



Projet de fin d'étude court
Département Mécanique

Conception d'une soufflerie de démonstration

Présenté par :
Decelle Lucas
Nicolas Kévin

Année : 2016/2017

Tuteur du projet :
Mr. Berti Stefano
Mr. Calzavarini Enrico

Lecteur :
Mr. Chielens Arnaud

Sommaire

Introduction	1
1. Présentation d'une soufflerie	2
1.1 Soufflerie ouverte / fermée	2
1.2 Soufflerie ouverte	2
1.2.1 Chambre de régulation	2
1.2.2 Chambre de contraction	3
1.2.3 Chambre de test	3
1.2.4 Diffuseur	3
2. Conception	5
2.1 Cahier des charges	5
2.2 Choix des matériaux	6
2.3 Dimensionnement	7
2.3.1 Ratio de contraction et chambre de test	7
2.3.2 Equation du convergent	7
2.3.3 Choix pour la chambre de régulation	9
2.3.4 Longueur et angle de divergence du diffuseur	9
2.3.5 Calcul de pertes de charges et dimensionnement du ventilateur	10
2.4 Solution d'ouverture de la chambre de test	10
2.5 Méthode d'assemblage	11
3. Fabrication	12
3.1 Découpeuse laser	12
3.2 Découpe des tasseaux	12
3.3 Chambre de contraction	12
3.4 Assemblage	13
3.4.1 Chambre de régulation et diffuseur	13
3.4.2 Chambre de test	14
Bibliographie	15
Conclusion	16

Liste des figures

Fig 1.1 : Schémas possibles pour le nid d'abeille	2
Fig 1.2 : Schéma du convergent	3
Fig 1.3 : Schéma du diffuseur	4
Fig 2.1 : Profil du convergent	7
Fig 2.2 : Modélisation du convergent	9
Fig 2.3 : Ouverture pour changement de test	11
Fig 2.4 : Montage des parties avec cadres en bois	11
Fig 3.1 : Découpe des plaques du convergent	12
Fig 3.2 : Plaque du convergent	13
Fig 3.3 : Pliage des plaques du convergent	13
Fig 3.4 : Montage de la chambre de test et du diffuseur	14
Fig 3.5 : Collage de l'acétone	14

Introduction

La mécanique des fluides est une composante essentielle à la conception de n'importe quelle structure à l'air libre, en contact avec de l'eau, en mouvement rapide. En effet, bien qu'invisible l'air joue un rôle très important dans des domaines comme le transport, ou la production d'énergie via des éoliennes. La compréhension de son comportement sur un objet, mobile ou d'une certaine forme permet des applications comme le vol d'un avion, la mise en rotation de la turbine de l'éolienne. On peut alors améliorer le design de ces engins pour avoir de meilleurs rendements, une consommation de carburant plus faible dans le cas d'une voiture par exemple : une meilleure pénétration dans l'air signifie moins de résistance et donc moins d'énergie pour faire rouler la voiture.

Dans le but de sensibiliser et montrer les bases de l'écoulement des fluides sur un objet, une soufflerie permet des expériences simples et assez parlantes visuellement. On peut grâce à un brumisateur faire apparaître les lignes de courant et leurs déformations face à un objet. On peut aussi mettre en avant les phénomènes de turbulences, de traînée et de portance. Une soufflerie assez sophistiquée permet également des études et mesures poussées.

Ainsi il est donc intéressant pour des forums ou des cours, d'avoir une soufflerie réduite et transportable afin de mettre tous ces phénomènes facilement en avant.

1. Présentation d'une soufflerie

1.1 Soufflerie ouverte / fermée

Il existe deux grands types de souffleries. Ils se distinguent par leur circuit qui est ouvert ou fermé, c'est à dire que pour une soufflerie à circuit ouvert, on aspire l'air de l'extérieur pour la rejeter à l'extérieur en fin de circuit, pour un circuit fermé, on ajoute une boucle en fin de circuit pour la réinjecter en début de circuit.

L'avantage d'une soufflerie à circuit fermé est de pouvoir contrôler la température et la pression lors des essais. Néanmoins elle est beaucoup plus compliquée à concevoir car elle comporte plus d'éléments et notamment des coudes qui créent des pertes de charges. Il faut donc étudier plus de détails pour avoir une bonne qualité de flux lors de la conception d'un circuit fermé.

Pour cela, le choix de faire une soufflerie en circuit ouvert semble plus judicieux car il est moins coûteux et plus facile à mettre en œuvre. De plus pour une utilisation pour des démonstrations, une soufflerie fermée n'a pas beaucoup plus d'intérêt en plus d'être plus encombrante.

Il est à noter que la plupart des souffleries fonctionnent non pas en soufflant mais en aspirant, cela permet un meilleur contrôle de l'air qui s'écoule dans le système.

1.2 Soufflerie ouverte

1.2.1 Chambre de régulation

Tout d'abord, il faut installer au début du système une partie qui sert à aligner les lignes de flux d'air et de réduire le taux de turbulences pour avoir un écoulement le plus laminaire possible avant le passage dans la contraction. Pour cela on place une chambre qui contient une structure en nid d'abeille ainsi que des écrans d'anti-turbulences.

Le nid d'abeille est généralement le premier composant que le flux rencontre dans un circuit ouvert. Son but est de réduire la turbulence dans le flux et de supprimer la torsion de l'air entrant. Il peut être décrit comme un 'grillage' mais avec une longueur plus élevée : il faut idéalement que celle-ci soit dix fois supérieure au diamètre d'une maille du nid d'abeille. Les mailles peuvent être de forme ronde, hexagonale ou carrée, la plus optimale (mais aussi difficile à réaliser) étant la forme hexagonale.

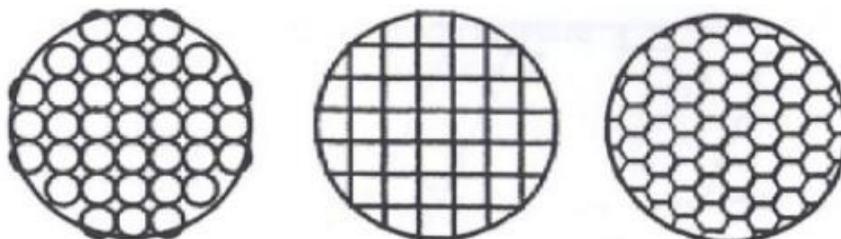


Fig 1.1 : Schémas possibles pour le nid d'abeille

Après le nid d'abeille, un espace est laissé afin de laisser au flux le temps de se réguler avant de rentrer dans la phase de contraction.

Afin de réduire encore plus le taux de turbulence, on peut placer un ou plusieurs écrans anti-turbulents dans la chambre de régulation.

1.2.2 Chambre de contraction

Après avoir obtenu un flux sans torsion et avoir minimisé les turbulences, l'air passe dans une phase de contraction qui va permettre d'accélérer le flux et de réduire encore les turbulences axiales. C'est la phase la plus cruciale de la soufflerie pour avoir un flux dont la vitesse est homogène dans toute la section de la chambre de test. La forme est assez complexe et plusieurs modèles sont possibles mais l'idée est d'avoir un profil qui n'oppose pas une résistance directe au flux comme des angles droits. Les études effectuées sur la forme du convergent donnent des résultats assez similaires sur la forme idéale à obtenir. Le profil est une courbe qui peut être régie par des polynômes variant du 3^e degré au 5^e degré.

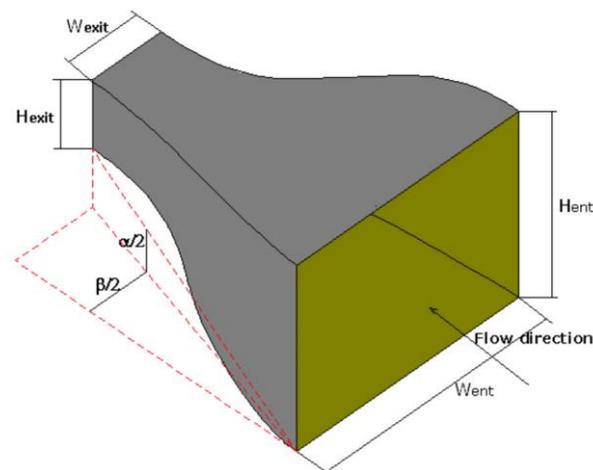


Fig 1.2 : Schéma du convergent

1.2.3 Chambre de test

La chambre de test est comme son nom l'indique la partie où les objets vont être placés pour être testés. C'est donc la partie de la soufflerie où le flux d'air est désiré être le plus uniforme possible.

De nombreuses applications sont possibles en soufflerie, et de nombreux modèles peuvent être testés en chambre de test, tels que des voitures, des profils d'aile d'avion, des éoliennes.

1.2.4 Le diffuseur

La fonction du diffuseur est de permettre au flux d'air sortant de la chambre de test de se disperser et de progressivement décélérer, ce qui réduit la pression dynamique et augmente la pression statique.

La forme du diffuseur n'est pas un rectangle comme la chambre de test mais ses murs sont inclinés d'un angle qui a été défini comme devant être inférieur à 5° (l'idéal étant un angle de 3 à 3,5° [1]).

C'est aussi dans la partie diffuseur qu'est disposée l'hélice visant à créer l'aspiration nécessaire au fonctionnement de la soufflerie.

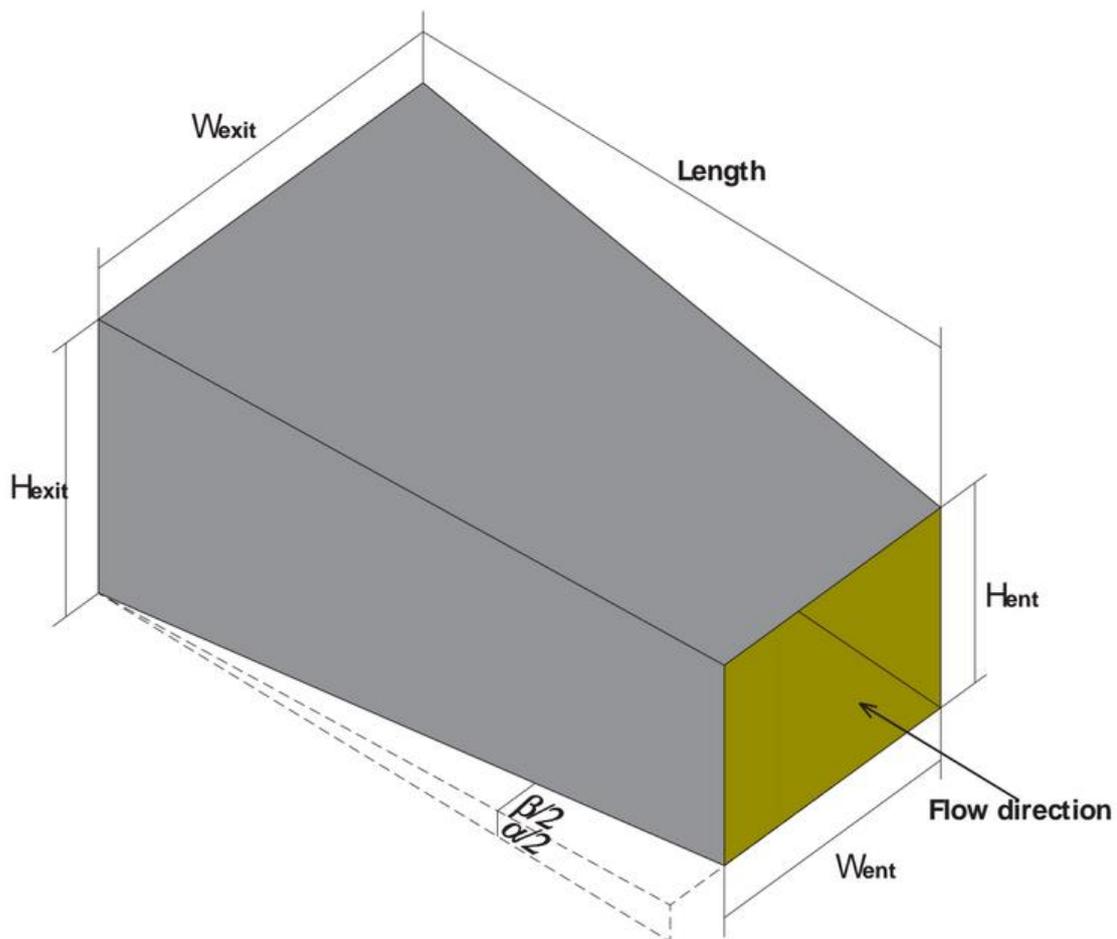


Fig 1.3 : Schéma du diffuseur

2. Conception

2.1 Cahier des charges

Contexte et définition du problème

Dans un but de vulgarisation scientifique dans le domaine de la mécanique des fluides, un système de soufflerie avec une chambre de test est intéressant. En effet, elle permet de montrer avec par exemple une aile d'avion miniaturisée les notions de portance et de traînée en fonction de l'inclinaison de cette dernière. On peut également mettre en avant les deux régimes d'écoulements existant, turbulent et laminaire et montrer ce qu'il se passe lorsque l'air entre en contact avec un objet disposé dans la chambre de test.

Toutes ces applications permettent ensuite d'expliquer comment la forme des éléments liés à l'air comme les avions, les éoliennes, etc... sont conçus.

Objectif

Créer une soufflerie qui peut être amenée à des forums de science ou des cours afin d'illustrer les explications et sensibiliser sur le sujet de la mécanique des fluides.

Périmètre d'utilisation

Tout public

Description fonctionnelle

Objectif	Description	Contraintes	Niveau de tolérance
Être facilement transportable	Le but est de pouvoir l'amener sur des forums pour des démonstrations ou le déplacer en amphithéâtre pour des cours. La soufflerie doit rentrer dans une voiture.	Longueur \approx 1m Et/Ou Facilement démontable	Aucune

Montrer les phénomènes propres aux écoulements	Les tests doivent être bien visibles pour l'assemblée pour montrer les phénomènes de portance, turbulence,...	Chambre de test = 200x200 1.400 Matériaux transparents (plexiglas,...)	Aucune
Être facilement adaptable pour différents tests	Les tests doivent être variés, par exemple avec une aile d'avion ou une éolienne. Il est donc utile de pouvoir changer rapidement	Changement de test : moins de 5 min	Aucune
Avoir un écoulement propre et contrôlé	Pour pouvoir montrer les régimes d'écoulement, il faut que celui-ci soit propre et puisse être modifié	Écoulement laminaire Et Écoulement turbulent	Aucune
Posséder un faible coût de production	La soufflerie doit être peu coûteuse car elle sert juste pour des démonstrations et non à réaliser des études poussées	Budget nul Utiliser les moyens mis à disposition par Polytech. Acheter à moindre coût	Aucune

2.2 Choix des matériaux

Au départ, aucun budget n'était disponible pour réaliser la soufflerie. Le prix de cette dernière devait donc être minimal, de préférence inférieur à 100 euros.

Cette contrainte nous a amené à choisir des matériaux peu chers, et à effectuer des choix de conceptions adaptés à ces derniers.

Quatre matériaux ont été retenus pour notre projet :

- Le *plexiglass*, peu cher, transparent (pour la visualisation de la chambre de test) et pouvant être coupé à la découpe laser ;
- Du *PVC* pour la chambre de contraction, facilement modulable pour réaliser des formes complexes, peu cher et relativement résistant ;

- Du *contreplaqué peuplier* afin de réaliser le reste de la soufflerie (chambre de régularisation, plaque inférieure de la chambre de test et diffuseur), ce matériau étant relativement peu coûteux et découpable à la découpe laser ;
- Des *tasseaux en bois* afin de réaliser des cadres en bois et permettre l'assemblage des différentes parties.

Les autres éléments seront des éléments d'assemblage tels que des vis, plaques d'aluminium.

2.3 Dimensionnement

2.3.1 Ratio de contraction et chambre de test

Les dimensions de la chambre de test vont déterminer la taille globale du système. La taille de la chambre est arbitraire, à définir en fonction du besoin. Ensuite, tout le dimensionnement se fait à partir de la taille de cette chambre.

En prenant en compte la soufflerie prêtée par le forum des sciences de Villeneuve d'Ascq, on fait le choix d'avoir une chambre de test de **200 x 200 x 1.400 mm**.

Un deuxième élément essentiel à déterminer est le ratio de contraction qui correspond au ratio de la surface en entrée du convergent par rapport à sa sortie. Après recherche il découle que le taux de contraction idéal serait de 9 mais qu'un taux compris entre 4 et 6 est suffisant pour des applications simples [2].

Le principal problème est que plus le taux de contraction est grand plus le convergent sera grand et plus le système sera grand. Un des critères le plus important du cahier des charges est d'avoir une soufflerie assez compacte. En modélisant la taille théorique de la soufflerie sur un excel en fonction de son ratio de contraction, on trouve une longueur de 1.6m pour un ratio de 4 et 2.1m pour un ratio de 5. La taille espérée de 1m est donc largement dépassée, on choisit donc un **ratio de contraction de 4** et il est nécessaire de pouvoir démonter la soufflerie pour pouvoir la transporter.

2.3.2 Equation du convergent

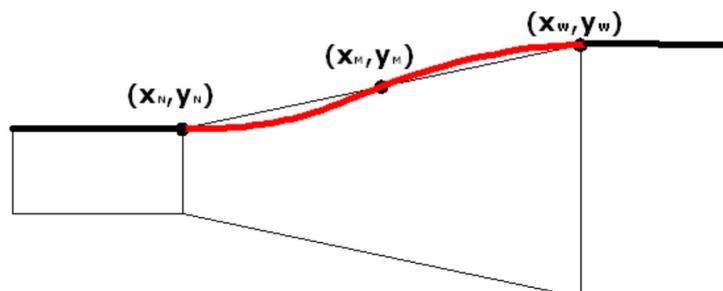


Fig 2.1 : Profil du convergent

Pour dimensionner et trouver l'équation du profil du convergent on place deux points en début et en fin de convergent. Avec les coordonnées de ces deux points, on possède assez de conditions limites pour résoudre l'équation du profil.

La dimension de la chambre de test de 200 x 200 mm et le ratio de contraction de 4 permettent de connaître la dimension d'entrée et sortie de la chambre de contraction qui est respectivement de **200 x 200 mm et 400 x 400 mm**.

Ensuite étant donné que l'angle conseillé dans la documentation de la droite entre les points N et W du profil est de **12°**, on trouve par calcul que le convergent a une longueur de **470mm**.

Sur des sources d'une soufflerie de la NASA [3], l'équation est un système polynomial du cinquième degré de la forme :

$$y = ax^5 + bx^4 + cx^3 + dx^2 + ex + f$$

On connaît les coordonnées des points N (0;100) et W (470;200). De plus les tangentes à ces points sont horizontales et il y a deux points d'inflexion.

Les conditions limites sont donc :

Au point N : pour $x = 0$, $y = 100$

$$y' = 0$$

$$y'' = 0$$

Au point W : pour $x = 470$, $y = 200$

$$y' = 0$$

$$y'' = 0$$

On obtient ainsi les 6 équations nécessaires pour trouver les 6 inconnues du polynôme que l'on résout grâce à un logiciel utilisant la résolution des systèmes polynomiaux par la méthode de Gauss.

L'équation du profil trouvée est ainsi :

$$\square = \square\square^5 + \square\square^4 + \square\square^3 + \square\square^2 + \square\square + \square$$

On modélise ensuite la forme sous *Catia generative shape design* en extrudant la courbe paramétrée par l'équation trouvée. En coupant ensuite ce qui 'dépassé' aux intersections, on obtient la modélisation du convergent.

Une dernière manipulation permet de déplier les surfaces courbées afin d'avoir la forme de la plaque à découper pour pouvoir fabriquer le convergent.

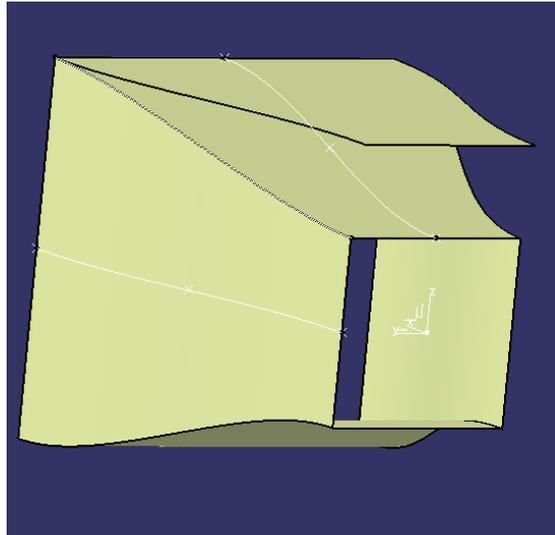


Fig 2.2 : Modélisation du convergent

2.3.3 Choix pour la chambre de régulation

La longueur de la chambre de régulation ne découle pas vraiment d'études poussées en CFD, mais elle doit néanmoins être suffisamment grande pour stabiliser le flux avant que ce dernier ne rentre dans la chambre de contraction. Si le flux n'est pas stable à cette étape, on va créer de la turbulence par la suite.

Une formule permettant d'évaluer cette longueur est donnée ci-dessous [2] :

$$L = \frac{W}{N} \cdot l$$

Avec L la longueur de la chambre de régulation, N le ratio de contraction défini précédemment, W la largeur de la chambre de test et l une longueur sans dimension basée sur le diamètre hydraulique et qui doit être au minimum égale à 0,60 (valeur que nous avons choisi).

Pour un ratio de contraction de 4, nous obtenons une longueur de chambre de régulation égale à 20 cm.

Au niveau de la structure en nid d'abeille, nous avons choisi d'utiliser des pailles à soda, choix qui est le moins cher et très satisfaisant pour notre application. Cela permet d'obtenir un diamètre de maille de 3mm et une longueur largement supérieure à 10 fois ce dernier. Les pailles seront coupées et de préférence collées entre elles.

Le meilleur motif est le motif hexagonal, et le deuxième meilleur motif est le carré, mais il est très compliqué et cher de se procurer de tels motifs possédant une grande longueur.

Enfin vient le choix de l'écran anti-turbulent, qui sera disposé suffisamment avant l'entrée de la chambre de contraction pour que le flux soit bien stable en arrivant dans cette dernière. Cet écran sera un grillage en acier de maille suffisamment petite.

2.3.4 Longueur et angle de divergence du diffuseur

La longueur idéale du diffuseur serait d'être égale à au moins 2 fois la longueur de la chambre de test. Cependant, un diffuseur d'une longueur de 800mm signifie aussi une soufflerie d'une longueur totale de presque 2 mètres. Pour notre modèle, nous avons donc choisi une longueur de 500mm, qui nous semble être suffisante dans le cadre de nos applications.

Bien que la forme optimale du diffuseur peut encore être optimisée, les études montrent qu'un angle de divergence inférieur à $3,5^\circ$ est nécessaire pour obtenir un "bon" diffuseur. Nous avons donc choisi une valeur d'angle égale à celle-ci.

Notre diffuseur a donc une longueur de 500mm, une section d'entrée carrée de côté 400mm et une section de sortie carrée de côté $400 + 500 \cdot \tan(3,5) = 430,6\text{mm}$.

2.3.5 Calcul de pertes de charges et dimensionnement du ventilateur

Afin de dimensionner le ventilateur, il est nécessaire d'approximer les coefficients de perte de pression propre à chaque partie de la soufflerie.

Il faut néanmoins préalablement définir la vitesse du fluide désirée ainsi que la section de la chambre de test. Dans notre cas, la section est connue mais la vitesse désirée n'est pas définie. Nous avons donc réalisé une approximation pour une vitesse de 10 m/s.

Partie de la soufflerie	Coefficient de perte de pression
Honeycomb	0.30 [3]
Contraction	0,017
Chambre de test	0,035
Diffuseur	0,10

On trouve ensuite une valeur de puissance hydraulique pour le ventilateur devant être supérieur à 13W.

Toutes les formules utilisées sont répertoriés dans la bibliographie [2], et les données calculées sont recensées dans un fichier Excel [Dimensionnement Soufflerie].

2.4 Solution d'ouverture de la chambre de test

Une condition définie par le cahier des charges était d'être facilement adaptable pour différents tests, le changement devant s'effectuer en moins de 1 minute. Il fallait donc que la chambre de test soit très facilement accessible pour pouvoir changer d'expérience, tout en restant suffisamment étanche. De multiples idées ont été réfléchies, mais nous avons opté pour une solution qui consiste à venir faire un trou dans la plaque supérieure de la chambre de test et de venir réaliser un "couvercle" facilement retirable toujours en plexiglas dans un souci de bonne visualisation de l'expérience. Dans un premier temps, nous avons réfléchi à venir réaliser la forme de "couvercle" voulue dans une plaque de 6mm, mais il est difficile de réaliser cette opération car cette matière est très fragile. Nous avons donc choisi de réaliser cette forme avec deux plaques de plexiglas d'épaisseur 3mm collées entre elles à l'aide d'une colle faite avec de l'acétone, qui servira à réaliser une sorte de soudure.

Les dimensions du trou sur la plaque supérieure qui représente donc la surface d'accès à la chambre de test sont de 300mm x 170mm, ce qui permet un changement relativement rapide d'expériences. Une poignée sera ajoutée sur le "couvercle" afin de le retirer très facilement.

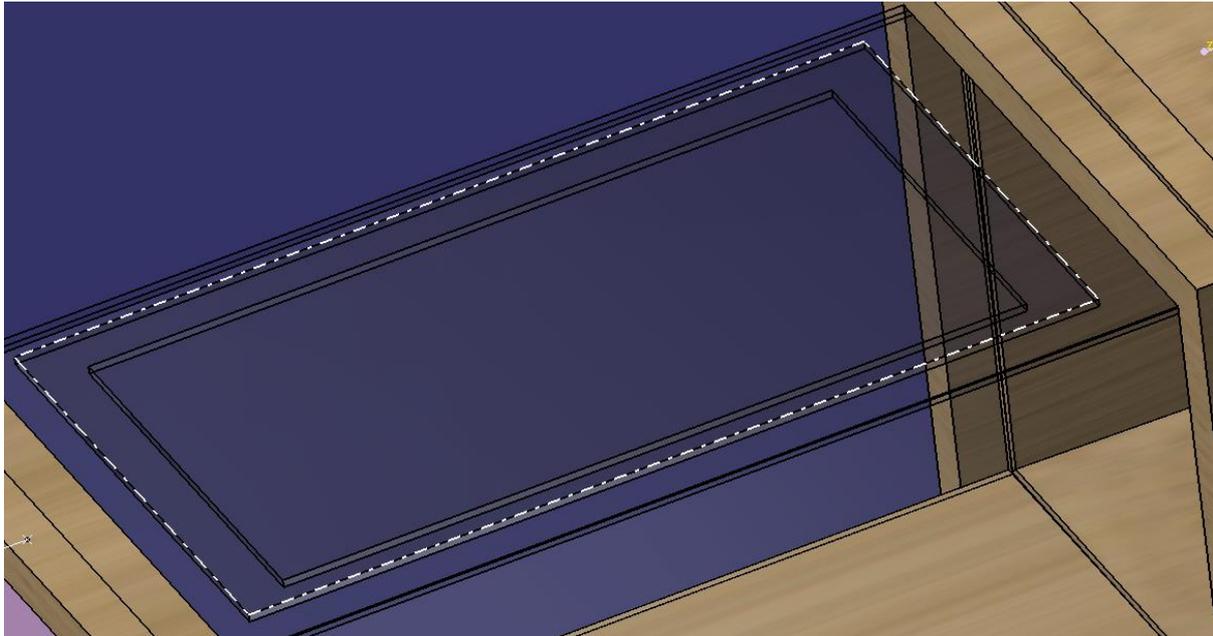


Fig 2.3 : Ouverture pour changement de test

2.5 Méthodes d'assemblage

Pour pouvoir démonter facilement chaque partie de la soufflerie, le choix s'est porté sur l'utilisation de cadres en bois qui se situent aux extrémités de chaque partie de la soufflerie.

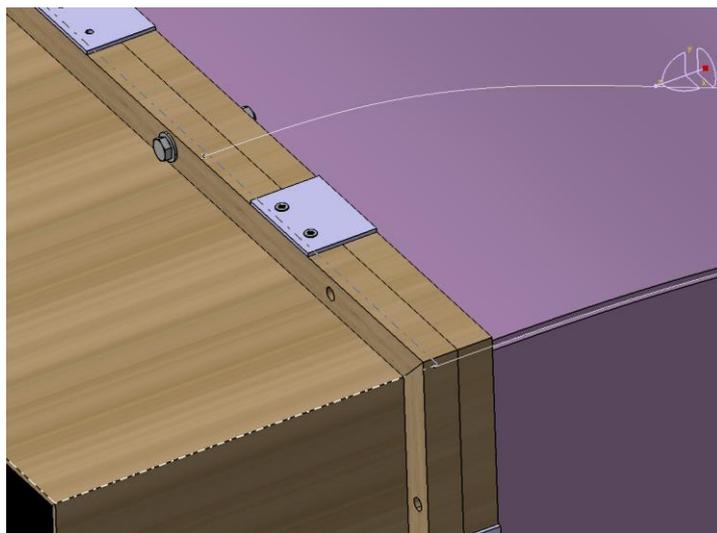


Fig 2.4 : Montage des parties avec cadres en bois

Les petites tôles servent à la mise en position lors de l'assemblage des chambres. Un système vis/écrou permet de démonter facilement le système.

3 Fabrication

3.1 Découpeuse laser

Pour pouvoir fabriquer la chambre de régulation, le diffuseur en contreplaqué peuplier de 3mm ainsi que la chambre de test en plexiglas de 3mm, les plaques nécessaires ont été réalisées avec la découpeuse laser du fabricarium. Elle permet d'avoir des contours plus droits et plus précis qu'avec une scie sauteuse et avec de meilleures dimensions. Le plexiglas et le contreplaqué en peuplier permettent l'utilisation de la machine.

A noter que les perçages du plexiglas n'ont pas été fait à la découpeuse, ce qui fut une erreur car le perçage à la colonne n'est pas idéal et peut casser le plexiglas comme nous en avons fait l'expérience. Avec la découpeuse, cela aurait été plus efficace et propre.

La découpeuse laser a également servi pour faire le gabarit, en carton ondulé, du convergent, étant donné que le PVC utilisé pour celui-ci ne permet pas une découpe laser. De plus le gabarit pour le pliage du convergent ont également été fait à la découpe avec du contreplaqué de 10mm.

3.2 Découpe des tasseaux

Pour pouvoir faire les cadres de chaque partie, les tasseaux ont été découpés aux dimensions voulues avec un angle de 45° afin de pouvoir former le cadre avec une scie sauteuse. Ensuite, pour pouvoir monter chaque partie ensemble, des trous de passage de vis M6 ont été percés avec une perceuse à main.

3.3 Chambre de contraction

Pour la chambre de contraction, le PVC ne passant pas à la découpeuse laser, les plaques ont été découpées à la main en suivant un gabarit en carton fait à la découpeuse laser.



Fig 3.1 : Découpe des plaques du convergent



Fig 3.2 : Plaque du convergent

Ensuite, grâce à l'air chaud de la soudeuse plastique et des gabarits de 10mm, les plaques ont pu être pliées pour se rapprocher de leur forme finale pour la future soudure. La soudure a été testée et les réglages ont pu être trouvés pour qu'elle soit propre. Néanmoins elle n'a pas pu être réalisée pour l'instant, ce qui entraîne que le résultat et la réussite de l'opération sur la forme complexe des plaques n'est pas validé.



Fig 3.3 : Pliage des plaques du convergent

3.4 Assemblage

3.4.1 Chambre de régulation et diffuseur

La chambre de test et le diffuseur ont été assemblés avec de la colle à bois après avoir vissé sur chaque panneau les tasseaux pour le cadre nécessaire au montage de chaque partie.

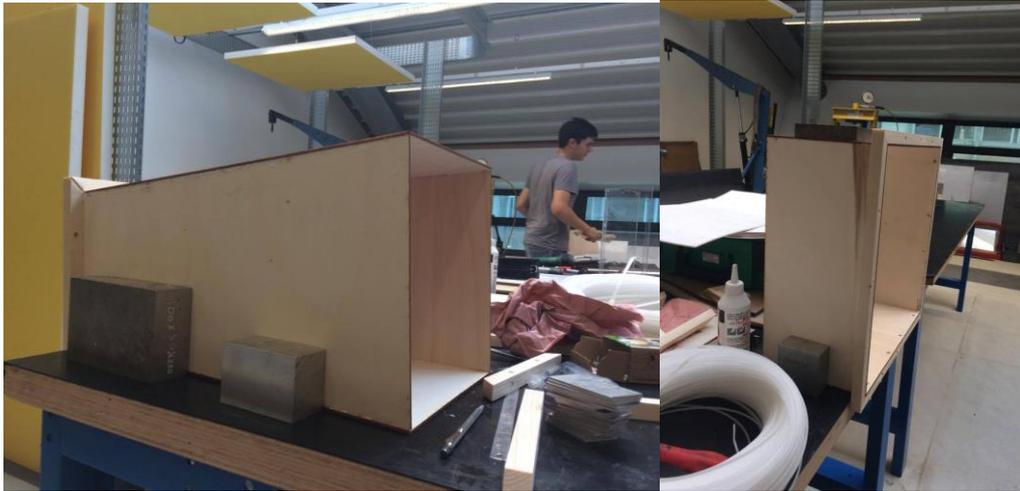


Fig 3.4 : Montage de la chambre de test et du diffuseur

La colle à bois n'est sûrement pas suffisante mais il est possible de consolider la structure après à l'aide d'équerres et de scotch que l'on peut poser sur les coins des deux blocs.

3.4.2 Chambre de test

Pour pouvoir assembler les parties de la chambre de test, on est venu coller les plaques grâce à de l'acétone et une seringue. En appliquant des petits points d'acétone, on peut faire fondre les deux pièces ensemble et donc les coller le long de l'arrête.

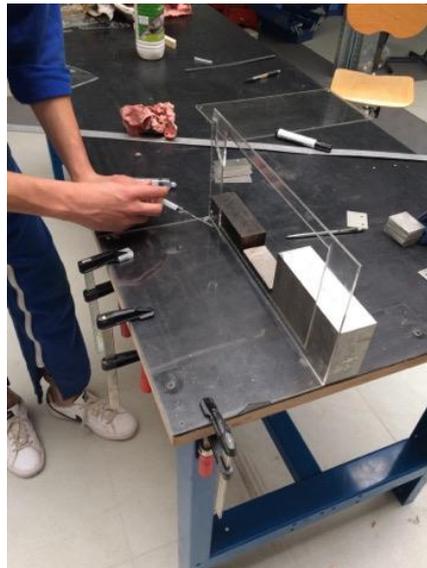


Fig 3.5 : Collage de l'acétone

Bibliographie

- [1] Louis Cattafesta, Chris Bar, and Jose Mathew. “Fundamentals of Wind-Tunnel Design” (2010).
- [2] Miguel A. González Hernández, Ana I. Moreno López, Artur A. Jarzabek, José M. Perales Perales, Yuliang Wu and Sun Xiaoxiao. “Design Methodology for a Quick and Low-Cost Wind Tunnel”. Adresse URL: <https://www.intechopen.com/books/wind-tunnel-designs-and-their-diverse-engineering-applications/design-methodology-for-a-quick-and-low-cost-wind-tunnel> (2013).
- [3] Andrew Wilsh, University of Wisconsin-Milwaukee. “Low Turbulence Wind Tunnel Design and Wind Turbin Wake Characterisation”. Adresse URL: <http://dc.uwm.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1183&context=etd> (2013).
- [4] Anirudh B. “Subsonic wind tunnel design methodology”. Adresse URL: <https://fr.slideshare.net/krrbanirudh/wind-tunnel-design> (2012).
- [5] Andrew R. Coggan, Ph.D. “The Coggan Low Speed Wind Tunnel: Design, Dimensions, and Operating Characteristics”. Adresse URL: <http://www.tririg.com/docs/CogganLSWT.pdf> (2011).
- [6] A.S.Abdelhamed, Y.El-S.YassenM., M.ElSakka. “Design optimization of three dimensional geometry of wind tunnel contraction”. Adresse URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447914001221> (2015).

Conclusion

Finalement, le projet a permis de voir l'importance d'avoir un flux avec le moins de turbulences possible pour une soufflerie expérimentale. Notamment comment on pouvait faire cela grâce au nid d'abeille.

Ensuite, le projet étant assez ambitieux pour le temps qui était accordée, il était intéressant de voir comment s'organiser pour trouver des solutions rapides, facile et peu couteuse afin de mener à bien le projet.

Néanmoins, la partie fabrication fut trop courte et a seulement permis d'expérimenter et de s'habituer aux méthodes définis dans la conception mais avec le travail et les constatations faites, il serait simple de réaliser la soufflerie de manière un peu plus propre et efficace en une semaine.