de panneaux d'acrylique pour permettre la visibilité et est principalement composé de bois. Le coût de fabrication du sous-système de la mesure de la portance est estimé à 100.00\$ et son poids approximatif est 1.2 kg. Le temps de fabrication de notre système de mesure de la portance est d'environ 40 h. L'analyse détaillée du produit nous a permis de conclure que tous les éléments de la soufflerie existent ou sont réalisables, le tout en accord avec les domaines de la statique et de la résistance des matériaux. Elle nous a également permis de démontrer la faisabilité de la solution. Plusieurs dessins de détails et d'assemblage ainsi que des modèles Catia sont aussi présentés dans le document.

La validité de ce rapport est limitée par les charges maximales théoriques que peut supporter la soufflerie. Elles sont approximatives. Par contre, puisqu'elles sont beaucoup plus grandes que les charges que subit la soufflerie, on considère que les composantes du sous-système étudié sont assez solides pour rester en place. Le prix variable des pièces constitue également une incertitude du rapport qui limite grandement sa précision. Aussi, le nombre limité de clients et de rencontre avec eux auront peut-être un impact sur la qualité de notre produit et sur l'optimalité de la solution choisie. Une rencontre finale avec les clients permettait de vérifier si notre projet correspond à leurs attentes. Aussi, il serait intéressant de réaliser un sondage sur l'appréciation de notre solution finale auprès de plusieurs enseignants au secondaire afin de pouvoir ajuster notre solution au besoin.

La prochaine étape de la conception de notre produit est de réaliser une série de plusieurs tests de performance et de sécurité afin de s'assurer de la qualité du produit.

Remerciements

Nous remercions Monsieur Éric Morissette, représentant du Centre de Développement Pédagogique du Québec, de nous avoir mandatés pour la conception et la construction d'une soufflerie artisanale.

Nous remercions Madame Sonia Saumier, professeure de sciences et technologies au secondaire, d'avoir bien voulu répondre à nos questions en tant que cliente pour le projet de conception d'une soufflerie artisanale.

Nous remercions Monsieur Jean-Paul Lemarquis, ing. Ainsi que Monsieur Patrice Rémy, ing. De nous avons guidé tout au long de notre projet.

Nous remercions également Monsieur Philippe Murray de nous avoir permis de trouver un moteur assez performant pour convenir à notre design.

Annexe A: Profils d'aile

Table 1: Informations sur le profil S1223:

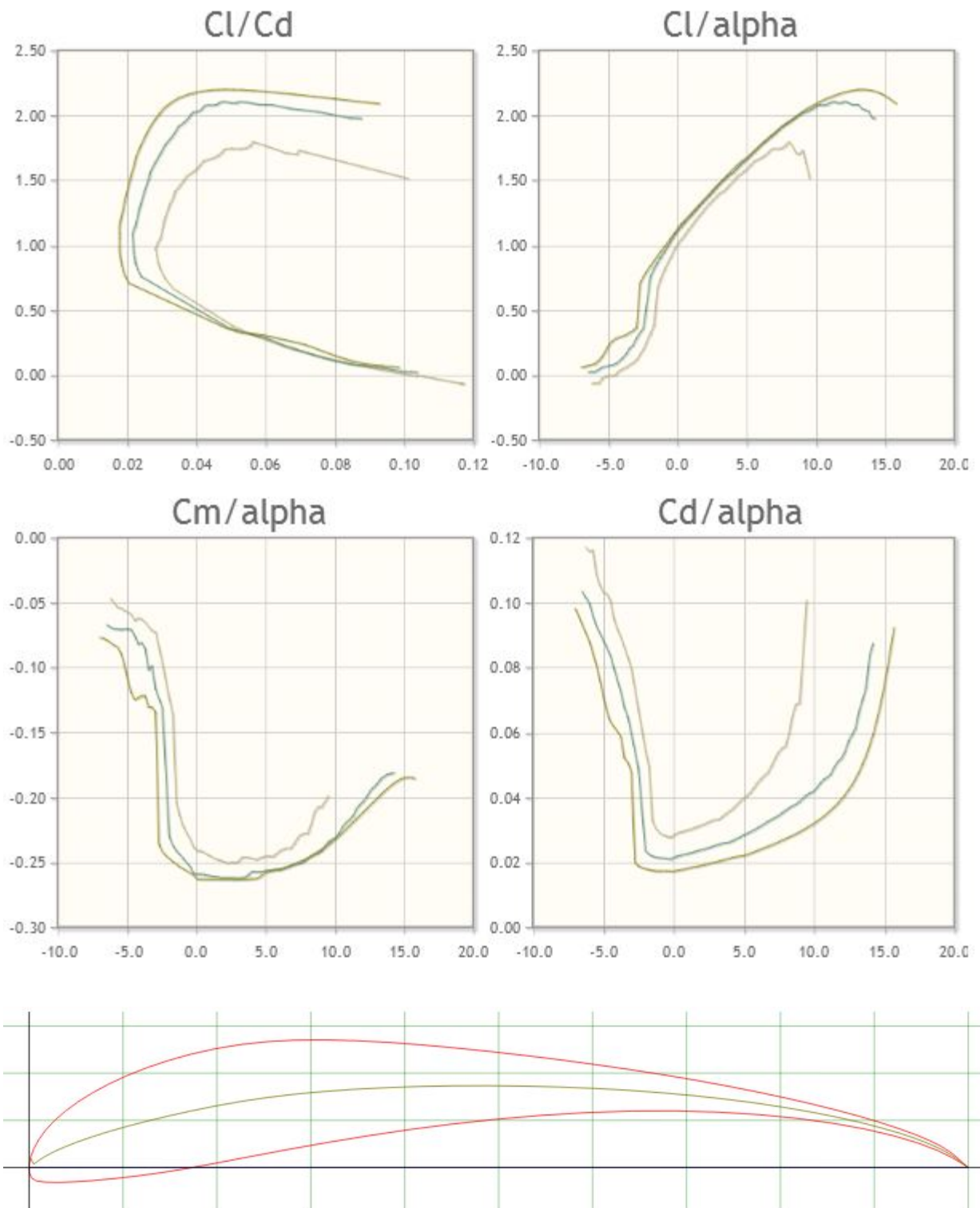


Table 2: Informations sur le profil NACA 63-210

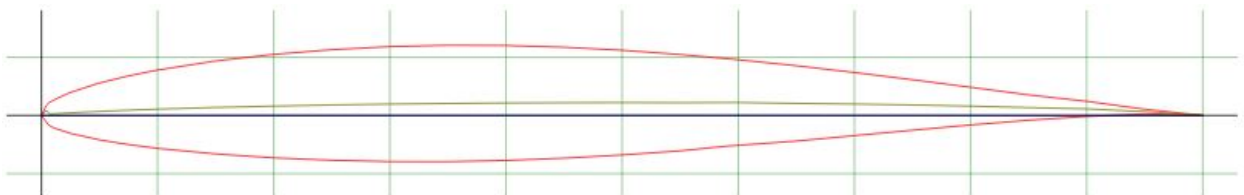
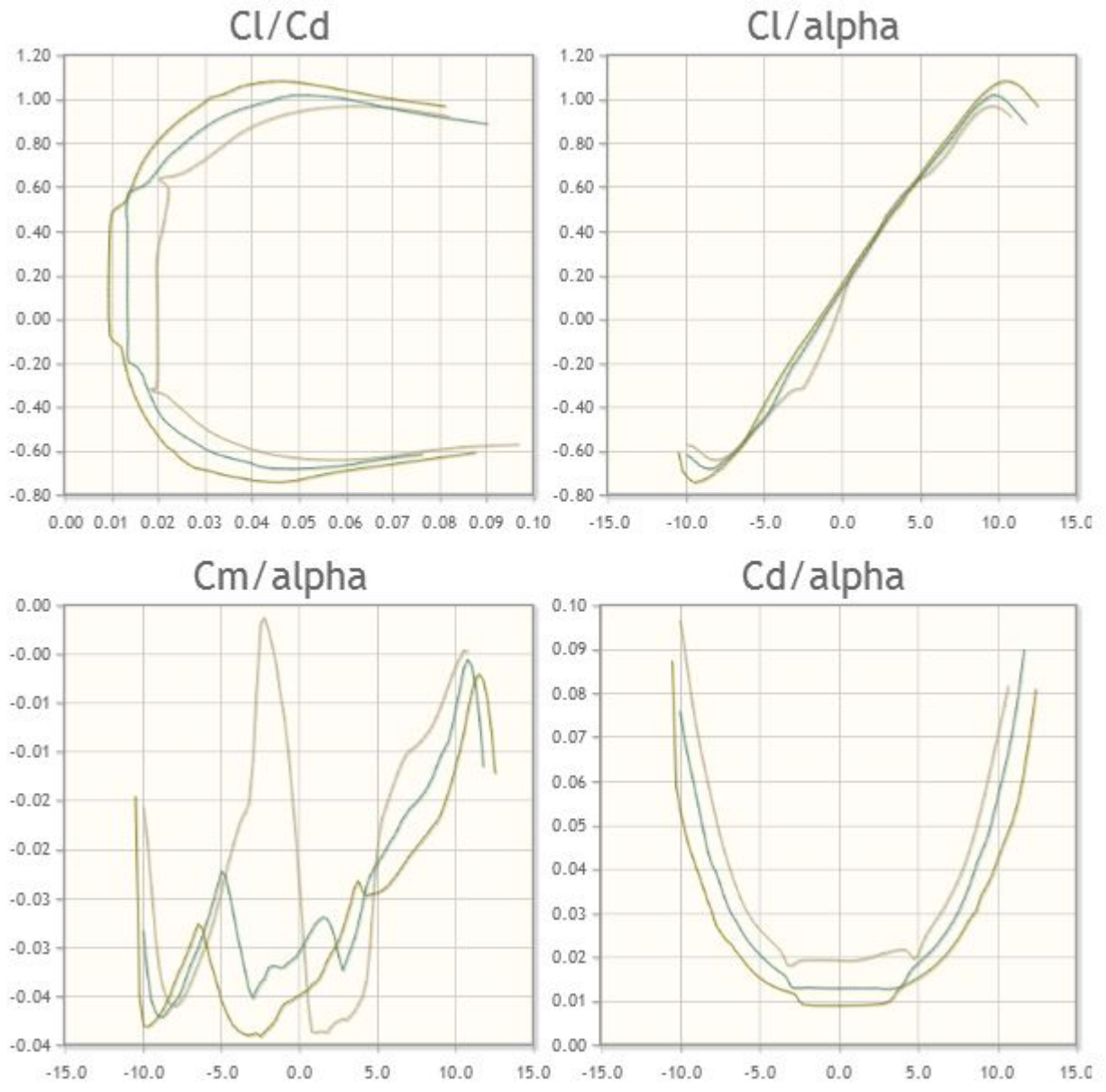
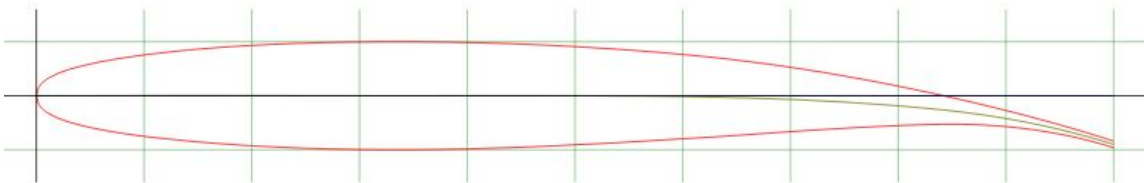
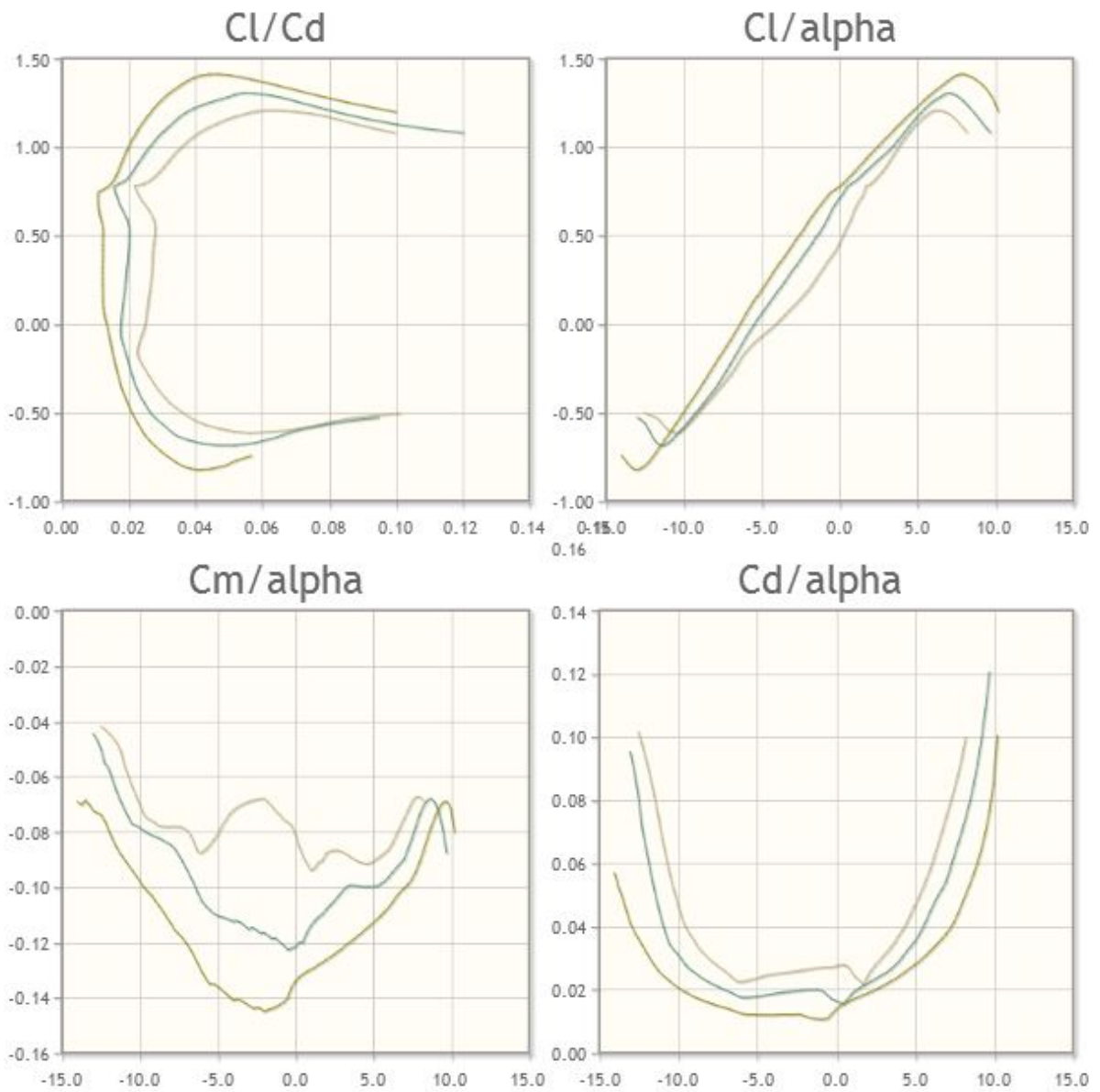


Table 3: Informations sur le profil NASA SC-1010



Annexe B: Fiches analyse et réalisation

Fiche Analyse – Profil d'aile

École Polytechnique
Génie Aérospatial

AER1110 : Projet Initial en Génie Aérospatial
Hiver 2014 – Fiche analyse profil d'aile

Équipe #7
Pierre-Olivier Alain, Daphnée Lacasse,
Samuel Leblanc, Félix Lessard,
Simon Munger, Thanh Tri Nguyen,
Adam Samson

Analyse profil d'aile

Diagramme de corps libre

Légende

- FV=Force du vent (N)
- MP=Moment piqueur (N*m)
- L=Portance (N)
- D=Trainée (N)
- RA=Résultante aérodynamique (N)
- W=Poids du profil (N)
- C=Corde (m)
- Ex=Extrados
- In=Intrados
- C/4=foyer (m)
- S=Superficie (m²)
- B=Envergure(m)
- C_L = Coefficient de portance
- C_D = Coefficient de trainée
- ρ = Densité de l'air (kg/m³)
- v = vitesse du flux d'air (m/s)
- U = Viscosité dynamique de l'air
- Re =Nombre de Reynolds

Équations

Les coefficients de portance et de trainée sont fonction de la forme et de l'angle d'incidence du profil, tandis qu'on peut voir que la portance et la trainée sont fonction directement de la vitesse de l'air, la superficie de l'aile et de la densité de l'air

- $S = CB$
- $L = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_L$
- $D = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_D$
- Épaisseur maximale = $|Ex| - |In|$
- $Re = \frac{\rho v C}{\mu}$

Valeurs des constantes :

- $\rho = 1.184 \text{ kg/m}^3$
- $Re < 200000$ (Hypothèse)
- $v < 34 \text{ m/s}$ (Hypothèse)

PORTANCE EN FONCTION DE LA SURFACE ET DU PROFIL D'AILE

Surface (m²)	NASA SC-1010 (N)	S1223 (N)	NACA 63-210 (N)
0.010	~3	~5	~2
0.020	~6	~10	~4
0.030	~9	~15	~6
0.040	~12	~20	~8
0.050	~15	~25	~10
0.060	~18	~30	~12

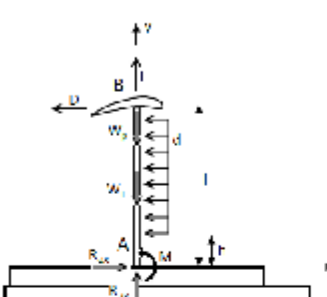
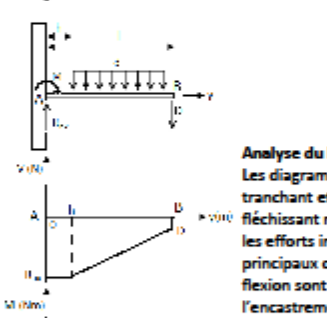
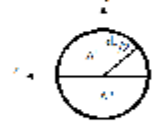
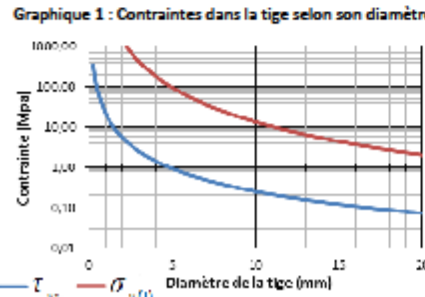

C_L de différents profils

Profil d'aile	C_L max
NASA SC-1010	1,3
S1223	2,25
NACA 63-210	1

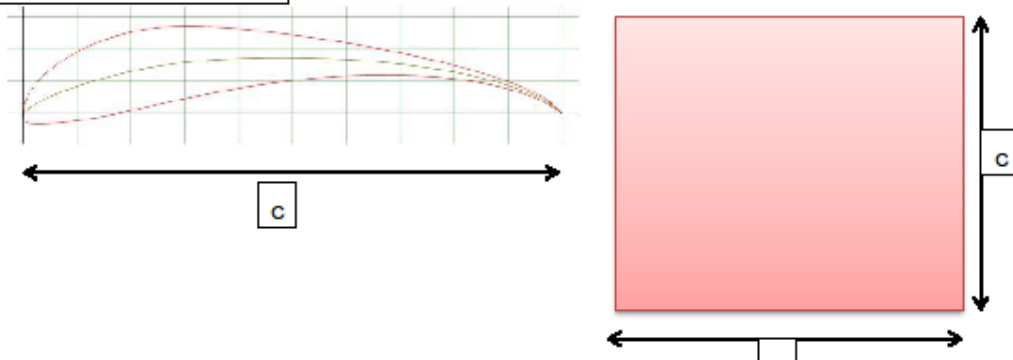
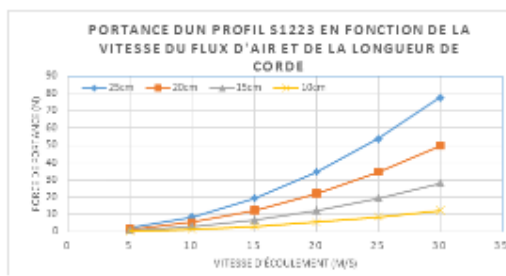
Interprétations :

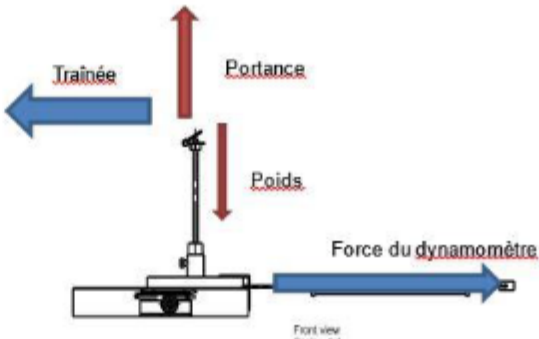
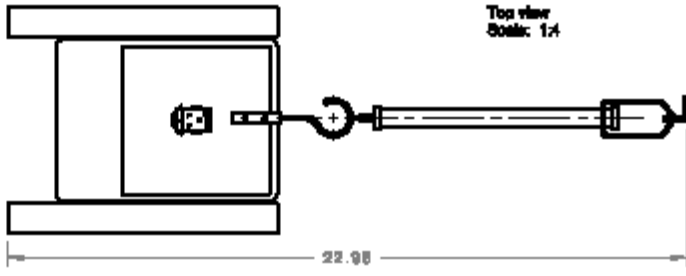
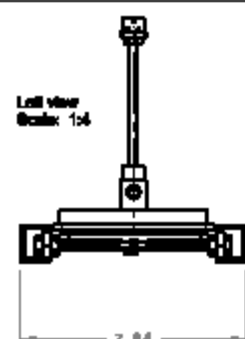
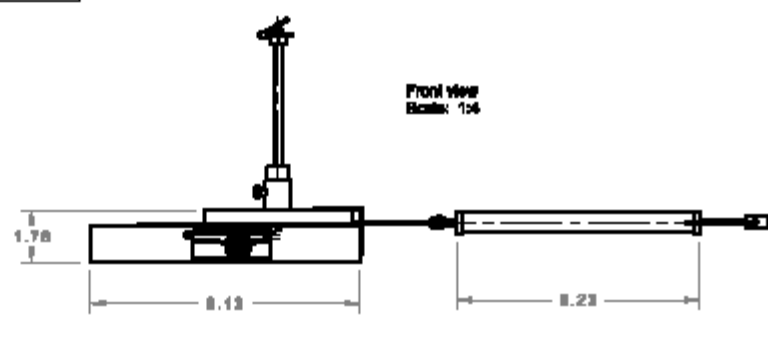
- On voit que pour obtenir une certaine portance acceptable et mesurable, le profil devra avoir une surface d'au moins 0.040m². Comme limite, il serait préférable d'avoir une aire de plus de 0.060m².
- Il serait intéressant de voir comment l'angle d'incidence à un impact sur la portance.

Fiche analyse – Système de support de profil

<p>École Polytechnique Génie Aérospatial</p>	<p>AER1110 : Projet Initial en Génie Aérospatial Hiver 2014 – Fiche Analyse : Système de support du profil portant</p>	<p>Équipe #7 Pierre-Olivier Alain, Daphnée Lacasse, Samuel Leblanc, Félix Lessard, Simon Munger, Thanh Tri Nguyen, Adam Samson</p>
<p>Fiche Analyse : Système de support du profil portant</p>		
<p>Schéma 1 : Diagramme de Corps Libre du système de support</p> 	<p>Définition des symboles <i>L</i> : Portance du profil (N) <i>D</i> : Trainées du profil (N) <i>D_t</i> : Trainées de la tige (N) <i>d</i> : Trainée répartie de la tige (N/m) <i>W_p</i> : Poids du profil (N) <i>W_t</i> : Poids de la tige (N) <i>R_{axx}, R_{ayy}, M</i> : Réactions à l'encastrement (N et Nm) <i>R_{cx}</i> : Force dans la colle (N) <i>l</i> : Hauteur de la tige (m) <i>h</i> : Hauteur de la tige en dehors de l'écoulement (m) <i>σ_{y(t)}</i> : Contrainte normale totale dans la tige (Pa) <i>τ_{yx}</i> : Contrainte de cisaillement dans la tige (Pa)</p>	<p><i>σ_{y(u)}</i> : Contrainte normale du chargement uniaxial (Pa) <i>F</i> : Force interne uniaxiale (N) <i>A</i> : Aire de la section (m²) <i>τ_{yx}</i> : Contrainte de cisaillement de la flexion (Pa) <i>V</i> : Effort tranchant <i>Q_{x,A'}</i> : Premier moment de la section au-dessus du plan (m³) <i>A'</i> : Section au-dessus du plan (m²) <i>b</i> : largeur de la section (m) <i>I_x</i> : Second moment de la section (m⁴) <i>σ_{y(f)}</i> : Contrainte normale de la flexion (Pa)</p>
<p>Schéma 2 : DCL de la tige en flexion avec son Diagramme d'Effort Tranchant (DET) et son Diagramme de Moment Fléchissant (DMF)</p> 	<p>Équations d'équilibre</p> $\sum F_x = 0$ $\sum F_y = 0$ $\sum M_A = 0$	<p>Équations des Contraintes</p> $\sigma_{y(u)} = \frac{F}{A}$ $\tau_{yx} = \frac{VQ_{x,A'}}{I_x b}$ $\sigma_{y(f)} = -\frac{Mx}{I_x}$ $\sigma_{y(t)} = \sigma_{y(u)} + \sigma_{y(f)}$
<p>Analyse du DEF et du DMF Les diagrammes d'effort tranchant et de moment fléchissant montrent que les efforts internes principaux causés par la flexion sont situés à l'encastrement de la tige.</p> <p>Efforts critiques <i>F</i> = <i>L</i> = 141,4 N <i> M _{max}</i> = (1,04 + 11 <i>d_t)</i> Nm <i> V _{max}</i> = (6,29 + 118,07 <i>d_t)</i> N</p>	<p>Contrainte maximale de flexion Le rapport <i>Q_{x,A'}/b</i> est maximal au plan neutre. La contrainte de cisaillement maximale se situe donc au plan neutre au niveau de l'encastrement. La valeur <i>x</i> est maximale aux intersections de la section avec l'axe des <i>x</i>. La contrainte normale maximale est donc à ces endroits au niveau de l'encastrement.</p>	<p>Schéma 3 : Section de la tige</p> 
<p>Graphique 1 : Contraintes dans la tige selon son diamètre</p> 	<p>Contraintes</p> $\sigma_{y(u)} = \frac{180}{d_t^2} Pa$ $\tau_{yx} = -\frac{21,26}{d_t^2} - \frac{400,9}{d_t} Pa$ $\sigma_{y(f)max} = \left(\frac{10,59}{d_t^2} + \frac{112,05}{d_t}\right) Pa$ $\sigma_{y(t)max} = \left(\frac{10,59}{d_t^2} + \frac{292,05}{d_t}\right) Pa$	<p>Schéma 4 : Contraintes exercées sur la tige</p> 
<p>Interprétation En choisissant le matériau, dans ce cas-ci l'acier, de la tige, on peut déterminer son diamètre minimal. Il suffit d'utiliser les équations des contraintes ou le graphique. L'acier pouvant supporter des contraintes de 250 MPa (cisaillement ou normale), la tige doit avoir un diamètre minimal de 3,6 mm. C'est la contrainte normale qui limite le diamètre. L'application d'un coefficient de sécurité de 1,5 change ce diamètre pour 4,1 mm.</p>		
<p>Graphique 1 : Réf. Fichier MS Excel AER1110_Contraintes_diametre_tige</p>		

Fiche Réalisation – Profil d'aile

École Polytechnique Génie Aérospatial	Fiche Réalisation	Étude de cas 3																				
Fiche Réalisation : Profil d'aile																						
Dessins du profil d'aile S1223																						
																						
Dimensions : <ul style="list-style-type: none"> ➢ C=0.25m ➢ B=0.25m ➢ S=0.0625m² Matériau : <ul style="list-style-type: none"> ➢ Le matériau est de la styromousse. C'est léger, facilement maniable et accessible pour les écoles 	Choix du profil : <ul style="list-style-type: none"> ➢ C_L supérieur aux autres étudiés ➢ Forme réalisable avec de la styromousse ➢ Portance maximale plus élevée que les autres profils dans les mêmes conditions 	Fabrication : <ul style="list-style-type: none"> ➢ Imprimer (Papier) ➢ Découper (Ciseaux, scie à ruban et fil chauffant) ➢ Coller (Colle) ➢ Dessiner (Feutre noir) ➢ Percer (Perceuse à colonne) ➢ Visser (Tournevis) ➢ Voir Gamme de fabrication pour plus de détails 																				
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Profils</th> <th colspan="2">Portance (N)</th> </tr> <tr> <th>Max</th> <th>Min</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>S1223</td> <td>34</td> <td>9</td> </tr> <tr> <td>NASA SC-1010</td> <td>20</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>NACA 63-210</td> <td>15</td> <td>4</td> </tr> </tbody> </table>	Profils	Portance (N)		Max	Min	S1223	34	9	NASA SC-1010	20	5	NACA 63-210	15	4	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2">TRAINÉE (N)</th> </tr> <tr> <th>MAX</th> <th>Min</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1.4</td> <td>0.3</td> </tr> </tbody> </table> <p style="font-size: small; margin-top: 5px;"> Note : Les calculs de portance ont été faits avec une surface de 0.0625m² pour chacun des profils. La traînée est seulement le pour le profil S1223. La vitesse du vent pour ces calculs variait de 10 à 20m/s </p>	TRAINÉE (N)		MAX	Min	1.4	0.3
Profils	Portance (N)																					
	Max	Min																				
S1223	34	9																				
NASA SC-1010	20	5																				
NACA 63-210	15	4																				
TRAINÉE (N)																						
MAX	Min																					
1.4	0.3																					
Masse, poids et prix unitaire : 0.34g ➡ 3.34X10 ⁻³ N ➡ 12.50\$ pour un bloc de 6"X6"																						
Satisfaction du client : <ul style="list-style-type: none"> ➢ Profil qui permet des valeurs de portance et de traînée mesurables. ➢ Peu coûteux ➢ Léger 	Référence : <ul style="list-style-type: none"> ➢ http://airfoiltools.com/ (pour les valeurs de coefficients de portance et traînée selon les profils) 																					
A.Fiches - Fiche Réalisation - Profil d'aile	Page 1 de 1	AER1110																				

École Polytechnique Génie Aérospatial	Fiche Réalisation	Étude de cas 3												
Fiche Réalisation : Système de mesure de portance et traînée														
<p>Forces limites selon les profils choisis</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Mesure/Force selon les profils choisis dans l'analyse</th> <th>Minimal (N)</th> <th>Maximal (N)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Traînée</td> <td>0.3</td> <td>1.4</td> </tr> <tr> <td>Portance</td> <td>4</td> <td>34</td> </tr> <tr> <td>Poids (Profil)</td> <td>0.255 (26g)</td> <td>0.33 (34g)</td> </tr> </tbody> </table> <p>Choix des instruments de mesure:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ Traînée des profils choisis: Dynamomètre de 2.5N ➢ Traînée d'autres géométries: Dynamomètre de 5N ➢ Portance: Balance de cuisine Starfrit 	Mesure/Force selon les profils choisis dans l'analyse	Minimal (N)	Maximal (N)	Traînée	0.3	1.4	Portance	4	34	Poids (Profil)	0.255 (26g)	0.33 (34g)	<p>Schéma de représentation des forces externes sur le système de mesures</p>  <p style="text-align: right; font-size: small;">Front view Scale: 1:4</p>	
Mesure/Force selon les profils choisis dans l'analyse	Minimal (N)	Maximal (N)												
Traînée	0.3	1.4												
Portance	4	34												
Poids (Profil)	0.255 (26g)	0.33 (34g)												
<p>Les dimensions sur le dessin de détails sont en pouces et sont évaluées à $\pm 1/8"$</p> <p>Dimensions hors tout:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ Longueur: ~550mm (<800mm) ➢ Largeur: ~200mm (<250mm) ➢ Hauteur: ~45mm (<50mm) <p>Fabrication:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ Sabler (Papier sabler) ➢ Coller (Colle) ➢ Percer visser (Perceuse et tournevis) 	 <p style="text-align: right; font-size: small;">Top view Scale: 1:4</p>													
 <p style="font-size: small;">Left view Scale: 1:4</p>	 <p style="font-size: small;">Front View Scale: 1:4</p>													
<p>Satisfaction du client :</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ Simple, efficace, peu coûteux et accessible 	<p>Masse, poids et prix unitaire (estimation à la hausse)</p> <p>1197.2g → 11.74N → 101.87\$</p>													
A.Fiches - Fiche Réalisation - Système de mesure Page 1 de 1														
AER1110														

Fiche réalisation – système support du profil portant

École Polytechnique
Génie Aérospatial

AER1110 : Projet Initial en Génie Aérospatial
Hiver 2014 – Fiche Réalisation : Système de support du
profil portant

Équipe #7
Pierre-Olivier Alain, Daphnée Lacasse,
Samuel Leblanc, Félix Lessard,
Simon Munger, Thanh Tri Nguyen, Adam
Samson

Fiche Réalisation : Système de support du profil portant

Contraintes maximale réelle prévue du système
Les contraintes suivantes sont celles calculées en fonction du diamètre de la tige, ¼ po (6,35 mm) et des conditions maximales prévues.

Tige fileté ¼ po

Contrainte normale: $\sigma_{y(t)max} = 48,6 \text{ MPa}$

Contrainte de cisaillement: $\tau_{yx} = 0,59 \text{ MPa}$

Colle (plaque de l'encastrement)

Contrainte normale: $\sigma_{y(max)(colle)} = 0,00925 \text{ MPa}$

Contrainte de cisaillement: $\tau_{colle(p)} = 436 \text{ Pa}$

Colle (Membrure en L)

Contrainte de cisaillement: $\tau_{colle(m)} = 0,0218 \text{ MPa}$

Réf. : A_Fiches - Fiche-Analyse-Systeme_support_profil

Schéma 2 : Dessin de détail de la plaque de MDF

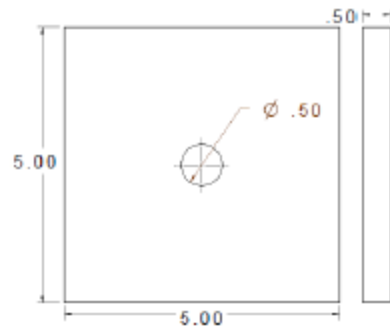
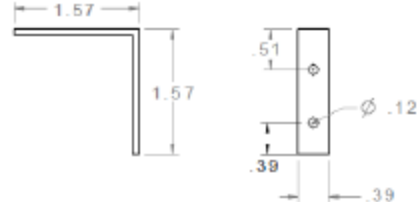


Schéma 4 : Dessin de détail de l'équerre 2 po (Stainless Steel)



Réf. :
DETAIL_SUP_TIGE + EQUERRE.pdf
PLAQUE_MDF.pdf
Assemblage_avec_numerotation_Sheet_1.pdf

Assemblage

Pièce	Description	Qté.
B	Tige Fileté ¼ po	1
C	Plaque de MDF	1
D	Tube de laiton	1
E	Vis à tête hexagonale Ø1/4-20UNC-2A X 0.75LG.	1
L	Balance électronique Starfrut	1
G	Équerre 2 po	1

Schéma 1 : Dessin d'assemblage du système

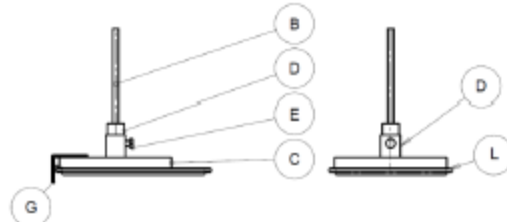
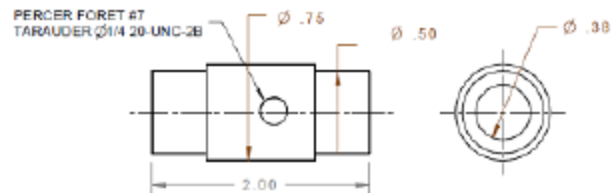


Schéma 3 : Dessin de détail du tube de laiton



DIMENSION EN POUCES
TOLÉRANCES GÉNÉRALES :
X.XX ±0.01

SOMMAIRE DE FABRICATION :
Coupe x1
Percer x2
Tarauder x1
Coller x2

Propriétés Réelles de la tige et Efforts permis

Section de la tige : $A = 3,17 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

Second moment de la section : $I_z = 7,98 \times 10^{-11} \text{ m}^4$

Facteur de sécurité réel (selon les conditions limites prévues) : $k=5,1$

Effort permis en tension/compression dans la tige : $|F| \leq 79,2 \text{ kN}$

Moment fléchissant maximal permis (tige) : $|M| \leq 6,28 \text{ Nm}$

Effort tranchant permis (tige) : $|V| \leq 2,97 \text{ kN}$

Effort en tension permis dans la colle (Sous la plaque) : $F_{y(max)} \leq 216 \text{ kN}$

Effort en cisaillement permis dans la colle (Sous la plaque) : $|F_x| \leq 80,6 \text{ kN}$

Effort en cisaillement permis dans la colle (Sous la membrure) :


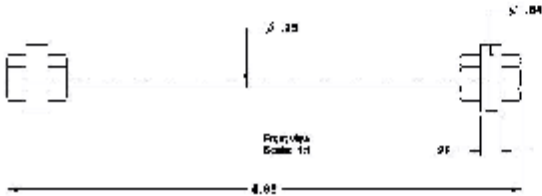

$|F_x| \leq 1,61 \text{ kN}$

Réf. : AER1110_EdC3_RDM_Calculs_Details_Systeme_support_profil.docx

Coût, poids et masse des pièces du système

Pièce	Qté.	Masse (g)	Poids (N)	Coût (CAD)
Tige Fileté ¼ po	1	29	0,28	1,30
Plaque de MDF	1	135	1,32	0 (Retaille)
Tube de laiton	1	33	0,32	1,60
Vis à tête hexagonale	1	7	0,07	0,40
Balance électronique	1	210	2,06	25,00
Équerre 2 po	1	15g	0,15	1,55
Total	n/a	429	4,21	29,85

Réf. : 8.1_-_Tableau-Synthèse-des-pièces-et-produit.docx

<p>École Polytechnique Génie Aérospatial</p>	<p>AER1110 : Projet Initial en Génie Aérospatial Hiver 2014 – Fiche réalisation tiges (essieux)</p>	<p>Équipe #7 Pierre-Olivier Alain, Daphnée Lacasse, Samuel Leblanc, Félix Lessard, Simon Munger, Thanh Tri Nguyen, Adam Samson</p>
<p>Réalisation tiges supportant roulements à billes (essieux)</p>		
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <p>Images représentant la tige, roulement et écrou</p> </div> 	<p>Dimensions</p> <p><u>Tige filetée</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Diamètre nominal : $\frac{1}{4}$ " - Longueur : $6\frac{1}{2}$ " <p><u>Écrous</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Diamètre nominal : $\frac{1}{4}$ " <p><u>Roulements à billes</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Diamètre intérieur : $\frac{3}{8}$ " - Diamètre extérieur : $\frac{3}{4}$ " 	<p>Raisons du choix de ces éléments et dimensions :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Les tiges doivent être environ $\frac{1}{2}$ plus longues que la largeur de la balance. - Les écrous doivent avoir le même diamètre nominal que les tiges. - Le diamètre extérieur des roulements doit être inférieur à l'épaisseur des rails. - Le diamètre intérieur des roulements doit être supérieur au diamètre des tiges. - Le matériau des tiges doit être rigide, courant, abordable. - Le diamètre des tiges doit être assez grand pour résister à la flexion et aux contraintes dans le matériau et fournir un facteur de sécurité d'au moins 2.5 (il s'agit de petites forces, donc l'application de plus grandes forces externes est plus probable). - Le filetage est présent pour des raisons de coût (puisque'il s'agit de la même tige que celle supportant le profil)
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <p>Matériau :</p> <p>Les tiges et écrous sont faits d'acier recouvert de zinc (la fonctionnalité du système n'est pas dépendante du type d'acier)</p> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 10px;"> <p>Fabrication :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Couper les tiges à la longueur voulue (scie à ruban). - Bien serrer les écrous de part et autre des roulements (un écrou de chaque côté du roulement, les roulements étant aux extrémités des tiges). - Coller de façon bien centrée les ensembles tiges/roulements/écrous sous la balance, où les capteurs de variation de masse sont installés. </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>Contraintes</p> <p>Les contraintes maximales dans les tiges, selon les matériaux et dimensions donnés, sont de :</p> <ul style="list-style-type: none"> • 9.108 MPa (contrainte de cisaillement) • 0.1519 MPa (contrainte normale) <p>Avec un facteur de sécurité de 2.5, les contraintes limites deviennent 22.70 MPa et 0.3798 MPa.</p> <p>Les contraintes limites dans le matériau avant la déformation permanente sont, dans les deux cas, de 250 MPa.</p> </div>	<p style="text-align: center;">Dessin de détails de l'assemblage</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  <p>Pré-View Échelle 1:1</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Pré-View Échelle 1:1</p> </div> </div> <p>Tolérancement :</p> <ul style="list-style-type: none"> -longueur des tiges : $\pm 1/16$ " (scie à ruban) -diamètre écrous/tiges : $\pm 1/64$ " (pièces usinées) -diamètres roulements : $\pm 1/64$ " 	



Annexe C: Factures des pièces

École Polytechnique de Montréal

Facture

Facture No. 004

Date: 08 avril 2014

Facture à : Éric Morissette
 Nom de la compagnie : Centre de développement pédagogique

Crochet à bois en acier	2	1,15\$	2,29\$
Penture en acier 1" par 1"	1	3,45\$	3,45\$
Élastique de caoutchouc	1	1,00\$ La boîte	1,00\$
Vis à tête fraisée en acier	3	4,99\$ La boîte	4,99\$
Écrou en acier	11	0,07\$	0,77\$
Tige filetée en acier	3	1,29\$	3,87\$
Vis papillon en acier	1	0,39\$	0,39\$
Cylindre en laiton	1	1,60\$	1,60\$
Planche de bois en MDF	1	Retaille	Retaille
Balance électronique	1	24,99\$	24,99\$
Roulements à bille	4	1,69\$	6,76\$
Rails en «U »	1	6,95\$	6,95\$
Dynamomètre	1	9,99\$	9,99\$
Colle Epoxy	1	9,29\$	9,29\$
Équerre en acier	2	3,09\$ La boîte	3,09\$
Planche de StyroFoam	1	12,50\$	12,50\$
		Sous-total	91,93\$
		TPS	4,60\$
		TVQ	9,19\$
		Total	105,72\$

Modalités de paiement

Payé à l'ordre de :
 Date limite pour recevoir le paiement :

Émis par : Équipe 7

Institution: École Polytechnique de Montréal,
 Département de génie aérospatial



Annexe D: Facture de temps

École Polytechnique de Montréal

Facture

Facture No. 003

Date: 08 avril 2014

Facture à : Éric Morissette

Nom de la compagnie : Centre de développement pédagogique

Adresse :

Membre de l'équipe	Heures en administration	Heures en réalisation	Heures totales	Taux Horaire	Total avant les taxes
Alain, Pierre-Olivier	18	5	23	Administration: 50\$/h Réalisation: 100\$/h	1400\$
Lacasse, Daphnée	4	13	17	Administration: 50\$/h Réalisation: 100\$/h	1500\$
Leblanc, Samuel	16	6.75	22.75	Administration: 50\$/h Réalisation: 100\$/h	1475\$
Lessard, Félix	11	19	30	Administration: 50\$/h Réalisation: 100\$/h	2450\$
Munger, Simon	6	32	38	Administration: 50\$/h Réalisation: 100\$/h	3600\$
Nguyen, Thanh Tri	10	11	21	Administration: 50\$/h Réalisation: 100\$/h	1600\$
Samson, Adam	4	11	15	Administration: 50\$/h Réalisation: 100\$/h	1300\$

Sous-total

TPS

TVQ

Total

<p>Modalités de paiement</p> <p>Payé à l'ordre de : Date limite pour recevoir le paiement :</p>	<p>Émis par : Équipe 7</p> <p>Institution: École Polytechnique de Montréal, Département de génie aérospatial Adresse: 2500 Chemin de Polytechnique H3T 1J4, Montréal, Québec Numéro de téléphone : (514) 340 - 4711 Date: 08 avril 2014</p>
--	--

Justificatif des heures travaillées

Samuel :

- Rencontre hors classe #7 : 55 min
- CR rencontre hors classe #7 : 20 min
- Rencontre hors classe #8 : 70 min
- CR rencontre hors classe #8 : 20 min
- Croquis des solutions : 75 min
- Rencontre hors classe #9 : 60 min
- CR rencontre hors classe #9 : 20 min
- Rencontre de compagnie #3 : 100 min
- RDM tiges soutenant roulements à billes : 210 min
- Rencontre hors classe #10 : 60 min
- CR rencontre hors classe #10 : 20 min
- Fiche analyse tiges sous la balance : 60 min
- Fiche réalisation tiges sous la balance : 60 min
- Préparation pour oral : 120 min

- Construction en classe (percer penture, couper rails, percer et tarauder embout de laiton, couper tiges, sablage, couper équerres, fabrication de 3 profils d'aile) : 240 min
- Construction hors classe (fabrication d'un gros profil d'aile en carton) : 165 min

Félix :

- Réunions d'équipe : 4h
- Réunion de compagnie : 4h
- Travail de rédaction du rapport final : 8h
- Dessins de détails et rendus : 5h
- Construction de la soufflerie : 4h
- Administration diverse : 3h
- Calculs et recherches : 2h

Daphnée :

- Rencontre hors classe #7 : 55 min
- Rencontre hors classe #8 : 70 min

- Rencontre hors classe #9 : 60 min
- Ébauche fiche analyse : 60 min
- Rencontre hors classe #10 : 60 min
- Construction en classe : 240 min
- Résumé, introduction, conclusion : 360 min
- Sommaire des requis conceptuels et techniques 120 min

Pierre-Olivier :

- Rencontre hors classe #7 : 55 min
- Rencontre hors classe #8 : 70 min
- Rencontre hors classe #9 : 60 min
- Ordre du jour hors-classe #9 : 15 min
- Ébauche fiche analyse : 120 min
- Rencontre hors classe #10 : 60 min
- Rencontre avec le client : 150 min
- Ordre du jour hors-classe #10 : 15 min
- Construction et organisation du travail en classe : 240 min
- Fiches d'analyses et recherches : 300 min
- Fiches de réalisations et recherches : 120 min
- Tableau synthèse des pièces et produit : 120 min
- Tests de la soufflerie : 60 min

Thanh Tri :

- Réunion d'équipe : 4h
- Réunion et fabrication de compagnie : 6h
- Gamme de fabrication : 3h
- Construction de la soufflerie : 4h
- Rédaction du rapport (Fabrication, factures et échancier) : 4h

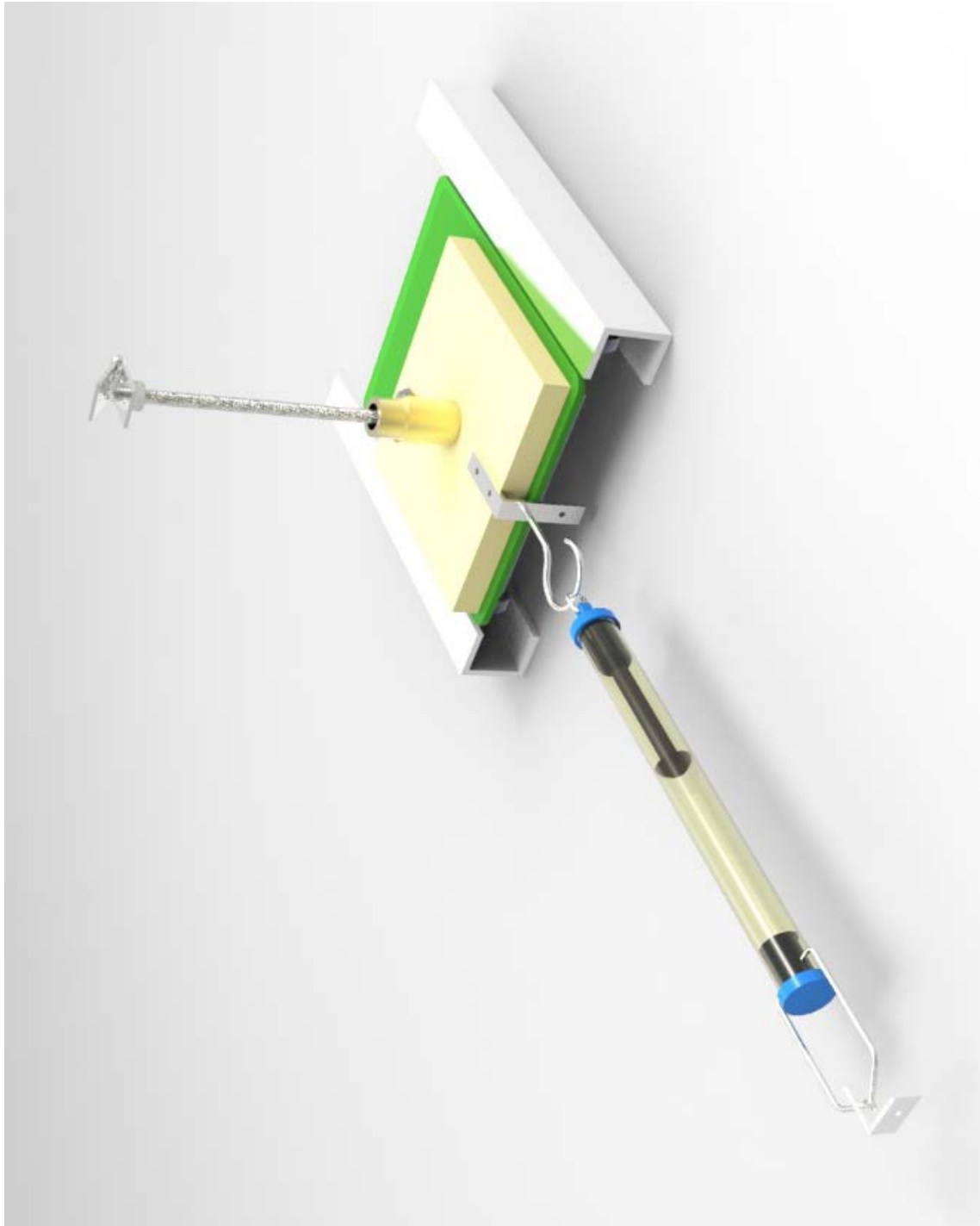
Simon :

- Réunions d'équipe : 4h
- Tâches administratives diverses (listes de tâches, retour sur les réunions, etc.) : 2h
- Construction : 2h
- Calculs préliminaires : 7h
- Rédaction rapport (Recherche et analyse) : 10h
- Rédaction rapport (Fiches) : 6h
- Rédaction Rapport (Réalisation) : 6h
- Rédaction rapport (Bibliographie) : 1h
-

Adam :

- Réunion d'équipe : 4h
- Construction de la soufflerie : 5h
- Limites et protocole : 4h
- Global 8000 : 2h

Annexe E: Rendu numérique d'assemblage



Annexe F: Analyse de résistance des matériaux sur le système de support du profil

Estimation des conditions limites

Superficie du profil (wing area)

Puisque la corde est constante sur toute l'envergure du profil et que la superficie correspond à la projection de l'aile dans le plan :

$$S = cb$$

S: Superficie ou "wing area" (m^2)

c: Corde (m)

b: envergure du profil (m)

La veine d'essai a une section de 25 cm par 25 cm, on suppose que l'envergure des profils sera 2 cm moins longue que la largeur de la section.

$$b = 25 - 2 = 23 \text{ cm} = 0,23 \text{ m}$$

On suppose que l'envergure des profils testés ne dépassera pas 40 cm. Un profil plus long risquerait d'être instable sur le système d'attache.

$$c = 40 \text{ cm} = 0,40 \text{ m}$$

$$S = 0,23 * 0,40 = 0,092 \text{ m}^2$$

Portance

Le meilleur profil trouvé grâce aux recherches a un coefficient de portance maximal de 2,25 ce que nous utiliserons pour nos calcul de résistance des matériaux.

Coefficient de portance : $C_L = 2,25$

On suppose que la tuyère est idéale (isentropique) et que l'évolution est quasi-statique. On peut donc considérer que le débit d'air est constant.

La vitesse initiale du flux d'air est d'environ 16,5 m/s (donnée fournie par l'équipe de génération de flux d'air).

v : vitesse de l'écoulement dans la veine $\left(\frac{m}{s}\right)$

v_i : vitesse initiale de l'air $\left(\frac{m}{s}\right) = 16,5 \text{ m/s}$

$$A_i = c_i^2 = 0,3556^2 \text{ m}^2$$

$$A_f = c_f^2 = 0,25^2 \text{ m}^2$$

$$\dot{V}_i = \dot{V}_f$$

$$v_i A_i = v A_f$$

$$v = v_i \frac{A_i}{A_f} = 16,5 * \frac{0,3556^2}{0,25^2} = 33,383 \frac{m}{s} \approx 33,4 \text{ m/s}$$

La densité de l'air est constante et correspond à celle à température ambiante et pression normale.

La densité de l'air à température ambiante et pression normale est 1,225 kg/m³.

$$L = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_L$$

ρ : Densité de l'air $\left(\frac{kg}{m^3}\right) = 1,225 \text{ kg/m}^3$

C_L : Coefficient de portance maximal = 2,25

$$L = \frac{1}{2} * 1,225 * 33,4^2 * 0,092 * 2,25$$

$$L \approx 141,4 \text{ N}$$

Trainée du profil d'aile

$$C_d = 0.1$$

C_d : Coefficient de traînée maximal = 0.1

$$D = L * \frac{C_d}{C_l} = 141,4 * \frac{0.1}{2,25}$$

$$D = 6,29 \text{ N}$$

Trainée de la tige

La tige filetée est assimilable à un cylindre infini perpendiculaire à l'écoulement. Le coefficient de traînée d'un tel cylindre est de 1,2 (UMBC, sans date).

d_t : diamètre de la tige (m)

$$C_{d(t)} = 1,2$$

$$D_t = \frac{1}{2} \rho v^2 S_t C_{d(t)}$$

$$S_t = d_t * (L - h)$$

$$S_t = d_t * (0.165 - 0,021) = 0,144 d_t \text{ m}^2$$

$$D_t = \frac{1}{2} * 1,225 * 33,4^2 * 0,144 d_t * 1,2$$

$$D_t = 118,07 d_t \text{ N}$$

Traînée répartie de la tige

$$d = \frac{D_t}{l - h} = \frac{118,07}{0,165 - 0,021} = 820 \text{ N/m}$$

Volume de la tige :

$$V_t = \frac{\pi d_t^2 l}{4} = \frac{\pi d_t^2 * 0,165}{4} = 0,13 d_t^2 \text{ m}^3$$

Masse de la tige :

La densité de l'acier est 7850 kg/m^3 (Engineering Toolbox, sans date).

$$\rho_t : \text{densité de la tige (acier)} = 7850 \text{ kg/m}^3$$

$$m_t = V_t \rho_t = 0,13 d_t^2 * 7850 = 1020,5 d_t^2 \text{ kg}$$

Poids de la tige :

$$W_t = m_t g$$

$$W_t = 9,81 * 1020 d_t^2 = 10\,011 d_t^2 \text{ N}$$

Le poids de la tige est donc négligeable car pour avoir un poids équivalent à 5% de la portance maximale, la tige devrait avoir un diamètre de 2,5 cm. Ce diamètre est trop gros et n'est pas réaliste compte tenu de l'utilisation que l'on veut en faire.

Poids du profil

La densité des panneaux de polystyrène est variable mais reste de l'ordre de 33 kg/m^3 (The Dow Chemical Company, 2014).

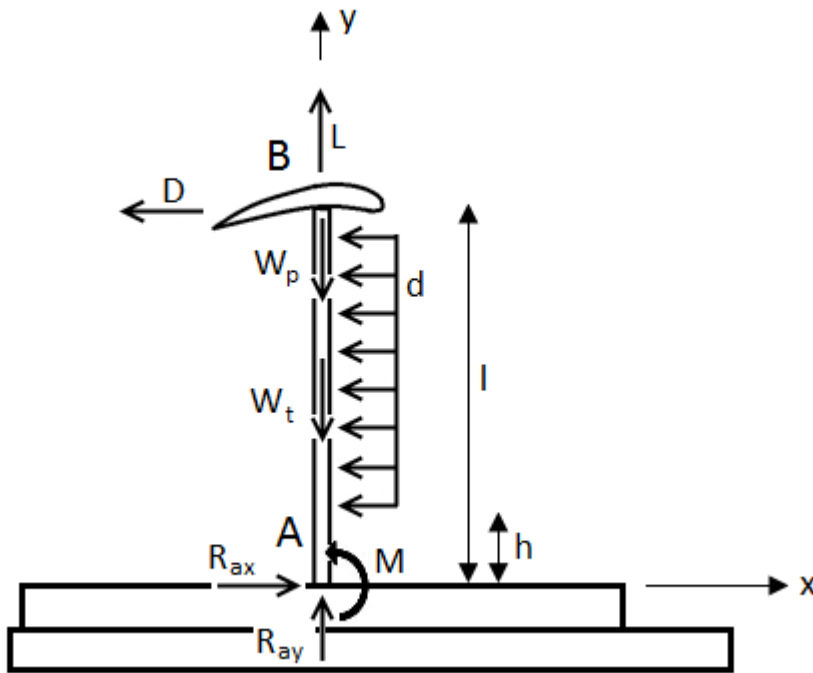
$$W_p = g * \rho_p * V_p = 9,81 * 33 * V_p = 323,73 V_p \text{ N}$$

Pour avoir un poids équivalent à 5% de la portance maximale, le profil portant devrait avoir un volume d'environ 22 cm^3 . Un tel profil serait trop gros pour notre soufflerie.

Équilibre

Le schéma suivant présente un Diagramme de Corps Libre (DCL) du système de support du profil.

Figure 22 : Diagramme de corps libre du système



L : Portance du profil (N)

D : Traînée du profil (N)

W_p : Poids du profil (N)

W_t : Poids de la tige d'acier (N)

R_{ax} et R_{ay} : Réactions de l'encastrement (N)

M : Moment exercé par l'encastrement (Nm)

d : Traînée répartie de la tige $\left(\frac{N}{m}\right) = 820 \text{ N/m}$

l : Longueur de la tige (m) = 0,165 m

h : hauteur de la tige à l'extérieur de la veine (m) = 0,021 m

Équilibre

$$\sum F_x = 0$$

$$R_{ax} - D - D_t = 0$$

$$R_{ax} = D + D_t$$

$$R_{ax} = (6,29 + 118,07 d_t) N$$

$$\sum F_y = 0$$

$$L - W_p - W_f + R_{ay} = 0$$

$$R_{ay} \approx -L$$

$$R_{ay} \approx -141,4 \text{ N}$$

$$\sum M_A = 0$$

$$l * D + \frac{L+h}{2} * D_t + M = 0$$

$$M = -l * D - \frac{L+h}{2} * D_t$$

$$M = -0,165 * 6,29 - \frac{0,165 + 0,021}{2} * 118,07 d_t$$

$$M \approx -(1,04 + 11 d_t) Nm$$

Chargement uniaxial de la tige

On suppose que la contrainte normale est répartie uniformément sur la section.

$$\sum F_y = 0$$

$$L - F = 0$$

$$F = L = 141,4 N$$

Contrainte normale (chargement uniaxial)

$$\sigma_{y(u)} = \frac{F}{A} = \frac{141,4}{\pi * \frac{d_t^2}{4}}$$

$$\sigma_{y(u)} = \frac{180}{d_t^2} Pa$$

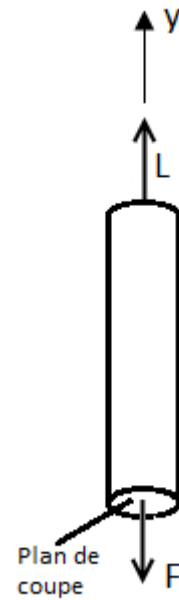


Figure 23: DCL de chargement uniaxial

Flexion sur la tige :

Le schéma ci-contre présente le diagramme de corps libre de la tige ainsi que le diagramme d'effort tranchant (DET) et le diagramme de moment fléchissant (DMF). La vue a été changée pour faciliter la visualisation.

$$V_i = V_{i-1} - (\text{Aire sous } q)_i - F_{xi}$$

$$V_0 = 0 - 0 - R_{ax} = -R_{ax}$$

$$V_0 = -(6,29 + 118,07 d_t) N$$

$$V_1 = -R_{ax} - 0 - 0 = -R_{ax}$$

$$V_2 = -R_{ax} + d(l - h) + D$$

$$V_2 = -R_{ax} + D_t + D = 0$$

$$M_i = M_{i-1} - (\text{Aire sous } V)_i - M$$

$$M_0 = 0 + M = -(1,04 + 11 d_t) Nm$$

$$M_1 = -(1,04 + 11 d_t) + R_{ax} * h - 0$$

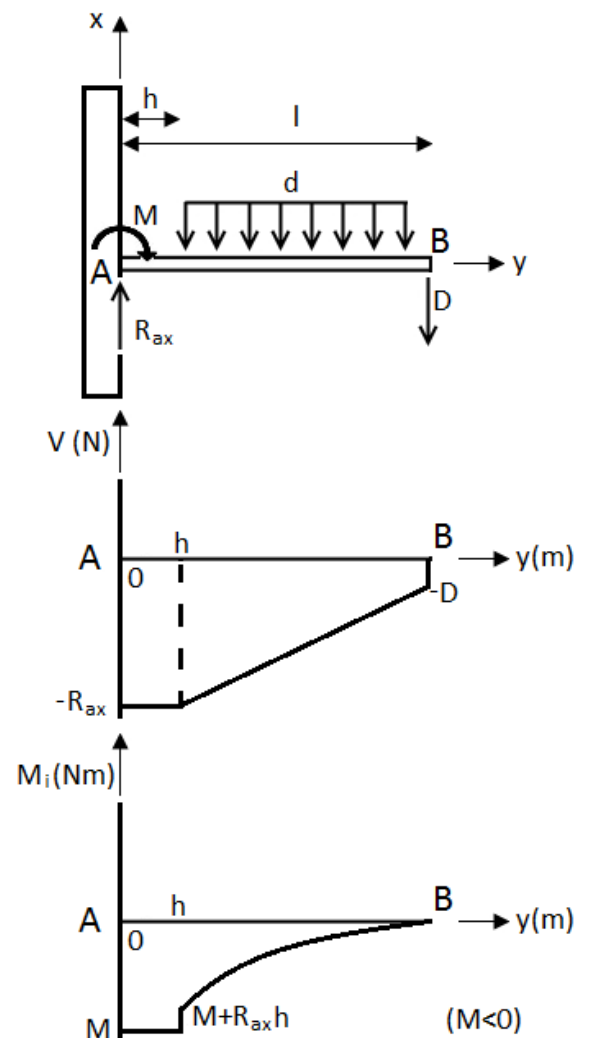
$$M_1 = -(1,04 + 11 d_t) + (6,29 + 118,07 d_t) * 0,021$$

$$M_1 \approx -0,908 - 8,52 d_t Nm$$

$$M_2 \approx -0,908 - 8,52 d_t + \frac{d(l-h)^2}{2} + D(l-h) - 0$$

$$M_2 \approx -0,908 - 8,52 d_t + \frac{D_t(l-h)}{2} + D(l-h)$$

Figure 24: DCL, DET et DMF de la flexion de la tige



$$M_2 \approx -0,908 - 8,52 d_t + \frac{118,07 d_t (0,165 - 0,021)}{2} + 6,29(0,165 - 0,021)$$

$$M_2 = 0 \text{ Nm}$$

Le moment fléchissant et l'effort tranchant associés à la flexion sont donc maximaux au niveau de l'encastrement.

Second moment de la section

$$I_z = \frac{\pi r_t^4}{4} = \frac{\pi \left(\frac{d_t}{2}\right)^4}{4}$$

$$I_z = \frac{\pi d_t^4}{64} \text{ m}^4$$

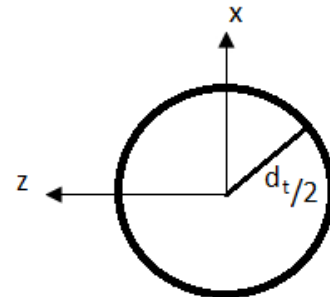


Figure 25: Section de la tige

Contrainte normale maximale (flexion)

$$\sigma_{y(f)} = -\frac{Mx}{I_z}$$

La contrainte normale est maximale lorsque le moment fléchissant et que le « x » sont maximaux. C'est le cas au niveau de l'encastrement lorsque la distance au plan neutre est égale au rayon de la section.

$$|M|_{max} = |-(1,04 + 11 d_t)| \text{ Nm}$$

$$|x|_{max} = \left| \pm \frac{d_t}{2} \right| \text{ m}$$

$$\sigma_{y(f)max} = \frac{(1,04 + 11d_t) \left(\frac{d_t}{2}\right)}{\frac{\pi d_t^4}{64}} = \left(\frac{10,59}{d_t^3} + \frac{112,05}{d_t^2} \right) \text{ Pa}$$

Contrainte de cisaillement (Flexion)

$$\tau_{yx} = \frac{VQ_{z,A'}}{I_z b}$$

La contrainte de cisaillement est maximale lorsque l'effort tranchant est maximal et que le rapport du premier moment sur la largeur de la section est maximal. C'est le cas au plan neutre au niveau de l'encastrement.

$$|V|_{max} = |-(6,29 + 118,07 d_t)| N$$

$$Q_{z,A'} = A' x'$$

$$x' = \frac{4r_t}{3\pi} = \frac{2d_t}{3\pi} m$$

$$A' = \frac{\pi d_t^2}{4} m^2$$

$$Q_{z,A'} = \frac{2d_t}{3\pi} * \frac{\pi d_t^2}{4} = \frac{d_t^3}{6} m^3$$

$$\tau_{yxmax} = \frac{-(6,29 + 118,07 d_t) \left(\frac{d_t^3}{6} \right)}{\left(\frac{\pi d_t^4}{64} \right) (d_t)} = -\frac{21,36}{d_t} - \frac{400,9}{d_t} Pa$$

Le schéma ci-contre présente une coupe avec les contraintes créées par le chargement de flexion dans la tige.

Contrainte permises de l'acier

$$\sigma_{acier(max)} = |250 MPa|$$

$$\tau_{acier(max)} = |250 MPa|$$

Respect de la contrainte maximale de cisaillement

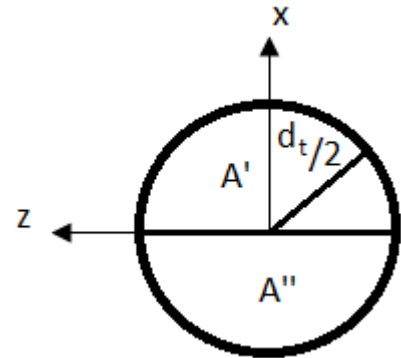


Figure 26: Division de l'aire de la section au plan neutre

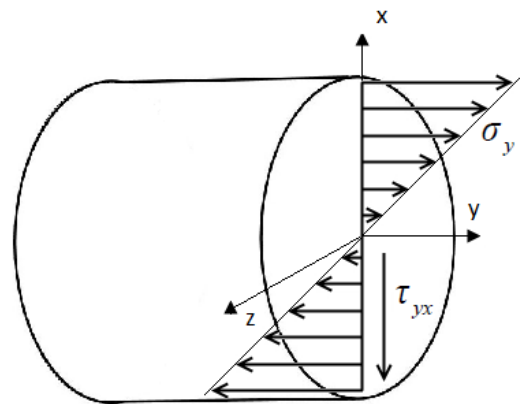


Figure 27 : Coupe des contraintes dues à la flexion

$$\tau_{yxmax} \leq \tau_{acier(max)} = |250 \text{ MPa}|$$

$$\tau_{yxmax} = -\frac{21,36}{d_t^2} - \frac{400,9}{d_t} \geq -250 \times 10^6$$

$$250 \times 10^6 d_t^2 - 400,9d_t - 21,36 \geq 0$$

$$d_t \geq 3 \times 10^{-4} \text{ m} = 0,3 \text{ mm}$$

Selon la contrainte maximale de cisaillement le diamètre de la tige doit être de plus de 0,3 mm.

Contrainte normale totale (superposition)

Le schéma suivant illustre la superposition de la contrainte normale causée par le chargement uniaxial et de celle causée par la flexion de la tige. Puisque la contrainte due au chargement uniaxial est uniforme, la contrainte maximale totale est l'addition des contraintes maximales des deux modes de chargement.

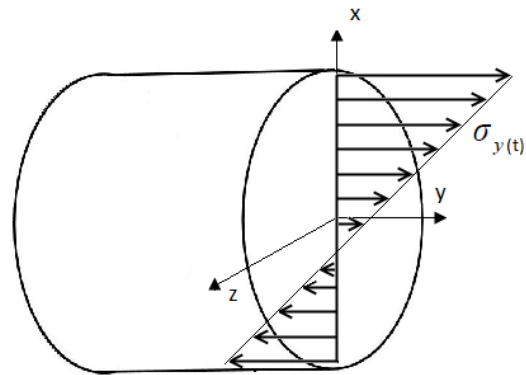
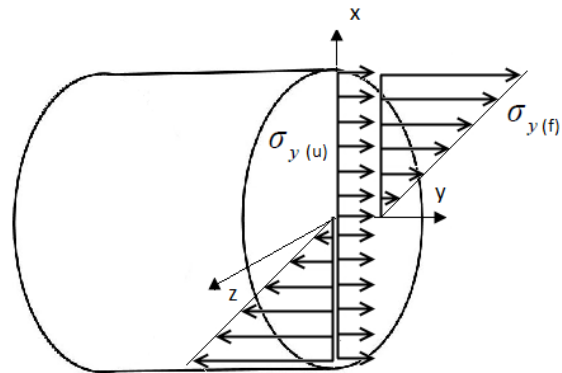


Figure 28: Superposition des contraintes normales

$$\sigma_{y(t)max} = \sigma_{y(u)} + \sigma_{y(f)max}$$

$$\sigma_{y(t)max} = \frac{180}{d_t^2} + \left(\frac{10,59}{d_t^3} + \frac{112,05}{d_t^2} \right)$$

$$\sigma_{y(t)max} = \left(\frac{10,59}{d_t^3} + \frac{292,05}{d_t^2} \right) \text{ Pa}$$

Respect de la contrainte normale maximale

$$\sigma_{y(t)max} \leq \sigma_{acier(max)} = |250 \text{ MPa}|$$

$$\sigma_{y(t)max} = \left(\frac{10,59}{d_t^3} + \frac{292,05}{d_t^2} \right) \leq 250 \times 10^6$$

$$d_t \geq 0,0036 \text{ m} = 3,6 \text{ mm}$$

Le diamètre minimal de la tige selon la contrainte normale totale est de 3,6 mm.

Efforts dans la colle (Sous la plaque)

Le schéma à droite présente le diagramme de corps libre de l'encastrement obtenu par démembrement de la tige et de celui-ci. Le moment de force est remplacé par un couple appliqué aux extrémités.

$$F = \frac{M}{0,127} = -\frac{(1,04 + 11 d_t)}{0,127} N$$

$$\sum F_x = R_{cx} - R_{ax} = 0$$

$$R_{cx} = R_{ax} = (6,29 + 118,07 d_t) N$$

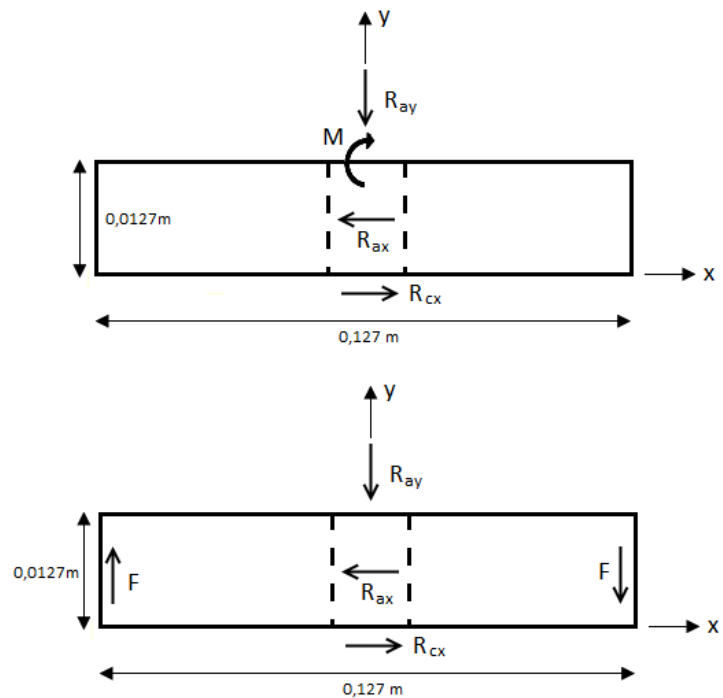


Figure 29: DCL de la plaque (encastrement)

Contrainte normale dans la colle (Sous la plaque)

La contrainte maximale dans la colle est à l'endroit où la force en tension est maximale puisque R_{ay} est en tension (négative dans la direction négative).

$$F_{ymax} = |F| - R_{ay} = \frac{(1,04 + 11 d_t)}{0,127} + 141,4$$

$$F_{y_{max}} = 148,6 + 86,6d_t \text{ N}$$

On suppose que la charge est répartie sur l'ensemble de la surface.

$$A_c = 0,127^2 m^2$$

$$\sigma_{y_{max}(colle)} = \frac{F_{y_{max}}}{A_c} = \frac{148,6 + 86,6d_t}{0,127^2}$$

$$\sigma_{y_{max}(colle)} = 9\,213,2 + 5369,2d_t \text{ Pa}$$

Respect de la contrainte maximale normale dans la colle (Sous la plaque)

On suppose que la colle peut supporter les mêmes contraintes que si elle était appliquée sur de l'acrylique (contrainte de cisaillement) ou de l'aluminium (contrainte normale en tension). Ces contraintes permises sont les plus faibles fournies par le fabricant.

La colle, Gel Epoxy Lepage, possède les contraintes maximales suivantes (Henkel, 2010) :

$$\sigma_{colle(p)} \leq 1937 \text{ Psi} = 13,4 \text{ MPa}$$

$$\tau_{colle(p)} \leq |724 \text{ Psi}| = |5 \text{ Mpa}|$$

$$\sigma_{y_{max}(colle)} = 9\,213,2 + 5369,2d_t \leq 13,4 \times 10^6$$

$$d_t \leq 2\,494 \text{ m}$$

Contrainte de cisaillement dans la colle

$$\tau_{colle(plaque)} = \frac{R_{cx}}{A_c} = \frac{6,29 + 118,07 d_t}{0,127^2}$$

$$\tau_{colle(plaque)} = 390 + 7320d_t \text{ Pa}$$

Respect de la contrainte maximale de cisaillement dans la colle (Sous la plaque)

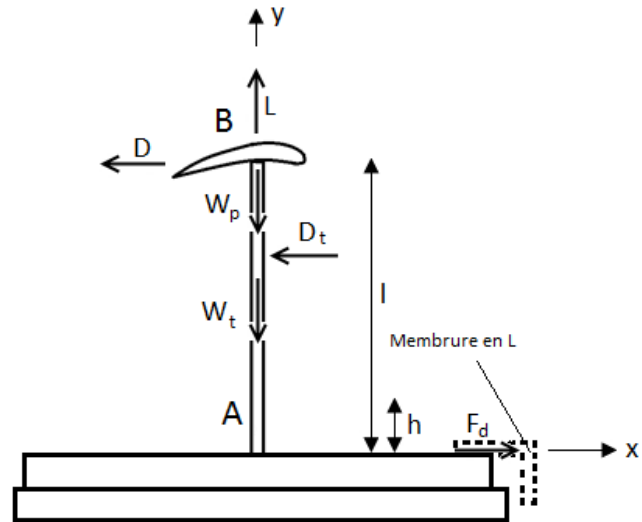
$$\tau_{colle(plaque)} = 390 + 7320d_t \leq 5 \times 10^6$$

$$d_t \leq 683 \text{ m}$$

Ces résultats nous permettent de dire que la colle peut supporter les chargements pouvant être exercé sur notre système. Cependant, les données calculées sont aberrantes puisque plusieurs hypothèses effectuées préalablement seraient faussées si l'on utilisait une tige d'un tel diamètre et qu'une telle tige n'entrerait pas dans notre soufflerie.

Efforts dans la colle (Membrure en L)

Le schéma ci-contre est un diagramme de corps libre du système. On a remplacé la traînée répartie de la tige par la traînée totale de la tige



et omis certains appui en « y » pour alléger la représentation.

Figure 30: DCL simplifié du système

$$\sum F_x = F_d - D - D_t = 0$$

$$F_d = D + D_t = 6,29 + 118,07 d_t \text{ N}$$

La colle est étendue sur une surface de 0,0127 m par 0,0254 m (1/2 X 1 Po).

$$A_{c(m)} = 0,0254 * 0,0127 = 0,0003226 \text{ m}^2$$

Contrainte de cisaillement maximale dans la colle (membrure en L)

$$\tau_{colle(membrure)} = \frac{F_d}{A_{c(m)}} = \frac{6,29 + 118,07 d_t}{0,0003226}$$

$$\tau_{colle(membrane)} = 19500 + 366017d_t$$

Respect des contraintes maximales :

$$\tau_{colle(membrane)} = 19500 + 366017d_t \leq 5 \times 10^6$$

$$d_t \leq 13,6 \text{ m}$$

On peut appliquer la même analyse à ce résultat qu'aux autres résultats associés à la colle précédemment.

Facteur de sécurité

Le diamètre de la tige est limité par la contrainte normale totale. Pour s'assurer que la tige ne dépasse pas les contraintes maximales, on utilise un facteur de sécurité (k), de 1,5. Un tel facteur est la norme habituelle dans le milieu de l'aéronautique (Transport Canada, 2013).

$$k\sigma_{y(t)max} \leq \sigma_{acier(max)} = |250 \text{ MPa}|$$

$$1,5 * \sigma_{y(t)max} = 1,5 \left(\frac{10,59}{d_t^3} + \frac{292,05}{d_t^2} \right) \leq 250 \times 10^6$$

$$d_t \geq 0,0041 \text{ m} = 4,1 \text{ mm}$$

Le diamètre minimal de la tige est donc de 4,1 mm.

Annexe G : Calcul de réalisation sur le système de support du profil

Les équations dans ces calculs proviennent principalement de l'analyse de résistance des matériaux sur le système de support du profil.

Tableau 13: Dimensions nominales finales des éléments

Dimension	Système impérial	Système International
Diamètre de la tige	¼ po	0,00635 m
Hauteur de la plus longue tige	6,5 po	0,1651 m
Côtés de la plaque carrée (encastrement)	5 po	0,127 m
Diamètre de l'encastrement	½ po	0,0127 m
Surface de colle (membrure)	½ po X 1 po	0,0127 m X 0,0254m

Propriétés et contraintes maximales prévues réelles

Section réelle de la tige

$$A = \frac{\pi d_t^2}{4} = \frac{\pi * 0,00635^2}{4}$$

$$A = 3,17 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Second moment réel de la tige

$$I_z = \frac{\pi r_t^4}{4} = \frac{\pi \left(\frac{d_t}{2}\right)^4}{4} = \frac{\pi d_t^4}{64} = \frac{\pi * 0,00635^4}{64}$$

$$I_z = 7,98 \times 10^{-11} \text{ m}^4$$

Contrainte normale maximale prévue dans la tige

$$\sigma_{y(t)max} = \left(\frac{10,59}{d_t^3} + \frac{292,05}{d_t^2} \right) Pa$$

$$\sigma_{y(t)max} = \left(\frac{10,59}{0,00635^3} + \frac{292,05}{0,00635^2} \right) = 48,6 \times 10^6 Pa$$

$$\sigma_{y(t)max} = 48,6 \text{ MPa}$$

Contrainte de cisaillement maximale prévue dans la tige

$$\tau_{yx} = -\frac{21,36}{d_t^2} - \frac{400,9}{d_t} Pa$$
$$\tau_{yx} = -\frac{21,36}{0,00635^2} - \frac{400,9}{0,00635} = 593 \times 10^3 Pa$$
$$\tau_{yx} = 0,59 MPa$$

Contrainte normale maximale prévue dans la colle (Sous la plaque)

$$\sigma_{ymax(colle)} = 9\,213,2 + 5369,2d_t Pa$$
$$\sigma_{ymax(colle)} = 9\,213,2 + 5369,2 * 0,00635 = 9\,250 Pa$$
$$\sigma_{ymax(colle)} = 0,00925 MPa$$

Contrainte de cisaillement prévue dans la colle (Sous la plaque)

$$\tau_{colle(plaque)} = 390 + 7320d_t Pa$$
$$\tau_{colle(plaque)} = 390 + 7320 * 0,00635$$
$$\tau_{colle(plaque)} = 436 Pa$$

Contrainte de cisaillement prévue dans la colle (Membrure en L)

$$\tau_{colle(membrure)} = 19500 + 366017d_t Pa$$
$$\tau_{colle(membrure)} = 19500 + 366017 * 0,00635 = 21\,800 Pa$$
$$\tau_{colle(membrure)} = 0,0218 MPa$$

Facteur de sécurité réel :

$$k = \frac{\sigma_{acier(max)}}{\sigma_{y(t)max}} = \frac{250}{48,6} = 5,1$$

Efforts maximaux permis

Effort permis en tension/compression dans la tige

$$\sigma_{y(u)} = \frac{F}{A} \leq \sigma_{acier(max)} = |250| \text{ MPa}$$

$$-\sigma_{acier(max)} * A \geq F \leq \sigma_{acier(max)} * A$$

$$|F| \leq 250 \times 10^6 * 3,17 \times 10^{-4} \approx 79\,200 \text{ N}$$

$$|F| \leq 79,2 \text{ kN}$$

Moment fléchissant maximal permis dans la tige

$$\sigma_{y(f)} = -\frac{Mx}{I_z}$$

Rappel : La contrainte normale est maximale lorsque le moment fléchissant et que le « x » sont maximaux. C'est le cas au niveau de l'encastrement lorsque la distance au plan neutre est égale au rayon de la section.

$$|\sigma_{y(f)max}| = \left| \pm \frac{Md_t}{2I_z} \right| \leq \sigma_{acier(max)} = 250 \text{ MPa}$$

$$\left| \pm \frac{Md_t}{2I_z} \right| \leq \sigma_{acier(max)}$$

$$-\frac{2I_z\sigma_{acier(max)}}{d_t} \geq M \leq \frac{2I_z\sigma_{acier(max)}}{d_t}$$

$$|M| \leq \frac{2 * 7,98 \times 10^{-11} * 250 \times 10^6}{0,00635}$$

$$|M| \leq 6,28 \text{ Nm}$$

Effort tranchant maximal permis dans la tige

$$|\tau_{yx}| = \left| \frac{VQ_{z,A'}}{I_z b} \right| \leq \tau_{acier(max)} = 250 \text{ MPa}$$

Rappel : La contrainte de cisaillement est maximale lorsque l'effort tranchant est maximal et que le rapport du premier moment sur la largeur de la section est maximal. C'est le cas au plan neutre au niveau de l'encastrement.

$$Q_{z,A'} = \frac{d_t^3}{6} = \frac{0,00635^3}{6}$$

$$Q_{z,A'} = 42,7 \times 10^{-9} \text{ m}^3$$

$$b = d_t = 0,00635 \text{ m}$$

$$|V| \leq \frac{\tau_{acier(max)} I_z b}{Q_{z,A'}}$$

$$|V| \leq \frac{250 \times 10^6 * 7,98 \times 10^{-11} * 0,00635}{42,7 \times 10^{-9}} = 2,97 \times 10^3 \text{ N}$$

$$|V| \leq 2,97 \text{ kN}$$

Effort en tension maximal permis dans la colle (Sous la plaque)

$$A_c = 0,127^2 \text{ m}^2$$

$$\sigma_{ymax(colle)} = \frac{F_{ymax}}{A_c} \leq \sigma_{colle(p)}$$

$$F_{ymax} \leq 0,127^2 * 13,4 \times 10^6 = 216 \text{ 000 N}$$

$$F_{ymax} \leq 216 \text{ kN}$$

Effort en cisaillement permis dans la colle (Sous la plaque)

$$\tau_{colle(plaque)} = \frac{F_x}{A_c} \leq \tau_{colle(p)} = |5 \text{ Mpa}|$$

$$|F_x| \leq A_c \tau_{colle(p)}$$

$$|F_x| \leq 0,127^2 * 5 \times 10^6 = 80 \text{ 600 N}$$

$$|F_x| \leq 80,6 \text{ kN}$$

Effort en cisaillement permis dans la colle (Sous la membrure)

$$A_{c(m)} = 0,0003226 \text{ m}^2$$

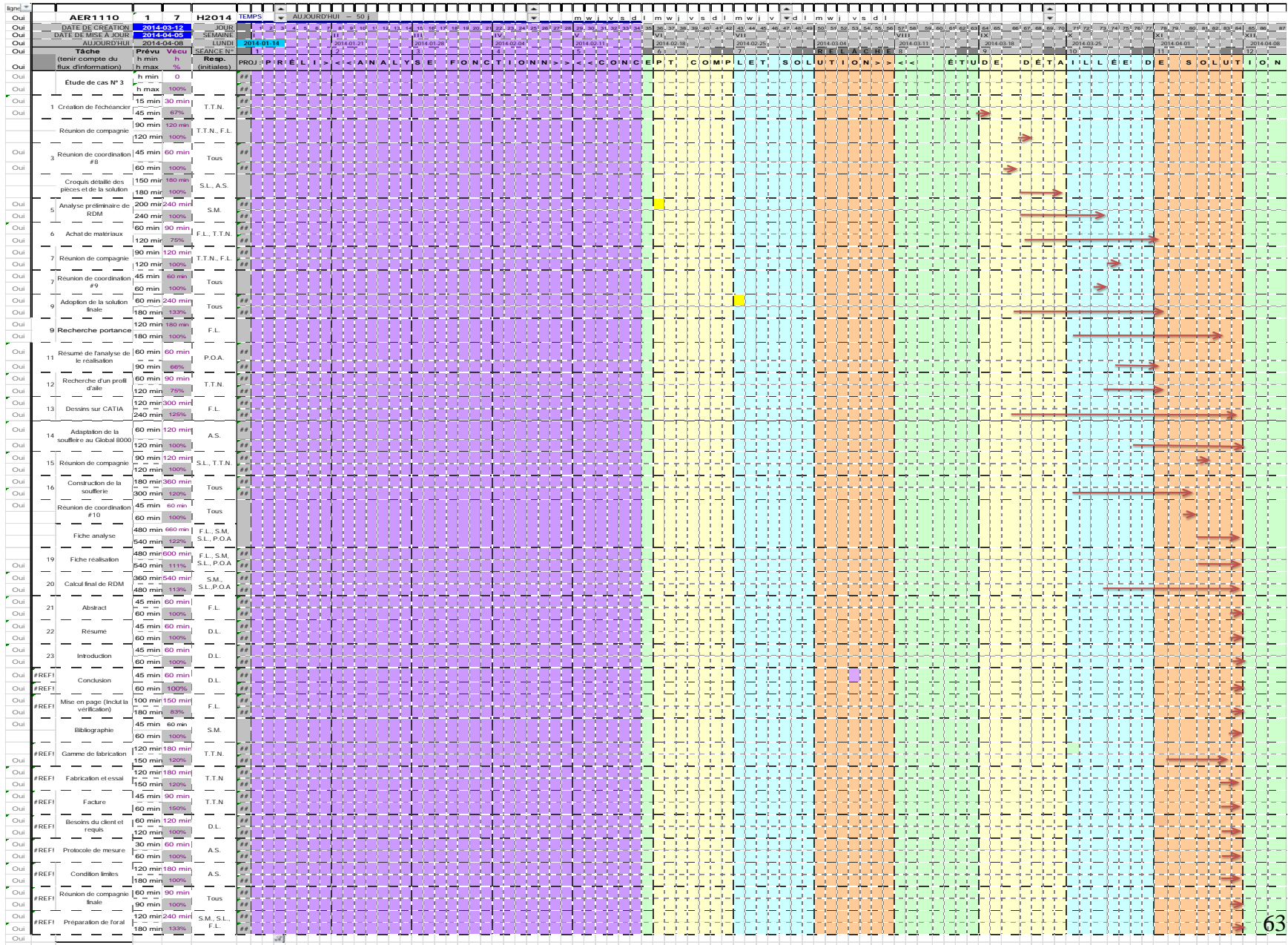
$$\tau_{colle(plaque)} = \frac{F_{xm}}{A_{c(m)}} \leq \tau_{colle(p)} = |5 \text{ Mpa}|$$

$$|F_{xm}| \leq A_{c(m)} \tau_{colle(p)}$$

$$|F_{xm}| \leq 0,0003226 * 5 \times 10^6 = 1 \text{ 610 N}$$

$$|F_{xm}| \leq 1,61 \text{ kN}$$

Annexe H: Échéancier



Annexe I: Bibliographie

- The Dow Chemical Company (2014). *STYROFOAM™ IB-CH-A*. Consulté en avril 2014, sur Dow Building Solution: http://building.dow.com/europe/cf/prod/tech/styro_ibcha.htm
- Alain, P.-O., Lacasse, D., Lessard, F., Nguyen, T. T., Munger, S., & Samson, A. (2014, février). Étude de cas 1.
- Alain, P.-O., Lacasse, D., Lessard, F., Nguyen, T. T., Munger, S., & Samson, A. (2014, mars). Étude de cas 2, Conception d'une soufflerie artisanale.
- Bazergui, A., Bui-Quoc, T., Biron, A., McIntyre, G., & Laberge, C. (2002). *Résistance des matériaux* (3^e éd.). Montréal: Presses Internationales Polytechnique.
- Bombardier. (Octobre 2010). *Bombardier Global 5000*. Consulté en avril 2014, sur businessaircraft.bombardier.com:
http://businessaircraft.bombardier.com/content/dam/bombardier/fr/aircraft/global/global5000/Fact_Sheet/G5000_FR_R3.pdf
- Caradisiac.com. (2010). *sujet537136*. Consulté en avril 2014, sur Caradisiac.com: <http://www.forum-auto.com/pole-technique/mecanique-electronique/sujet537136.htm>
- Cégep de Sainte-Foy . (2011). *dem_elastique.png*. Consulté en mars 2014, sur Cours Nouvelles Technologies: http://recherches.coursinfo.com/2011/lucas_ben/images/dem_elastique.png
- CG Fixe. (2008). *Vis spéciale*. Consulté en mars 2014, sur [cgfixe.fr](http://www.cgfixe.fr):
http://www.cgfixe.fr/contenu/,vis_papillon_vis_a_aillettes,vis_speciale_papillon_inox_a2,10721?idP=838274&idArticle=
- Chafardon, C., Le Colleter, Q., & Poyet, A. (2003). *L'aile d'avion*. Consulté en avril 2014, sur Olympiades de Physique France: <http://www.odpf.org/anterieures/xi/gr-10/memoire.pdf>
- Cincou, A. (2011). *Guide des normes et conventions de représentation graphique*. Montréal: Presses Internationales Polytechnique.
- Conrad. (s.d.). *Equerre En acier, zingage jaune (L x l) 80 mm x 80 mm*. Consulté en avril 2014, sur [conrad.fr](http://www.conrad.fr): <http://www.conrad.fr/ce/fr/product/889636/Equerre-En-acier-zingage-jaune-L-x-l-80-mm-x-80-mm>
- cubes-en-bois.fr. (2014). *cubes en bois ronds 60x60mm – 30mm percés !* Consulté en avril 2014, sur [cubes-en-bois.fr](http://www.cubes-en-bois.fr): <http://www.cubes-en-bois.fr/blog/?p=385>
- Déjeuner au jardin. (2013). *Planches de pin rabotées de 4 cm d'épaisseur*. Récupéré sur dejeuneraujardin.com:

http://www.dejeuneraujardin.com/shop/prod/fromcat/0000809/id/SP4dbad32f1ce21/Planches_de_pin_rabotees_de_4_cm_d_epaisseur.html

- Dorovl. (2009). *Distribution pression profil asymétrique incidence portance zéro*. Consulté en avril 2014, sur Wikimedia Commons:
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Distribution_pression_profil_asym%C3%A9trique_incidence_portance_z%C3%A9ro.png
- Henkel. (mai 2010). *TECHNICAL DATA SHEET - Gel Epoxy*. Consulté en avril 2014, sur lepageproducts.com:
<http://dashboard.lepageproducts.com//upload/english/general/253806b3-0b68-4db5-9e5c-af6e84c7e725.pdf>
- Hobby Lobby. (s.d.). *Krazy Glue All Purple Precision Tip Gel*. Consulté en mars 2014, sur hobbylobby.com:
<http://shop.hobbylobby.com/products/krazy-glue-all-purpose-gel-234831/>
- Jeulin. (s.d.). *Dynamomètre simple 50N*. Consulté en mars 2014, sur jeulin.fr: <http://www.jeulin.fr/fr/a-a1053349-edc100003/article/32204884-Dynamometre-simple-50N.html#.U0GbxPnlr8J>
- Paraschivoiu, I. (1998). *Aérodynamique Subsonique*. Montréal: Éditions de l'École Polytechnique de Montréal.
- Pernot, G. (s.d.). *Calcul et Construction d'un Avion*. Consulté en avril 2014, sur Faites-le vous-même !:
http://www.gilbert-pernot.fr/ailes_calcul_construction.html#profil
- PYC BEARING CO.,LTD. . (2012). *rollerblade bearings*. Consulté en mars 2014, sur bearings-china.com:
<http://www.bearings-china.com/main-products/rollerblade-bearings.htm>
- Quincaillerie Angles. (s.d.). *TIGE FILETEE ZINGUEE LENNIE*. Récupéré sur quincaillerie-angles.fr:
<http://www.quincaillerie-angles.fr/fixation/boulonnerie-acier/tige-filetee-zinguee-lennie-3155.xhtml>
- RCTeam. (s.d.). *HPI Vis Fraisé 4x12mm Z623*. Consulté en avril 2014, sur rcteam.fr:
<http://www.rcteam.fr/vis/6558-hpi-vis-fraise-4x12mm-z623-4944258956237.html>
- ROBOPOLIS. (2002). *Rails en U 1x2x1x35 VEX (Pack de 4)*. Consulté en mars 2014, sur shop-robopolis.com: <http://www.shop-robopolis.com/index.php/fr/pack-de-4-rails-en-u-1x2x1x35-vex.html>
- Sears. (2014). *Starfrit(MD) Balance de cuisine électronique*. Consulté en avril 2014, sur sears.ca:
<http://www.sears.ca/produit/starfritmd-balance-de-cuisine-electronique/611-000026245-93753>
- simulationmatériaux.com. (2014). *Propriétés des matériaux*. Consulté en avril 2014, sur simulationmatériaux.com:
http://www.simulationmatériaux.com/ComportementMecanique/comportement_mecanique_Liste_modules_de_Young.php

SparkFun Electronics. (s.d.). *Ball Bearing - Flanged (1/4" Bore, 1/2" OD)*. Consulté en avril 2014, sur sparkfun.com: <https://www.sparkfun.com/products/12611>

Swagelok. (2014). *Adaptateur de réduction en laiton*. Consulté en avril 2014, sur directindustry.fr: <http://www.directindustry.fr/prod/swagelok/adaptateurs-reduction-laiton-7352-650971.html>

Tableau-noir.net. (s.d.). *Les faces du cylindre*. Consulté en mars 2014, sur Tableau-noir.net: <http://leconmath.tableau-noir.net/pages/solidecylindre-face.html>

The Engineering Toolbox. (s.d.). *Metals and Alloys - Densities*. Consulté en avril 2014, sur The Engineering Toolbox: http://www.engineeringtoolbox.com/metal-alloys-densities-d_50.html

The Engineering ToolBox. (s.d.). *Modulus of Elasticity - Young Modulus for some common Materials*. Consulté en avril 2014, sur The Engineering ToolBox: http://www.engineeringtoolbox.com/young-modulus-d_417.html

Transport Canada. (2013, août 8). *Manuel de navigabilité Chapitre 525*. Consulté en avril 2014, sur tc.gc.ca: <http://tc.gc.ca/fra/aviationcivile/servreg/rac/partie5-normes-525-sous-c-1740.htm>

Truc Construction. (2013). *Les panneaux isolants*. Consulté en avril 2014, sur truconstruction.com: <http://www.truconstruction.com/panneauxisolants.html>

Unimat. (s.d.). *Crochet à bois*. Consulté en Mars 2014, sur unimat.ca: <http://www.unimat.ca/quincaillerie/petite-quincaillerie/attaches-et-roulettes/crochets/crochet-a-bois.html>

Unimat. (s.d.). *PENTURE DE PORTE 3-1/2*. Consulté en mars 2014, sur unimat.ca: <http://www.unimat.ca/quincaillerie/petite-quincaillerie/quincaillerie-d-armoire-et-meuble/pentures/penture-de-porte-3-1-2.html>

Université de Sherbrooke. (2010). *Dev3_2010_Repartie*. Consulté en mars 2014, sur Faculté de Génie - Département de génie Civil: http://www.civil.usherbrooke.ca/cours/gci114/Devoirs/Dev3_2010/Repartie.jpg

University of Maryland Baltimore County (UMBC). (s.d.). *Airfoil lift and drag coefficients*. Consulté en mars 2014, sur Computer Science and Electrical Engineering: http://www.csee.umbc.edu/~squire/cs455_lair.shtml

Wolfram Research. (2014). *Wolfram Alpha*. Consulté en avril 2014, sur wolframalpha.com: <https://www.wolframalpha.com/>

Annexe J: Dessins de détails

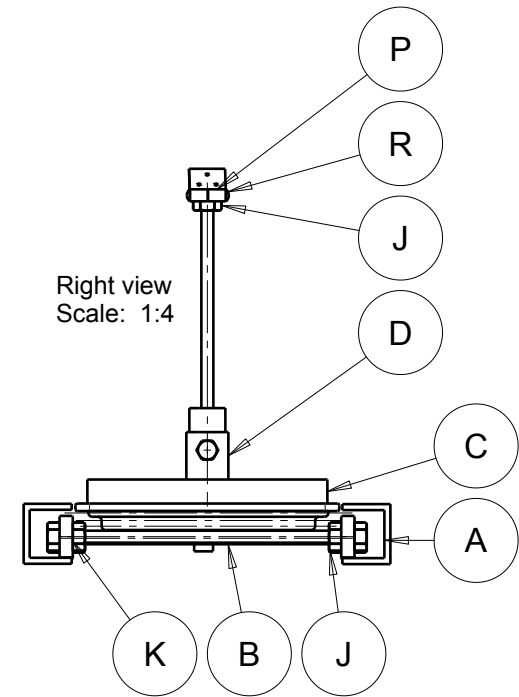
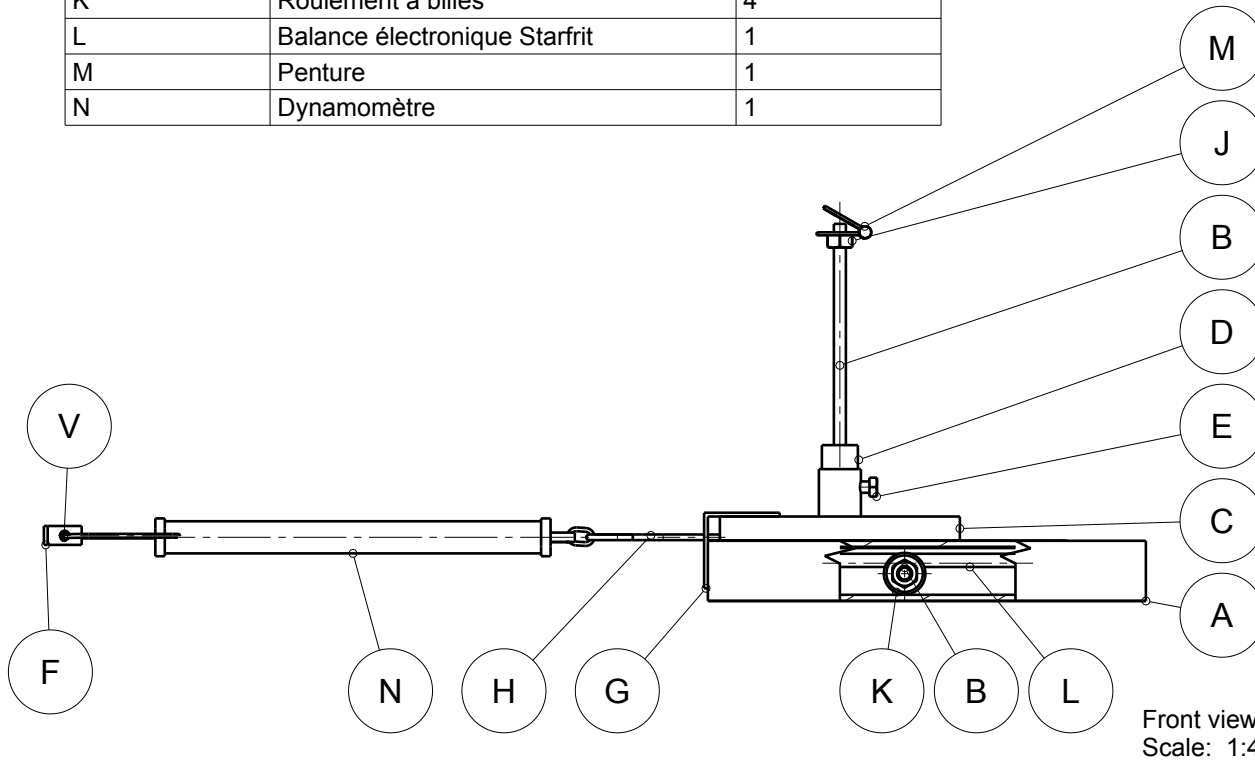
Liste des dessins de détails:

- Vue d'ensemble du système de mesure de portance
- Vue isométrique du système de mesure de portance
- Détails balance électronique Starfrit
- Détails de la peinture
- Détails des rails
- Détails du support de tige et de l'équerre de balance
- Détails de la plaque de MDF
- Détails des essieux

Bill of Material: Mesure_portance

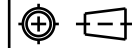
Number	Definition	Quantity
A	Rail de support	2
B	Tige filetée 1/4"	3
C	Plaque de MDF	1
D	Tube de laiton	1
E	Boulon 1/4"	1
F	Équerre 1"	1
G	Équerre 2"	1
H	Crochet	1
J	Écrou 1/4"	9
K	Roulement à billes	4
L	Balance électronique Starfrit	1
M	Penture	1
N	Dynamomètre	1

G
F
E
D
C
B
A



ÉCOLE POLYTECHNIQUE

TITRE: VUE D'ENSEMBLE SYSTÈME DE MESURE DE PORTANCE



ÉCHELLE:

DESSINÉ PAR: FÉLIX LESSARD

SIGNATURE:

ÉQUIPE: 07

DATE: 6 AVRIL 2014

NO.:

10

9

8

7

6

5

4

3

2

1

G

F

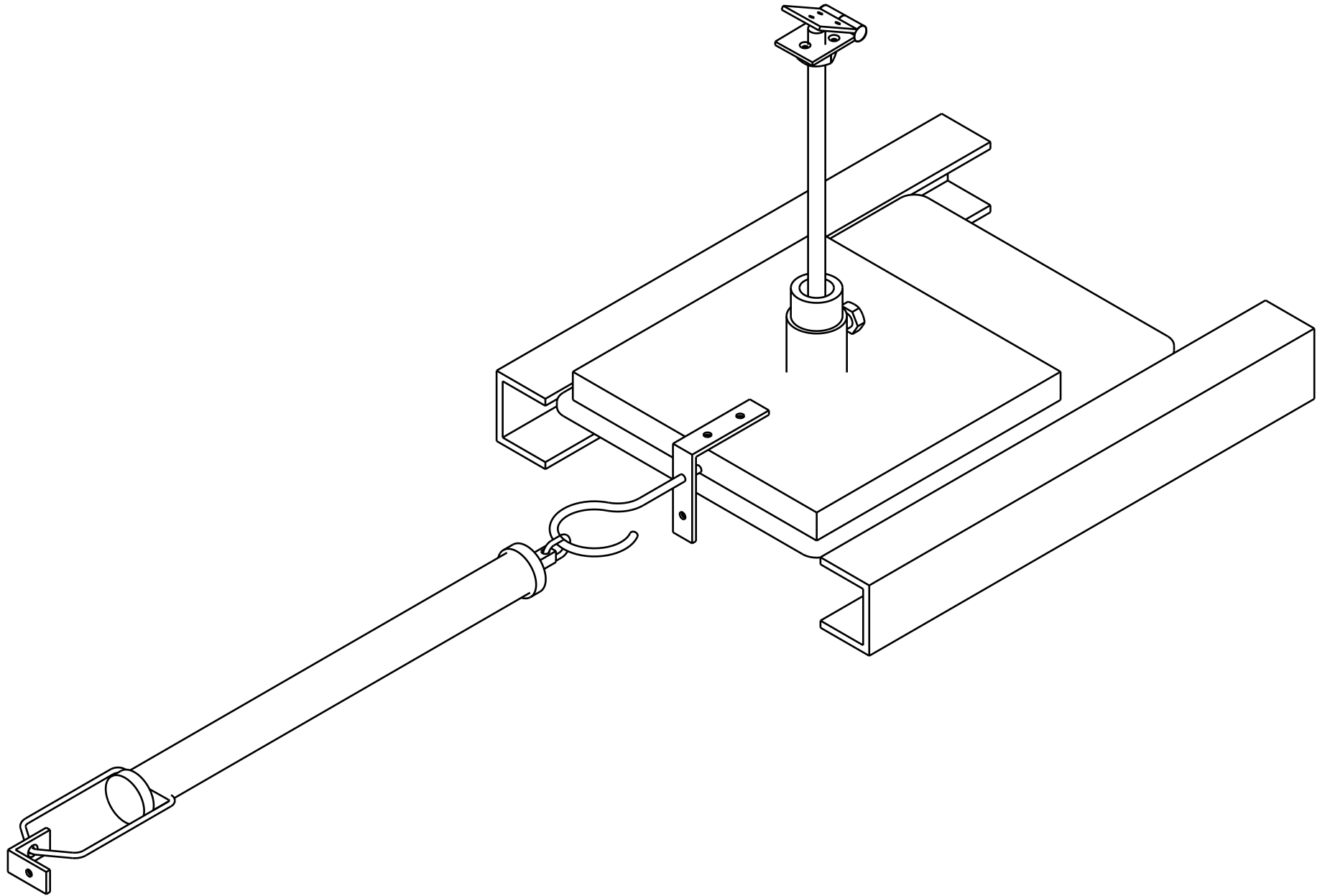
E

D

C

B

A

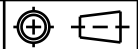


Isometric view
Scale: 1:1



ÉCOLE POLYTECHNIQUE

TITRE: VUE D'ENSEMBLE SYSTÈME DE MESURE DE PORTANCE



ÉCHELLE:

DESSINÉ PAR: FÉLIX LESSARD

SIGNATURE:

ÉQUIPE: 07

DATE: 6 AVRIL 2014

NO.:

10

9

8

7

6

5

4

3

2

1

G

F

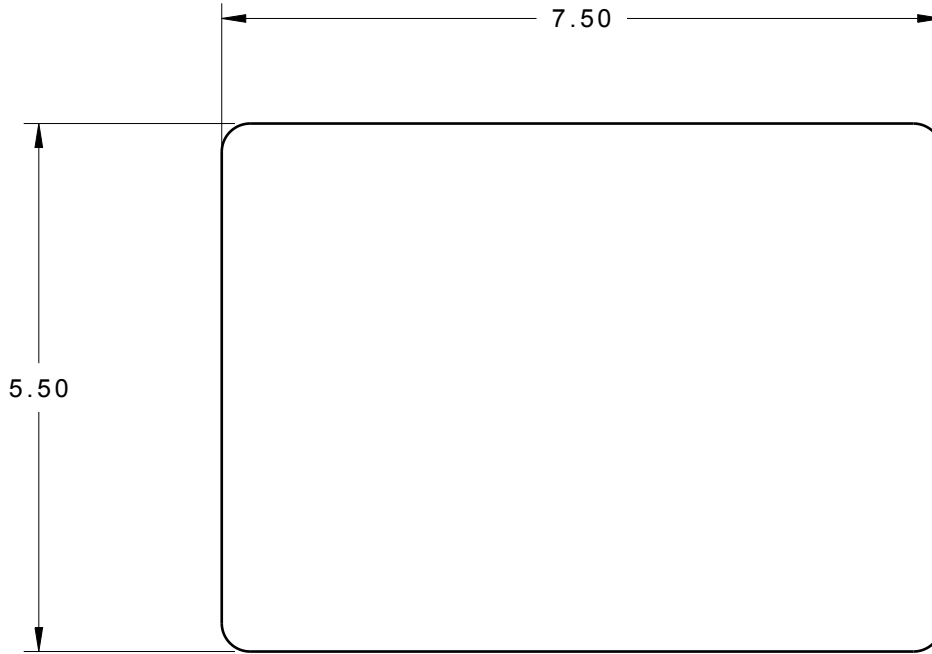
E

D

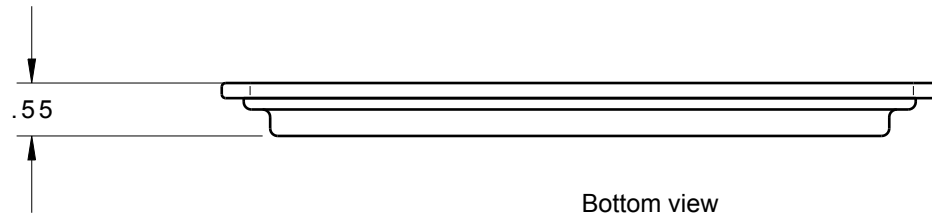
C

B

A



Front view
Scale: 1:2



Bottom view
Scale: 1:2

NOTES GÉNÉRALES:
DIMENSIONS EN POUCHES
MATÉRIAU: PLASTIQUE ET VERRE

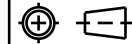
TOLÉRANCES GÉNÉRALES:
X.XX ± 0.01

DESCRIPTION DU PRODUIT:
BALANCEDE CUISINE MINCE EN VERRE STARFRIT



ÉCOLE POLYTECHNIQUE

TITRE: DÉTAILS BALANCE ÉLECTRONIQUE STARFRIT



ÉCHELLE: 1:2

DESSINÉ PAR: FÉLIX LESSARD

SIGNATURE:

ÉQUIPE: 07

DATE: 6 AVRIL 2014

NO.:

10

9

8

7

6

5

4

3

2

1

G

F

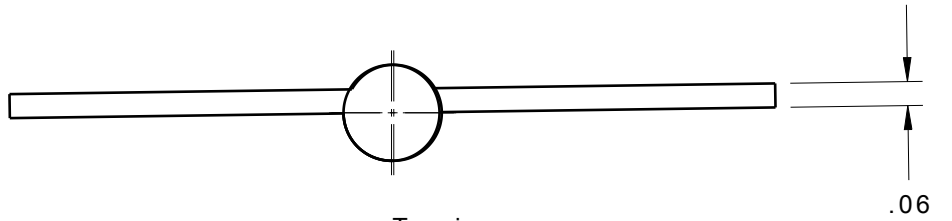
E

D

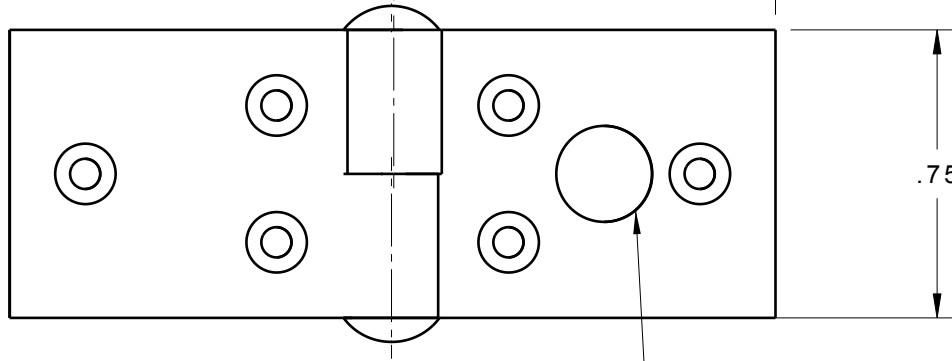
C

B

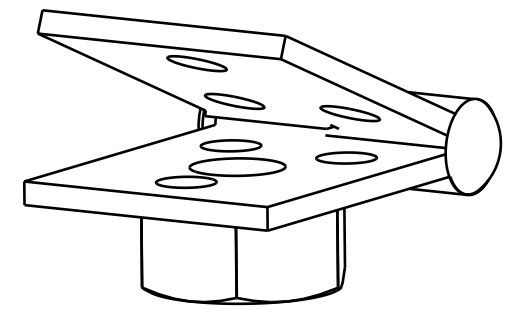
A



.99

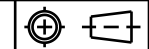


∅0.25



ÉCOLE POLYTECHNIQUE

TITRE: DÉTAILS PENTURE



ÉCHELLE: 2:1

DESSINÉ PAR: FÉLIX LESSARD

SIGNATURE:

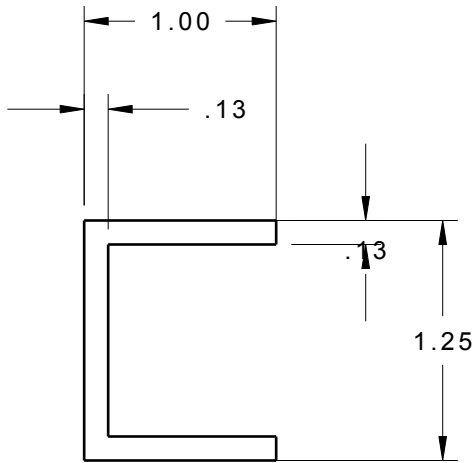
ÉQUIPE: 07

DATE: 7 AVRIL 2014

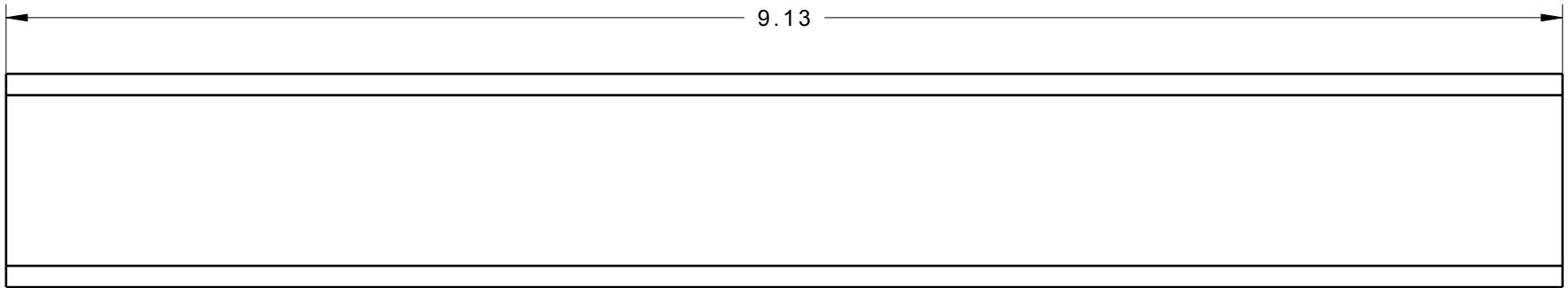
NO.:

10 9 8 7 6 5 4 3 2 1

G
F
E
D
C
B
A



Side View
Scale: 1:1



Front view
Scale: 1:1

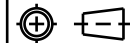
NOTES GÉNÉRALES:
 DIMENSIONS EN POUCES
 MATÉRIAU: ACIER
 LES DIMENSIONS DU PROFIL
 SONT APPROXIMATIVES MAIS
 CELLE DE LA LONGUEUR
 EXACTE

TOLÉRANCES GÉNÉRALES:
 $X.XX \pm 0.01$



ÉCOLE POLYTECHNIQUE

TITRE: DÉTAILS RAILS



ÉCHELLE: 1:1

DESSINÉ PAR: FÉLIX LESSARD

SIGNATURE:

ÉQUIPE: 07

DATE: 6 AVRIL 2014

NO.:

10

9

8

7

6

5

4

3

2

1

G

NOTES GÉNÉRALES:
DIMENSIONS EN POUCES

TOLÉRANCES GÉNÉRALES:
X.XX ±0.1

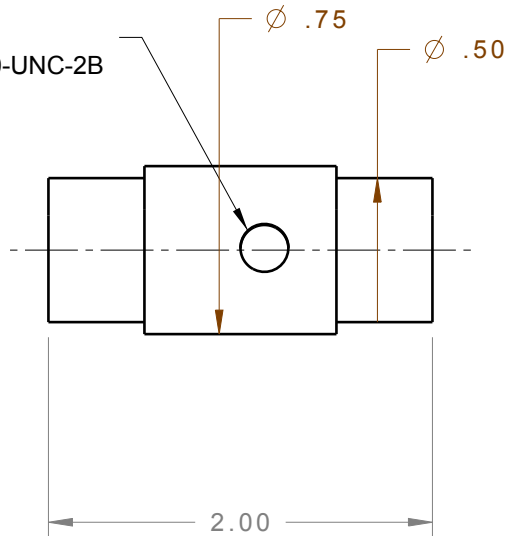
MATÉRIAUX:
SUPPORT DE TIGE: LAITON
ÉQUERRE: STAINLESS STEEL

AUTRES:
LE BOULON DE SERRAGE DU
SUPPORT DE TIGE EST UN
BOULON DE DIAMÈTRE 1/4"

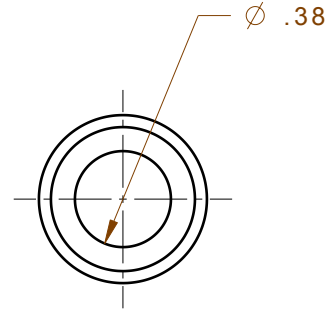
F

PERCER FORET #7
TARAUDER ϕ 1/4 20-UNC-2B

Support Tige
Left view
Scale: 1:1



Support Tige
Front view
Scale: 1:1



E

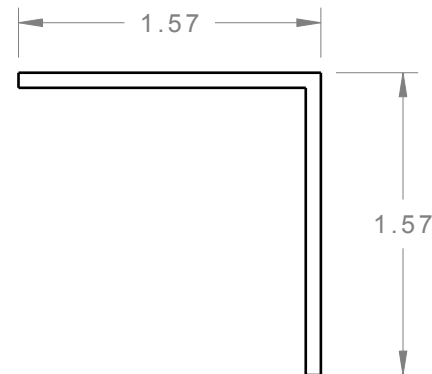
D

C

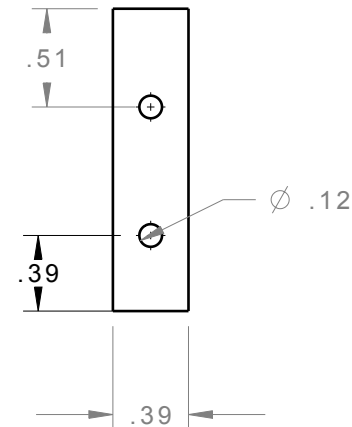
B

A

Équerre Balance
Front view
Scale: 1:1



Équerre Balance
Right view
Scale: 1:1



ÉCOLE POLYTECHNIQUE

TITRE: DÉTAILS DU SUPPORT DE TIGE ET DE L'ÉQUERRE DE BALANCE



ÉCHELLE: 1:1

DESSINÉ PAR: FÉLIX LESSARD

SIGNATURE:

ÉQUIPE: 07

DATE: 6 AVRIL 2014

NO.:

10

9

8

7

6

5

4

3

2

1

G

F

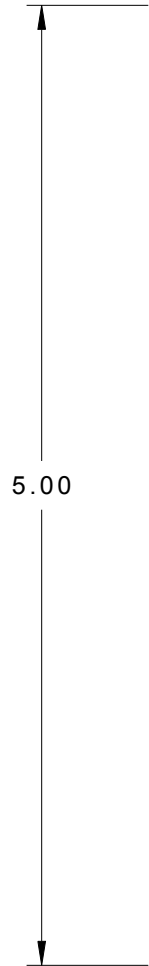
E

D

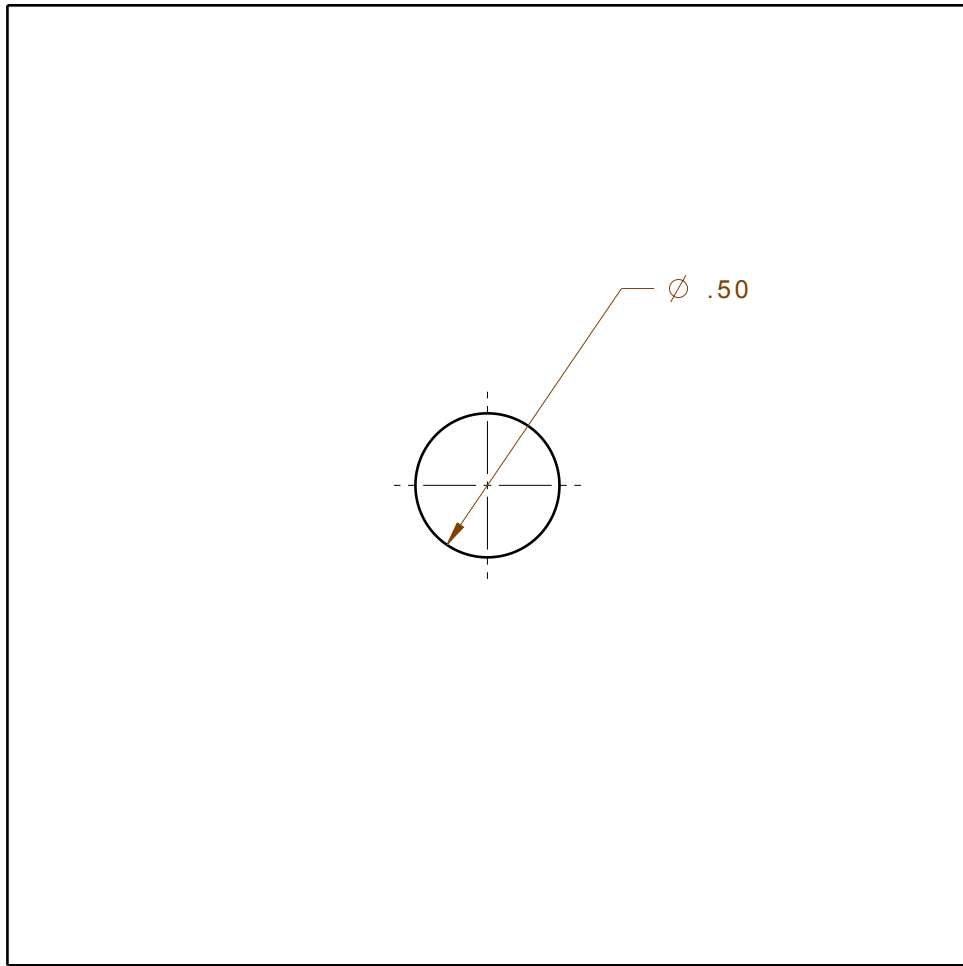
C

B

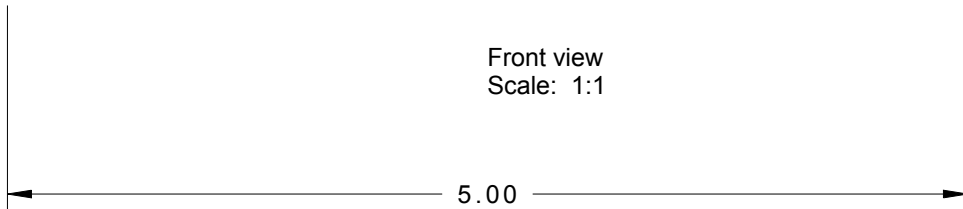
A



5.00

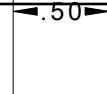


Front view
Scale: 1:1

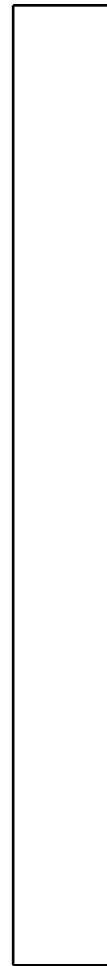


5.00

∅ .50



0.50



Right view
Scale: 1:1

NOTES GÉNÉRALES:
DIMENSIONS EN
POUCES
MATÉRIAU: MDF

TOLÉRANCES
GÉNÉRALES:
X.XX ±0.01



ÉCOLE POLYTECHNIQUE

TITRE: DÉTAILS DE LA PLAQUE DE MDF



ÉCHELLE: 1:1

DESSINÉ PAR: FÉLIX LESSARD

SIGNATURE:

ÉQUIPE: 07

DATE: 6 AVRIL 2014

NO.:

10

9

8

7

6

5

4

3

2

1

G

TIGE FILETÉE
Front view
Scale: 1:1

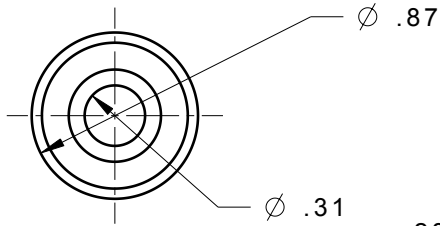
ϕ .25

F

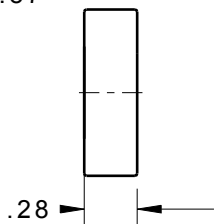
E

6.50

D



BEARING
Front view
Scale: 1:1



Right view
Scale: 1:1

NOTES GÉNÉRALES:
DIMENSIONS EN POUCES
MATÉRIAU: ACIER

TOLÉRANCES GÉNÉRALES:
X.XX \pm 0.01

AUTRE:
LES ÉCROUS SONT DE TYPE 1/4"

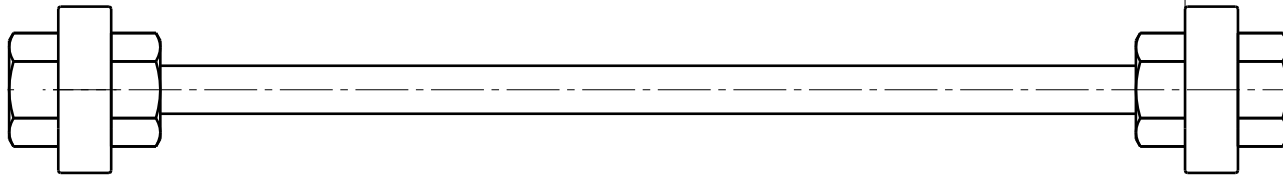
C

B

ASSEMBLAGE
Front view
Scale: 1:1

5.59

A



ÉCOLE POLYTECHNIQUE

TITRE: DÉTAILS DES ESSIEUX



ÉCHELLE: 1:1

DESSINÉ PAR: FÉLIX LESSARD

SIGNATURE:

ÉQUIPE: 07

DATE: 6 AVRIL 2014

NO.:

Addendum

Introduction

Ce document fait suite à l'évaluation de la soufflerie par un processus de test et la remise de la troisième étude de cas. Il bonifie celle-ci par un bref retour sur l'intégration des systèmes, une courte analyse de nos résultats et un retour général sur le cours. Cet addendum a pour but de cibler les performances et apprentissages de l'équipe ainsi que les modifications que l'on apporterait à notre démarche si c'était à refaire. Il sert ainsi d'évaluation de nos performances et servira à améliorer notre démarche dans les prochains cours de Projet Intégrateur. C'est la dernière étape du processus de conception de notre soufflerie.

Tests, analyse et interprétation des résultats

Compagnie B :

Temps d'assemblage

Temps d'assemblage (sec)	45
---------------------------------	-----------

Tests sur la mesure de la portance

No Test	Prototype	Angle d'attaque	Vitesse de l'écoulement	Portance prédite	Portance mesurée	Écart (%)
1	S1223	15°	10 m/s	975g	788g	19.18
2	S1223	15°	5.5 m/s	420g	355g	15.48
3	S1223	0°	10 m/s	600g	520g	13.33
4	S1223	0°	5.5 m/s	200g	290g	45

Poids de l'ensemble

Poids (kg)	Prédit (kg)	Mesuré (kg)	Écart (%)
	11.4	10.7	6.14

Centre de masse

Centre de masse					
X (mm)		Y (mm)		Z (mm)	
Prédit	Mesuré	Prédit	Mesuré	Prédit	Mesuré
523	457	141	108	152	140
Écart : 12.62%		Écart : 23.4%		Écart : 7.89%	

Discussion des écarts entre les valeurs prédites et mesurées

Dans un premier temps, nous avons décidé de mesurer le temps d'assemblage de la soufflerie, bien que ce critère n'était pas matière à évaluation. L'expérience a été faite pour la toute première fois lors de la présentation et le résultat obtenu de 45 secondes est satisfaisant considérant que la cible concernant cet aspect était de 50 secondes.

Dans un deuxième temps, tous nos tests de mesure de portance ont été faits avec un profil d'aile standard S1223 et pour les trois premiers résultats nous obtenons un pourcentage d'écart qui tourne autour de 15%. Par ailleurs, pour ces trois résultats notre cible était supérieure à la valeur mesurée, ce qui signifie que quelque chose a changé entre les tests et la présentation. On peut expliquer une grande partie de cet écart par le fait que notre moteur était fait pour fonctionner sur une tension de 12 V et une intensité de 25 A, mais lors des tests nous avons tenté d'augmenter ces paramètres pour obtenir des résultats plus significatifs. Or, ce changement peut avoir « brûlé » le moteur et il ne fournissait plus le même rendement une fois la présentation venue. Enfin, pour le quatrième test nous avons sous-estimé de 45% la valeur de la portance générée. Nous croyons que l'écart provient de la vitesse d'écoulement d'air, qui était difficile à mesurer et qui pouvait avoir quelque peu changée entre les deux tests. De plus, notre angle d'attaque était précis à environ $\pm 2^\circ$, ce qui peut avoir influé sur les résultats.

Plusieurs autres facteurs influencent nos résultats. Par exemple, l'écoulement de notre flux n'est pas complètement laminaire et l'effet de sol a été négligé. De même la surface de notre profil portant était irrégulière et il manquait de stabilité. Une analyse aérodynamique plus poussée permettrait de déterminer comment réduire l'impact de ces facteurs. Certaines améliorations pourraient être apportées au protocole de mesure pour éviter les erreurs comme la mesure de la portance en millilitres de lait.

Intégration du sous-système avec les autres partenaires

Nous sommes très satisfaits du travail qui a été fait entre les équipes pour intégrer les différentes parties. Plusieurs habitudes, normes et idées établies dès le début en compagnie nous ont permis de rendre l'interfaçage plus facile. En voici la liste :

- Nous avons établi dès le départ des moyens pour faciliter la communication et les échanges d'informations et de fichiers. Un groupe Facebook a été créé où tous les membres pouvaient

écrire des commentaires et les autres pouvaient y répondre. De plus, pour le partage des fichiers, un dossier Google Drive a été créé pour permettre à tous de partager et de travailler en même temps sur des fichiers Word, Excel ou Catia.

- Nous avons fait des réunions de coordination de compagnie chaque semaine où deux représentants de chaque équipe étaient présents pour discuter.
- Nous avons bien coordonné les requis entre chaque équipe et ils étaient donnés à l'avance ou le plus tôt possible pour permettre autres équipes de s'y ajuster.
- Nous nous sommes supportés lorsqu'il y avait un problème avec une équipe, par exemple, si une équipe n'arrivait pas à trouver une pièce ou à l'obtenir, les autres mettaient en place les moyens pour l'avoir.
- Nous nous sommes fixé des dates d'échéances ainsi qu'un plan de match dès le début. Lors de la première réunion, nous avons regardé et fait la liste des tâches qui sont nécessaires pour terminer la soufflerie et nous avons fait un calendrier avec chacune des étapes.

Cependant, il y aurait quelques facteurs qui auraient pu être améliorés pour rendre encore plus efficace l'interfaçage entre les équipes. En voici la liste :

- Les équipes auraient pu envoyer des membres dans les autres équipes afin de recueillir de l'information, aider avec les tâches et ainsi faire un encore meilleur lien entre les équipes.
- Chaque équipe aurait pu faire un compte rendu du travail effectué pendant la semaine, question de mettre au courant les autres équipes pour améliorer les liens.
- Malgré les nombreuses méthodes de communication, les équipes discutaient la plupart du temps dans la réunion de coordination ou dans la période en classe. Plus de communication hors classe ou réunion auraient aidé à faciliter et améliorer l'interfaçage.

Leçons retenues au cours du projet

Le cours projet intégrateur AER1110 nous a appris plusieurs leçons qui nous serviront tout au long de notre parcours scolaire et de notre future carrière. Premièrement, il est important de communiquer avec son équipe de travail. Afin d'entretenir une meilleure communication, faire plus d'une réunion par semaine aurait été bénéfique à l'équipe. Deuxièmement, il est important de prendre en compte les besoins du client tout au long du processus de prise de décision. Il ne faut pas s'en écarter. Si le projet était à refaire, nous aurions organisé davantage de réunions avec celui-ci afin de clarifier son point de vue vis-à-vis le projet et modifier la conception du produit si nécessaire. Pour terminer, comme le client l'a lui-même mentionné, nous aurions dû mettre plus d'emphasis sur l'aspect «sécurité» de la soufflerie. En effet, le produit est destiné à un usage dans les écoles secondaires, il était donc de notre responsabilité de faire en sorte que le produit soit utilisable dans ce milieu.

Conclusion

Cet addendum permet de clore le processus de conception de notre soufflerie. L'analyse des tests ainsi que les retours sur l'intégration des systèmes et sur le cours en général permettent de déterminer plusieurs améliorations à apporter. Concernant la soufflerie, la sécurité devrait être améliorée pour permettre son utilisation dans les écoles. Les écarts entre les mesures et les prédictions vont de 15% à 45%. Ainsi, les performances du moteur semblent avoir été réduites. Il pourrait avoir été endommagé lors des tests. Des améliorations au protocole de mesures et des modifications suite à une analyse aérodynamique plus poussée permettraient de réduire les écarts entre les prévisions et les mesures. L'intégration a bien fonctionné dans l'ensemble principalement grâce aux multiples moyens de communication mis en place. Par contre plusieurs améliorations pourraient être apportées comme la présence de responsables de l'intégration dans chaque équipe et la mise en ligne d'un compte-rendu de la progression de la tâche sur une base régulière. Le cours a permis de constater que la communication est un facteur de réussite majeur dans le travail d'équipe. Aussi, garder les besoins du client en tête tout au long du processus de conception permet d'éviter certaines erreurs comme le manque de sécurité de notre soufflerie. La portée de ce document est limitée par sa longueur et la profondeur de l'analyse effectuée. Il est donc recommandé de faire une analyse plus complète de nos résultats ainsi que des améliorations à apporter à notre produit. Cette analyse constitue l'étape suivante dans le processus de conception et pourrait donner lieu à une quatrième étude de cas.