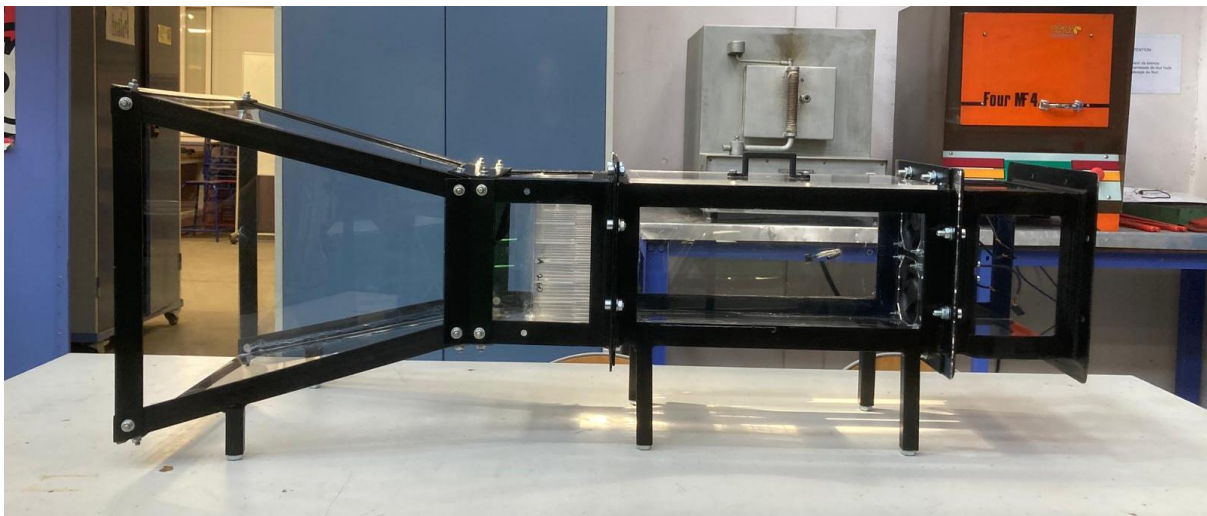


Rapport de stage – BUT Génie Mécanique et Productique (GMP) 2025/2026,
2ème année

Rôle du flottement aéroélastique dans le bilan thermique d'une feuille d'arbre soumise au vent

*Conception et fabrication d'une soufflerie pour l'étude expérimentale du
flottement foliaire*



Muhammad Afieq Aidan BIN MOHD ASHRAF

Entreprise d'accueil : Institut des Sciences du Mouvement UMR7287 Lieu de stage : Laboratoire ISM Site IUT Aix-Marseille Département : ISM équipe SBI 413 Avenue Gaston Berger, 13100 Aix-En-Provence Tuteur entreprise : Loïc TADRIST et Jean-Denis PARISSE	Université : Institut Universitaire de Technologie (IUT) d'Aix-Marseille Université Département : Génie Mécanique Et Productique 413 Avenue Gaston Berger, 13100 Aix-En-Provence Tuteur universitaire : Eric JEANCELME
---	---

La fiche d'identité et de confidentialité

FICHE D'IDENTITE ET DE CONFIDENTIALITE	
Année	
STAGIAIRE : Muhammad Afeg, Aylan BIN MOHD ASHRAF	
TITRE : Rôle du flottement aérodynamique dans le bilan thermique d'une feuille d'arbre	
RESUME : Un stage de 10 semaines, réalisé au sein de l'équipe SB1 de l'Institut des Sciences du Mouvement (ISM), visait à concevoir et fabriquer une soufflerie destinée à étudier le rôle du flottement aérodynamique dans le bilan thermique des feuilles d'arbres.	
Nombre de pages : Nombre de références bibliographiques :	
ENTREPRISE : Aix - Marseille Université	
Président directeur général : M. Eric BERTON	
Nombre d'employés : 8000 personnes	
Domaine d'activité : Education et recherche	
Adresse :	
Téléphone : Télécopie :	
Tuteur industriel : M. Loïc TADRIST	
Fonction : Professeur de l'INT	
Mail : loic.tadrisk@univ-amu.fr Téléphone : +33413946323	
PARTIE A REMPLIR PAR LE TUTEUR INDUSTRIEL	
Accessibilité de ce rapport (entourer la mention correcte) :	
☒ LIBRE	☐ CONFIDENTIEL pendant ant(s)
Date : 16/07/2026	Nom du stagiaire : BIN MOHD ASHRAF Signature :

Tadrisk

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mes tuteurs de stage, Monsieur Loïc TADRIST et Monsieur Jean-Denis PARISSE, pour leur encadrement, leur disponibilité et la qualité de leurs conseils tout au long de ce stage au sein de l'équipe Systèmes Bio Inspirés (SBI) de l'ISM.

Je remercie également Monsieur Eric JEANCELME pour son aide précieuse lors de la fabrication de la soufflerie, ainsi que pour ses conseils avisés en matière de conception et de méthodes de fabrication.

Je remercie l'ensemble des techniciens de l'atelier du département GMP de l'IUT d'Aix-en-Provence pour leur disponibilité et leur accompagnement durant les phases d'usinage et d'assemblage du dispositif.

Enfin, je remercie mes camarades stagiaires pour leur bonne humeur et l'entraide tout au long de ce stage.

Sommaire

Contents

La fiche d'identité et de confidentialité	2
Remerciements	3
1. Introduction.....	5
2. Cadre du stage	6
Présentation de l'entreprise	6
Présentation de l'établissement d'accueil	6
Présentation de l'équipe d'accueil	7
3. Le rapport technique.....	8
Le sujet de la mission	8
Les démarches prévisionnelles et réalisées.....	8
Développement des phases de la mission.....	11
Cahier des charges et spécifications	11
Architecture générale de la soufflerie	12
Fabrication du cadre principal (veine d'essai).....	14
Fabrication du convergent.....	17
Conditionneur d'écoulement.....	19
Couvercle de la veine d'essai	20
Section ventilateurs	22
Système électronique et pilotage	24
Caisson de sortie	25
Pieds réglables	26
Premier assemblage à blanc	27
Assemblage final, peinture et étanchéité	28
Validation fonctionnelle	30
Conception théorique des feuilles modèles et protocole expérimental	31
Bilan de l'étude : conclusion technique	34
4. Rapport PPP : présentation du métier d'Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche (ATER)	36
5. Conclusion générale et personnelle	38
Bibliographie	40
Annexe	41
4ème de couverture	47

1. Introduction

Dans le cadre de ma formation en Bachelor Universitaire de Technologie (BUT) Génie Mécanique et Productique à l'IUT d'Aix-Marseille, j'ai effectué un stage de fin de deuxième année d'une durée de dix semaines, du 13 avril au 19 juin 2026. Ce stage, obligatoire pour la validation de mon année, m'a permis de mettre en pratique les compétences acquises durant ma formation tout en découvrant le monde de la recherche appliquée.

Grâce à M. Loïc Tadrist, professeur à l'IUT, j'ai eu l'opportunité d'intégrer l'Institut des Sciences du Mouvement (ISM), un laboratoire de recherche associant Aix-Marseille Université et le CNRS, spécialisé dans l'étude du mouvement chez les êtres vivants sous ses différents aspects mécaniques, physiologiques et biologiques. Le stage s'est plus précisément déroulé au sein de l'équipe Systèmes Bio Inspirés (SBI), qui regroupe des chercheurs issus de domaines variés tels que la mécanique des fluides, l'aéroélasticité et la biomécanique végétale, avec pour objectif de s'inspirer des systèmes biologiques pour concevoir des dispositifs technologiques innovants.

Durant mon stage, j'ai été chargé d'étudier le rôle du flottement aéroélastique (flutter) dans le bilan thermique d'une feuille d'arbre soumise au vent. Mon rôle a consisté à réaliser une synthèse bibliographique sur ce phénomène, puis à concevoir, dimensionner et fabriquer une soufflerie de table à partir de quatre ventilateurs d'ordinateur récupérés, destinée à servir de banc d'essai pour comparer le comportement thermique d'une feuille rigide et d'une feuille pouvant flotter. Pour ce faire, j'ai utilisé CATIA V5 pour la conception, ainsi que les équipements de fabrication disponibles à l'atelier du département GMP (découpe, usinage, assemblage).

Cette expérience m'a permis de renforcer mes compétences en conception, dimensionnement et fabrication d'un dispositif expérimental, tout en découvrant l'environnement pluridisciplinaire d'un laboratoire de recherche. Elle m'a également sensibilisé aux défis liés à l'aéroélasticité et aux échanges thermiques, ainsi qu'à la démarche scientifique propre à un projet de recherche, de la revue bibliographique jusqu'à la conception d'un protocole expérimental.

Ce rapport présentera dans un premier temps le contexte et l'environnement de travail dans lequel j'ai évolué. Ensuite, je détaillerai l'état de l'art sur le flottement foliaire et le bilan thermique des feuilles, ainsi que les étapes de conception, de dimensionnement et de fabrication de la soufflerie. Enfin, je conclurai par un bilan du travail réalisé, les perspectives pour la suite du projet, ainsi qu'une réflexion sur les apports de ce stage, tant sur le plan technique que personnel.

2. Cadre du stage

Présentation de l'entreprise

L'Institut des Sciences du Mouvement Étienne-Jules Marey (ISM) est une Unité Mixte de Recherche (UMR 7287) associant Aix-Marseille Université et le CNRS. Il regroupe environ 150 membres — chercheurs, enseignants-chercheurs, ingénieurs, doctorants et personnels techniques — répartis sur plusieurs sites : le campus de Luminy, l'Hôpital Sainte-Marguerite, la Faculté de Médecine de la Timone, et l'IUT d'Aix-en-Provence. L'institut est dirigé par Mme Martine PITHIOUX.

Les recherches menées à l'ISM s'organisent autour de trois grands axes : les déterminants structurels du mouvement (biomécanique, science des matériaux), les processus sensori-moteurs et cognitifs (neurophysiologie, psychologie), et la modélisation bio-inspirée appliquée à la robotique et au contrôle des systèmes. Cette approche intégrative se traduit par des applications dans des domaines variés tels que la santé, le sport, la robotique ou les transports. Le laboratoire dispose par ailleurs de plusieurs plateformes technologiques, parmi lesquelles le Centre de Réalité Virtuelle de la Méditerranée (CRVM) pour l'étude immersive du mouvement, la plateforme MECABIO dédiée aux essais sur matériaux biomécaniques, ou encore l'Arène de Vol pour la recherche en biorobotique.

Contrairement à une entreprise classique, l'ISM ne possède pas de clients au sens commercial. En tant qu'organisme public de recherche, il valorise ses travaux à travers des partenariats académiques, institutionnels et industriels — avec, par exemple, Decathlon, Stellantis ou AG2R La Mondiale — ainsi que par des projets financés par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR). Sur le plan administratif, sa double tutelle AMU/CNRS lui confère à la fois un ancrage académique fort et une participation à la politique nationale de recherche ; son activité scientifique est organisée en plusieurs équipes thématiques interdisciplinaires réparties sur les différents sites du laboratoire.

Présentation de l'établissement d'accueil

L'antenne aixoise de l'ISM correspond à la plateforme technologique d'Aix-en-Provence (PTPA), dont la vocation est d'encourager l'innovation et le transfert de technologie dans le domaine de la (bio)mécanique. Cette plateforme est intégrée au département Génie Mécanique et Productique (GMP) de l'IUT d'Aix-Marseille, et dispose d'un atelier de fabrication mécanique (machines-outils conventionnelles et machines à commande numérique) ainsi que de bureaux d'études équipés de postes de conception assistée par ordinateur.

Le travail s'organise par projets : chaque stagiaire ou doctorant est rattaché à une problématique de recherche définie par un ou plusieurs encadrants, avec une large autonomie dans l'organisation quotidienne des tâches (bibliographie, conception, fabrication), ponctuée de points réguliers avec les tuteurs pour faire le bilan de l'avancement et orienter les choix techniques. Durant mon stage, j'ai disposé d'un poste

de travail au sein des locaux du département GMP, partagé avec d'autres stagiaires travaillant sur des projets de l'équipe SBI, Sharmaine et Kim. Pour les phases de fabrication, l'accès à l'atelier et aux machines-outils s'est fait avec l'accompagnement des techniciens de l'atelier, notamment M. Eric JEANCELME.

Présentation de l'équipe d'accueil

L'équipe Systèmes Bio-Inspirés (SBI) a pour objectif de proposer des ruptures scientifiques de la compréhension du vivant au profit de l'innovation en ingénierie, à travers une approche biomimétique appliquée à des sujets variés (vol battu des insectes, ostéogenèse, morphogenèse des articulations, actionneurs biologiques, processus perceptifs et cognitifs chez les animaux). L'équipe est placée sous la responsabilité de M. Jean-Marc LINARES (PR, AMU) et M. Stéphane VIOLLET (DR, CNRS), et s'articule autour de deux axes scientifiques : l'axe « Biorobotique » (responsable M. Julien SERRES), et l'axe « Mécanismes bio-inspirés » (responsable M. Julien CHAVES-JACOB), orienté autour de trois thématiques — structures de pièces bio-inspirées des os longs, liaisons mécaniques bio-inspirées de la morphogenèse, et actionneurs et dissipateurs bio-inspirés.

Mon stage s'inscrit dans ce second axe, au sein duquel interviennent mes tuteurs de stage, M. Loïc TADRIST et M. Jean-Denis PARISSE, notamment sur les problématiques d'aéroélasticité et de biomécanique végétale.

3. Le rapport technique

Le sujet de la mission

Ce stage s'inscrit dans un projet de recherche intitulé « Role of Aeroelastic Flutter in the Thermal Balance of a Tree Leaf Subject to Wind: Experimental and Numerical Study » (« Rôle du flottement aéroélastique dans le bilan thermique d'une feuille d'arbre soumise au vent : étude expérimentale et numérique »), porté par l'équipe SBI de l'ISM. Ce projet a été initialement envisagé par M. Loïc TADRIST, dans la continuité de ses travaux antérieurs sur la mécanique du flottement foliaire (galop torsionnel, critère de Den Hartog), et s'appuie sur une expérience préliminaire suggérant qu'une feuille en mouvement échange davantage de chaleur avec son environnement qu'une feuille immobile — avec, en arrière-plan, l'idée que ce phénomène pourrait aider la plante à se protéger d'une surchauffe sous fort ensoleillement et à préserver son efficacité photosynthétique.

Cette observation préliminaire restait cependant qualitative, et le laboratoire ne disposait jusqu'ici d'aucun dispositif dédié permettant de comparer, sous des conditions de vent contrôlées et reproductibles, le bilan thermique d'une feuille rigide et celui d'une feuille pouvant flotter.

Mon stage a été encadré par M. Loïc TADRIST, responsable scientifique du projet, et par M. Jean-Denis PARISSE, qui m'a notamment conseillé sur les choix techniques relatifs à la conception de la soufflerie. Ma mission consistait à poser les premières bases expérimentales permettant, à terme, de répondre à cette problématique : réaliser une synthèse bibliographique sur le flottement foliaire et le bilan thermique des feuilles, concevoir et fabriquer une soufflerie de table compacte et reproductible à partir de ventilateurs d'ordinateur récupérés, puis concevoir une paire de feuilles modèles instrumentables (l'une à pétiole rigide, l'autre permettant le flottement) et établir le protocole expérimental associé pour la suite du projet.

Les démarches prévisionnelles et réalisées

Démarche prévisionnelle

La démarche prévisionnelle, présentée à la Figure 1, découpe le stage de dix semaines en huit phases successives, en cohérence avec le planning hebdomadaire établi par le laboratoire. La première semaine est consacrée à la recherche bibliographique sur le flottement foliaire et le bilan thermique des feuilles. Les semaines 2 et 3 sont dédiées à la conception, à l'approvisionnement et à la fabrication de la soufflerie. La semaine 4 couvre la partie électronique, la programmation et la validation du dispositif, suivie d'une semaine de débogage et d'élaboration du plan d'expérience. Les semaines 6 à 8 sont réservées à la campagne expérimentale, puis la semaine 9 à l'analyse des données et à la rédaction du rapport, et enfin la semaine 10 à la préparation de la soutenance de stage.

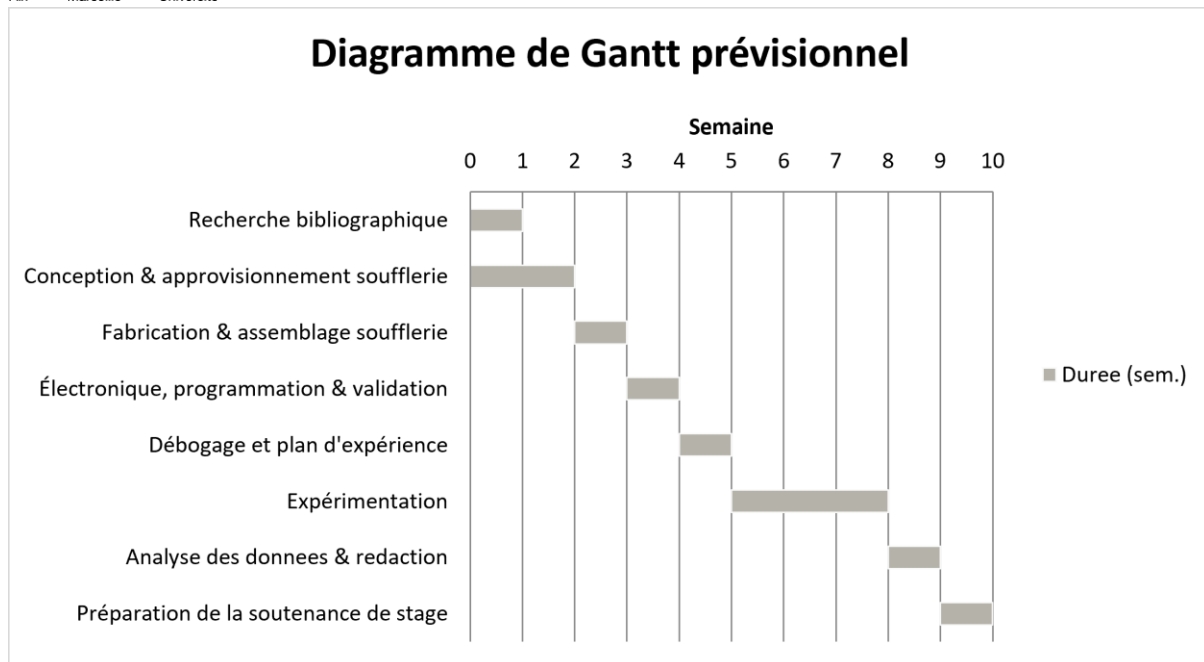


Figure 1

Outils mobilisés

La réalisation de ce projet a mobilisé plusieurs outils logiciels et équipements de l'atelier du département GMP. Pour la conception, le logiciel CATIA V5 a été utilisé pour la modélisation 3D des pièces et de la soufflerie. La fabrication a fait appel à plusieurs procédés : impression 3D (logiciel Cura), découpe laser (logiciel Beam Studio), ainsi que des moyens conventionnels de l'atelier — scie à ruban KASTO, cisaille SPIERTZ, plieuse CNC Jean Perrot, perceuse à colonne équipée de différents forets, fraiseuse conventionnelle et fraiseuse CNC pour les opérations de surfacage et de contournage. L'assemblage de certains éléments a nécessité des opérations de mécano-soudage MAG, suivies d'un travail de finition à la disqueuse. Pour la partie électronique, le dispositif est piloté par un microcontrôleur Raspberry Pi Pico, programmé en MicroPython via l'environnement de développement Thonny, connecté aux ventilateurs via une breadboard et des jumper cables, et alimenté par une alimentation industrielle Mean Well LRS-150-12 (12V).

Démarche réalisée

La démarche réellement suivie, présentée à la Figure 2, montre un décalage important par rapport au planning initial, concentré principalement sur la phase de fabrication et d'assemblage de la soufflerie. Si la recherche bibliographique s'est déroulée comme prévu en semaine 1, la phase de conception et d'approvisionnement s'est étalée sur trois semaines au lieu de deux, notamment pour identifier et sélectionner quatre ventilateurs identiques (même marque, même modèle : Foxconn PVA092K12N), condition nécessaire pour garantir un débit d'air uniforme entre les quatre unités.

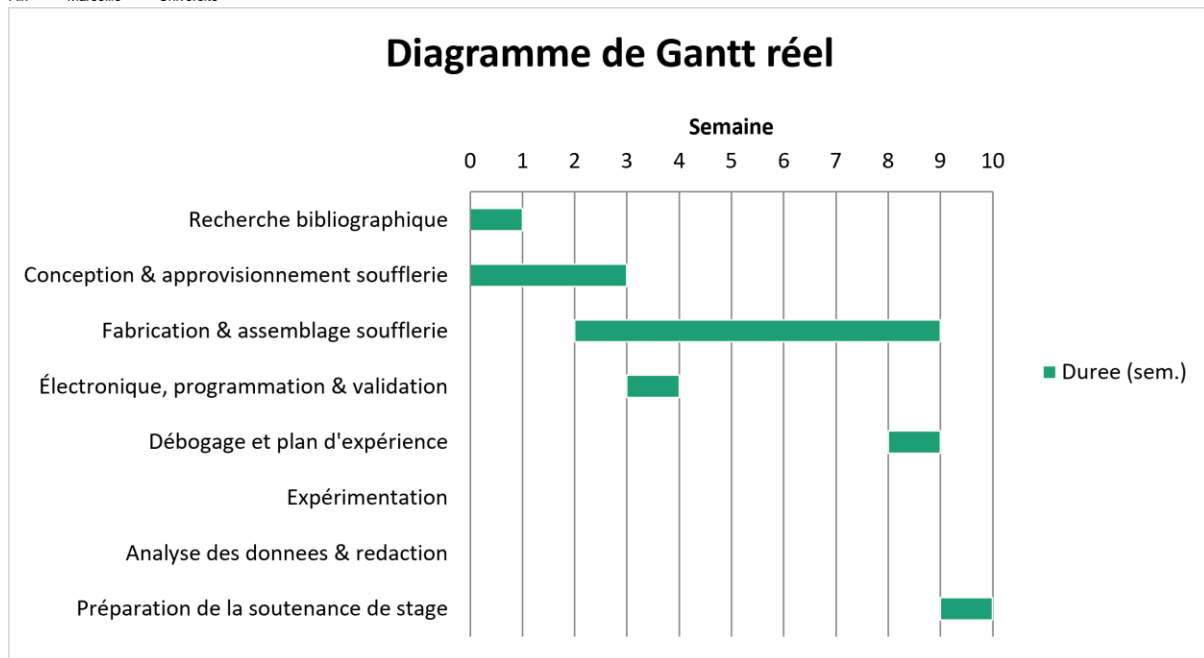


Figure 2

La fabrication et l'assemblage du dispositif, prévus sur une semaine, ont en réalité occupé sept semaines, du fait de la complexité des opérations de mécano-soudage, des itérations nécessaires sur certaines pièces — notamment la partie haute du convergent, qui a dû être refaite trois fois avant d'obtenir un résultat satisfaisant — et du temps consacré aux opérations de finition (surfaçage, peinture, jointoiement au silicone).

En parallèle, la partie électronique et programmation (semaine 4) a consisté à mettre en place le pilotage PWM des ventilateurs via un Raspberry Pi Pico programmé en MicroPython. Cette phase a été marquée par un problème de débogage : le code ne s'exécutait pas correctement, et il s'est avéré après investigation que le premier Raspberry Pi Pico utilisé était défectueux — son remplacement a permis de résoudre le problème.

La semaine 9 a été consacrée au débogage et à l'amélioration de la qualité de réalisation de la soufflerie, dans l'objectif de livrer un dispositif fiable permettant à l'équipe de poursuivre directement la campagne expérimentale sans avoir à se soucier de la fonctionnalité du banc d'essai.

Finalement, les phases initialement prévues pour la caractérisation de la soufflerie, la campagne expérimentale et l'analyse des données n'ont pas pu être réalisées dans le temps imparti. La totalité du temps disponible ayant été consacrée à la conception, à la fabrication et à la mise au point de la soufflerie, ce dispositif constitue toutefois un livrable concret et opérationnel pour la suite du projet.

Plan du développement des phases

La suite de ce rapport technique s'articule autour des phases effectivement réalisées durant ce stage. La section 3.3 présente en détail la conception, le dimensionnement et la fabrication de la soufflerie — depuis l'analyse du besoin et les choix de conception

jusqu'à l'assemblage final et la validation fonctionnelle du dispositif, ainsi que la conception théorique des feuilles modèles et le protocole expérimental établi pour la suite du projet. Enfin, la section 3.4 dresse un bilan de l'étude, en comparant objectifs initiaux et réalisations, et présente les perspectives pour la poursuite du projet.

Développement des phases de la mission

Cahier des charges et spécifications

Avant de commencer toute conception, j'ai discuté avec M. Loïc TADRIST afin de définir ensemble les besoins et contraintes du dispositif. Le cahier des charges ainsi établi repose sur les exigences suivantes :

Contraintes principales :

- Dispositif compact, utilisable sur une table de laboratoire standard
- Utilisation des quatre ventilateurs d'ordinateur déjà disponibles au laboratoire (Foxconn PVA092K12N, 92×92mm, 18W unitaire), dans une logique de récupération et de limitation des coûts
- Vitesse d'air contrôlable dans la veine d'essai, avec une valeur cible estimée à environ 10 m/s
- Section d'essai d'environ 200×200mm, dimensionnée pour accueillir les feuilles modèles prévues pour la campagne expérimentale
- Conception modulaire pour faciliter le transport, l'entretien et les évolutions futures du dispositif

Dimensionnement de la vitesse d'air

Pour valider le choix des ventilateurs et les dimensions de la section d'essai, j'ai réalisé un calcul de la vitesse théorique atteignable dans la veine d'essai à partir de la puissance électrique disponible. En considérant quatre ventilateurs Foxconn PVA092K12N d'une puissance unitaire de 18 W, un rendement $\eta = 0,3$ et une densité de l'air $\rho = 1,3 \text{ kg/m}^3$, j'ai procédé comme suit.

J'ai d'abord calculé la puissance électrique totale des quatre ventilateurs :

$$P_{elec} = 4 \times 18 = 72 \text{ W}$$

En appliquant le rendement des ventilateurs, j'ai obtenu la puissance d'écoulement disponible :

$$P_{ecoulement} = \eta \times P_{elec} = 0,3 \times 72 = 21,6 \text{ W}$$

J'ai ensuite exprimé la puissance d'écoulement en fonction de la pression hydrodynamique et du débit volumique :

$$P_{ecoulement} = \frac{1}{2} \rho U^3 S$$

En isolant la vitesse U et en substituant les valeurs numériques ($S = 0,04 \text{ m}^2$), j'ai obtenu :

$$U = \sqrt[3]{\frac{2 \times P_{\text{écoulement}}}{\rho \times S}} = \sqrt[3]{\frac{2 \times 21,6}{1,3 \times 0,04}} \approx 10 \text{ m/s}$$

Cette vitesse, jugée suffisante par M. Loïc TADRIST pour mettre en flottement les feuilles modèles, m'a permis de valider le choix des ventilateurs et les dimensions de la section d'essai de $200 \times 200 \text{ mm}$.

Choix des matériaux

Pour l'ossature de la soufflerie, j'ai choisi l'acier (cornières $30 \times 30 \text{ mm}$ ep. 3 mm et tôle ep. 3 mm) pour sa rigidité, sa disponibilité à l'atelier GMP et sa facilité de mise en œuvre par soudage MAG. Pour les parois, j'ai opté pour le plexiglas (PMMA, ep. 8 mm) pour sa transparence visuelle, qui permet d'observer directement l'écoulement et le comportement des feuilles à l'intérieur de la veine d'essai. Il est important de noter que le plexiglas standard ne transmet pas les rayonnements infrarouges dans la plage thermique ($7,5\text{--}13 \text{ }\mu\text{m}$) utilisée par les caméras thermiques — les mesures de température par caméra IR devront donc être réalisées couvercle retiré, ou nécessiteront à terme l'utilisation d'une fenêtre en matériau IR-transparent, ce qui constitue une perspective d'amélioration pour les versions futures du dispositif.

Choix de conception modulaire

J'ai fait le choix de concevoir la soufflerie selon une architecture modulaire à quatre modules distincts (convergent, veine d'essai, section ventilateurs, caisson de sortie), connectés entre eux par vissage. Ce choix présente plusieurs avantages : il facilite le transport et la manutention, permet de remplacer ou modifier un module indépendamment des autres, et assure l'évolutivité du dispositif — par exemple, l'ajout d'un divergent en aval si nécessaire dans une version future.

Architecture générale de la soufflerie

J'ai conçu la soufflerie selon une architecture en aspiration, composée de quatre modules distincts assemblés en ligne dans le sens de l'écoulement. Le choix d'une configuration en aspiration — où les ventilateurs aspirent l'air à travers la veine d'essai plutôt que de le souffler directement — présente l'avantage de générer un écoulement plus uniforme et moins turbulent dans la zone de mesure, les perturbations induites par les ventilateurs se trouvant en aval de la veine d'essai.

Les quatre modules, dans l'ordre de l'écoulement, sont les suivants :

Module 1 — Convergent : L'air entre par le convergent, dont la section passe d'environ $400 \times 400 \text{ mm}$ à l'entrée à $198 \times 205 \text{ mm}$ à la sortie, sur une hauteur d'environ 500 mm . Le convergent accélère et guide l'air vers la veine d'essai. Un conditionneur d'écoulement est installé à l'intérieur du convergent pour laminariser et homogénéiser le flux d'air avant son entrée dans la zone de mesure.

Module 2 — Veine d'essai : C'est la zone de mesure principale, de section 198×205mm. C'est ici que seront placées les feuilles modèles lors de la campagne expérimentale. La veine est fermée par un couvercle en plexiglas démontable, permettant un accès facile à l'intérieur du dispositif.

Module 3 — Section ventilateurs : Les quatre ventilateurs Foxconn PVA092K12N sont disposés en grille 2×2 sur un support en plexiglas découpé au laser. Ils aspirent l'air depuis le convergent à travers la veine d'essai.

Module 4 — Caisson de sortie : Situé en aval des ventilateurs, ce module de longueur ~160mm permet de calmer l'air aspiré après les ventilateurs et d'éviter que les turbulences de sortie n'affectent la qualité de l'écoulement dans la veine d'essai. Il est équipé d'une plaque de connexion côté sortie, prévue pour l'ajout d'un éventuel divergent dans une version future.

L'ensemble repose sur six pieds réglables en hauteur, garantissant la stabilité et le nivellement de la soufflerie sur une table de laboratoire. Les modules sont peints en noir mat pour réduire les réflexions parasites lors des éventuelles mesures optiques.

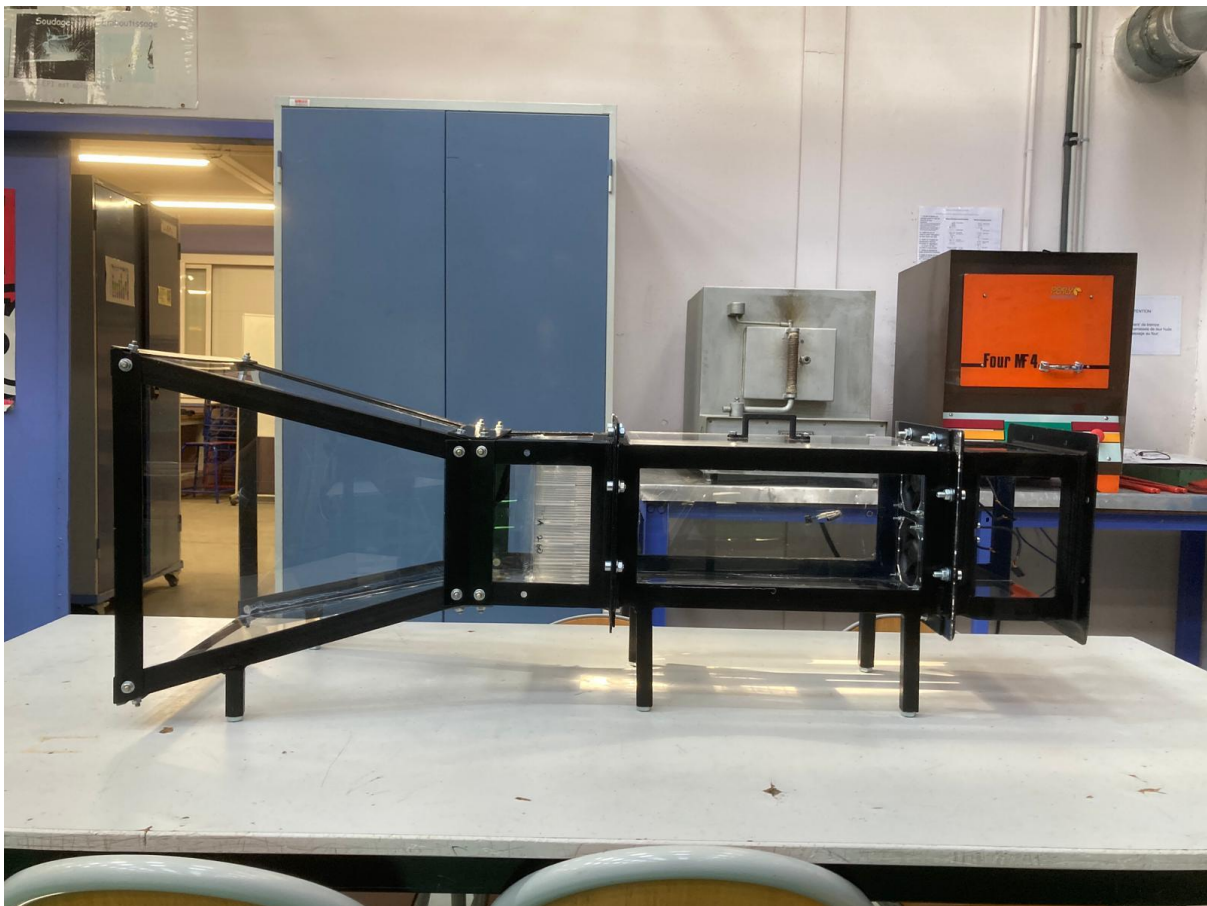


Figure 3 — Vue d'ensemble de la soufflerie assemblée, montrant les quatre modules dans l'ordre de l'écoulement

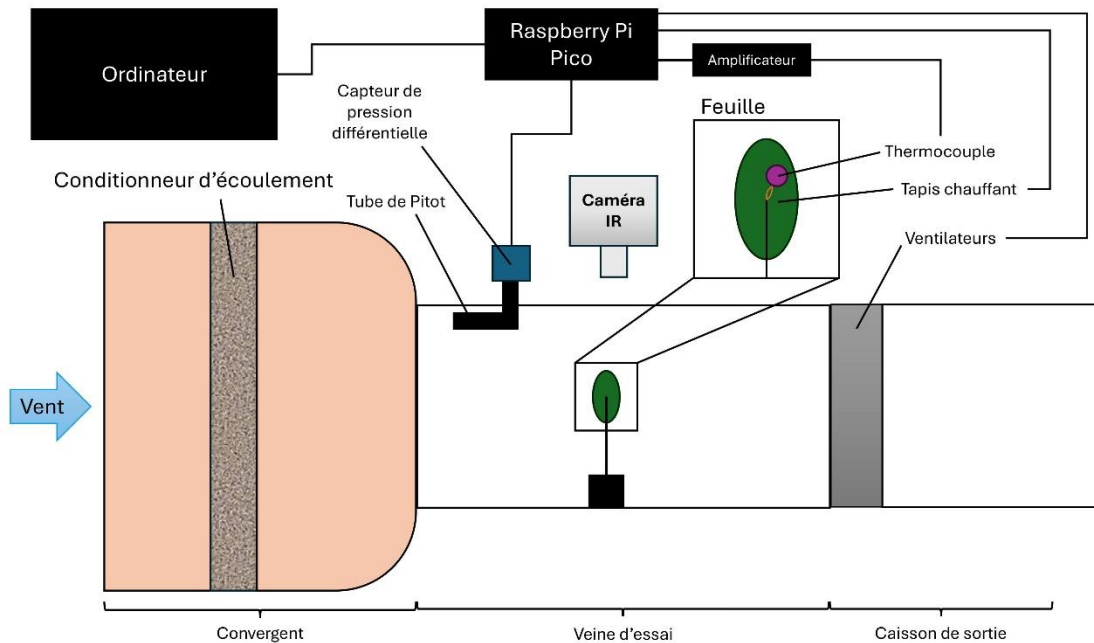


Figure 4 — Schéma de principe de l'architecture modulaire avec sens de l'écoulement

Fabrication du cadre principal (veine d'essai)

La veine d'essai constitue le module central de la soufflerie — c'est la zone de mesure dans laquelle seront placées les feuilles modèles. J'ai commencé sa fabrication en premier car toutes les autres dimensions de la soufflerie en dépendent directement.

Découpe et perçage

J'ai commencé par découper les cornières 30×30mm à la scie à ruban KASTO aux longueurs calculées en CATIA V5. J'ai ensuite percé les trous de connexion sur les cornières destinées à former les plaques de connexion entre modules, en utilisant la perceuse à colonne avec les forets adaptés. Pour chaque trou de connexion, j'ai réalisé unamage conique afin d'y installer des vis à tête fraisée — ce choix garantit que la surface intérieure de la veine d'essai reste parfaitement affleurante, sans aspérité susceptible de perturber l'écoulement.



Figure 5 — Découpe des cornières 30×30mm aux longueurs calculées à l'aide de la scie à ruban KASTO

Soudage MAG

J'ai ensuite assemblé le cadre par soudage MAG. J'ai disposé les quatre cornières longues parallèlement à la direction de l'écoulement, en orientant leur angle intérieur vers l'intérieur de la veine — cette disposition crée une surface intérieure continue et propre sur laquelle j'ai pu coller les panneaux de plexiglas au silicone. Pour maintenir les cornières à 90° pendant le pointage, j'ai utilisé des aimants de soudage. J'ai ensuite soudé les plaques de connexion aux deux extrémités du cadre.

Un soin particulier a été apporté au design de ces plaques de connexion : plutôt que de souder une plaque pleine en forme de carré complet, j'ai décidé de laisser les coins évidés. Ce choix permet d'utiliser ces évidements comme guides de mise en place (*pointage*) lors de l'assemblage des autres modules sur la veine d'essai.



Figure 6 — Fabrication du cadre principal : (a) mise en place avec aimants de soudage avant pointage MAG, (b) cadre soudé final

Surfaçage

Après le soudage, j'ai constaté que la surface supérieure du cadre présentait des défauts de planéité inévitables dus aux déformations thermiques post-soudure. Pour y remédier, j'ai réalisé avec M. Eric JEANCELME une opération de surfaçage sur la fraiseuse conventionnelle de l'atelier GMP.

Nous avons d'abord procédé à un dégauchissage au comparateur : en mesurant la hauteur de la surface en quatre points, nous avons déterminé le défaut de planéité et calculé les cales nécessaires (1mm et 0,5mm) pour corriger l'inclinaison de la pièce sur la table de la fraiseuse avant l'usinage. Les paramètres de coupe ont été calculés conjointement : fraise de diamètre $D = 50\text{mm}$, $Z = 5$ dents, avance $f = 0,05\text{ mm/dent}$, vitesse de rotation $N = 533\text{ tr/min}$. Cette opération m'a permis d'obtenir une surface plane et propre sur laquelle le couvercle en plexiglas vient s'appuyer de façon étanche.

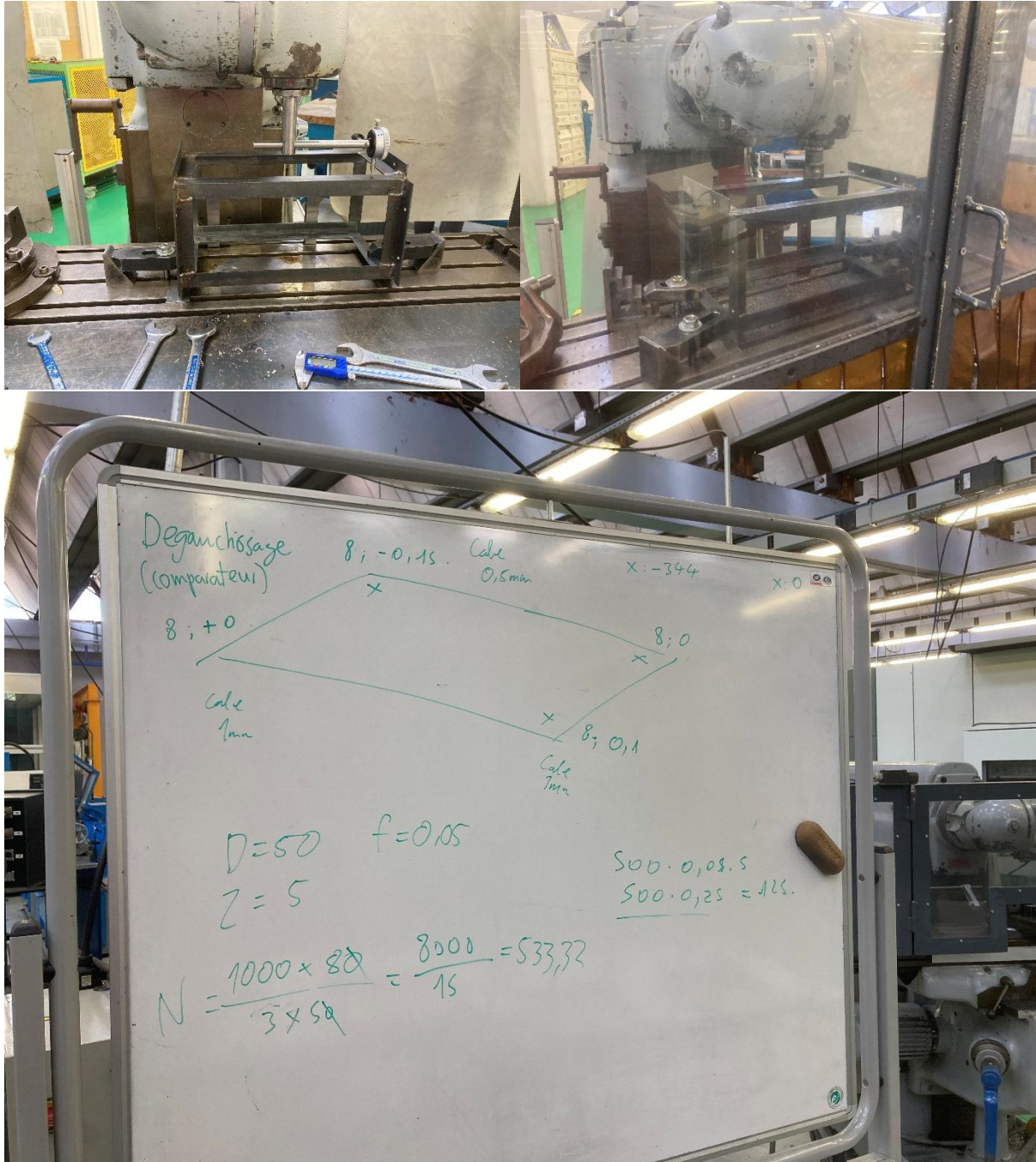


Figure 7 — Surfaçage de la veine d'essai : (a) dégauchissage au comparateur, (b) opération de surfaçage avec M. JEANCELME, (c) tableau blanc montrant les calculs de dégauchissage et les paramètres de coupe

Fabrication du convergent

Le convergent est le module qui m'a demandé le plus de travail et d'itérations durant toute la fabrication de la soufflerie. Il est composé de deux parties distinctes : une partie haute (cadre de connexion à la veine d'essai) et une partie basse (structure pyramidale tronquée inclinée), dont l'ensemble forme le profil convergent permettant d'accélérer et de guider l'air de l'entrée (~400×400mm) vers la veine d'essai (~198×205mm).

Partie basse — structure pyramidale tronquée

J'ai commencé par la partie basse, plus simple à réaliser. J'ai découpé les cornières inclinées à la scie KASTO et les barres horizontales en tôle d'acier ep. 3mm à la cisaille SPIERTZ. J'ai ensuite percé l'ensemble des pièces à la perceuse à colonne. Pour créer l'angle d'inclinaison de 14° entre la partie haute et la partie basse, j'ai utilisé la plieuse CNC Jean Perrot pour plier les barres horizontales supérieures à cet angle précis — c'est ce pliage qui crée la transition entre la grande section d'entrée et la petite section de sortie du convergent, donnant à l'ensemble sa forme pyramidale tronquée. J'ai également réalisé des rainures sur les barres horizontales inférieures afin de permettre un ajustement de l'écartement entre les cornières inclinées — ce jeu de réglage permet de compenser d'éventuelles légères déformations de la partie haute et d'assurer un bon alignement avec la veine d'essai. Toutes les pièces ont été assemblées par vissage, avec un lamage conique sur chaque trou pour y installer des vis à tête fraisée et garantir une surface intérieure affleurante.



Figure 8 — Opération de pliage à 14° des barres horizontales supérieures du convergent sur la plieuse CNC Jean Perrot

Partie haute — cadre de connexion à la veine d'essai (3 versions)

La partie haute a nécessité trois tentatives avant d'obtenir un résultat satisfaisant.

Version 1 : J'ai réalisé le cadre selon les dimensions nominales de ma conception CATIA. Cependant, lors de l'assemblage avec la veine d'essai, j'ai constaté que les trous de connexion ne s'alignaient pas — conséquence directe du léger défaut dimensionnel de la veine d'essai (198×205mm au lieu d'un carré parfait de 200×200mm). J'ai dû scrapper cette version.

Version 2 : J'ai reconstruit le cadre en tenant compte des dimensions réelles de la veine d'essai. Cependant, lors du soudage, la chaleur excessive combinée à un jeu trop important entre les cornières a provoqué une déformation du cadre. Cette version a également été scrappée.

Version 3 (finale) : Sur les conseils de M. Eric JEANCELME, j'ai adopté une méthode de fabrication différente pour garantir à la fois l'alignement et la rigidité. J'ai d'abord vissé le cadre directement sur la veine d'essai avec le conditionneur d'écoulement installé à l'intérieur — ce dernier servant de gabarit d'alignement. J'ai ensuite réalisé un pointage MAG dans cette configuration, garantissant un alignement parfait. Après le pointage, j'ai retiré les vis et le conditionneur d'écoulement pour poursuivre le soudage en toute sécurité, sans risque de souder accidentellement le convergent à la veine d'essai ou de faire fondre le plexiglas du conditionneur. Pour maintenir la forme du cadre pendant le soudage complet et éviter toute déformation, j'ai également utilisé des gabarits aux mêmes dimensions que le conditionneur d'écoulement. Une fois le soudage terminé, j'ai éliminé les cordons de soudure en excès à la disqueuse pour obtenir une finition propre.



Figure 9 — Fabrication du convergent : (a) mise en place avec conditionneur d'écoulement et vissage avant pointage, (b) utilisation des gabarits pendant le soudage

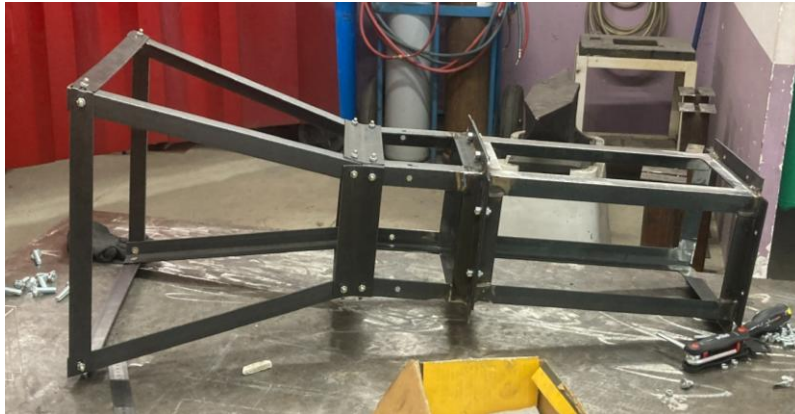


Figure 10 — Convergent et veine d'essai assemblés avant peinture

Conditionneur d'écoulement

Conception

Pour le conditionneur d'écoulement, j'avais initialement proposé de fabriquer quatre pièces en nid d'abeille hexagonal par impression 3D. M. Jean-Denis PARISSE avait de son côté suggéré une alternative utilisant des pailles assemblées. Après évaluation des deux options avec M. Loïc TADRIST, nous avons écarté l'impression 3D en raison de son coût et du temps d'impression trop importants, et la solution en pailles pour des raisons de rigidité structurelle et de précision dimensionnelle insuffisantes. J'ai donc opté pour une troisième solution : une grille en plexiglas à cellules carrées fabriquée par découpe laser, avec un système d'emboîtement "slot and tab" — plus économique, plus rapide et plus robuste que les deux options initiales.

Fabrication

J'ai conçu les panneaux sous Beam Studio et les ai découpés au laser dans des plaques de plexiglas de 2mm d'épaisseur. Chaque panneau est découpé avec des rainures permettant l'emboîtement des panneaux entre eux par un système "slot and tab" — les panneaux verticaux s'encastrent dans les panneaux horizontaux et vice versa, sans colle ni vissage. J'ai découpé 9 panneaux verticaux et 9 panneaux horizontaux, formant ainsi une grille de cellules carrées d'environ 23×23mm sur une profondeur de 100mm.

Après découpe, j'ai réalisé un chanfreinage manuel sur les bords extérieurs de la grille assemblée à l'aide d'une Dremel, en collaboration avec M. Eric JEANCELME, afin d'éliminer les angles vifs issus de la découpe laser et d'adoucir le profil périphérique du conditionneur. Ce chanfreinage m'a permis d'obtenir un ajustement serré plus propre et plus progressif lors de l'insertion du conditionneur dans le convergent, sans risque d'éclater le plexiglas ou de rayer les parois intérieures.

La structure ainsi obtenue crée un ensemble de canaux parallèles à la direction de l'écoulement qui forcent l'air à se laminariser avant d'entrer dans la veine d'essai.

J'ai installé le conditionneur d'écoulement en ajustement serré à l'intérieur du convergent, au niveau de la jonction entre la partie pyramidale tronquée et la partie haute — sans colle ni fixation mécanique supplémentaire, le serrage suffisant à maintenir la pièce en place. Comme mentionné en 3.3.4, le conditionneur a également joué un rôle clé lors de la fabrication de la partie haute du convergent, en servant de gabarit d'alignement pendant le pointage MAG de la version finale.

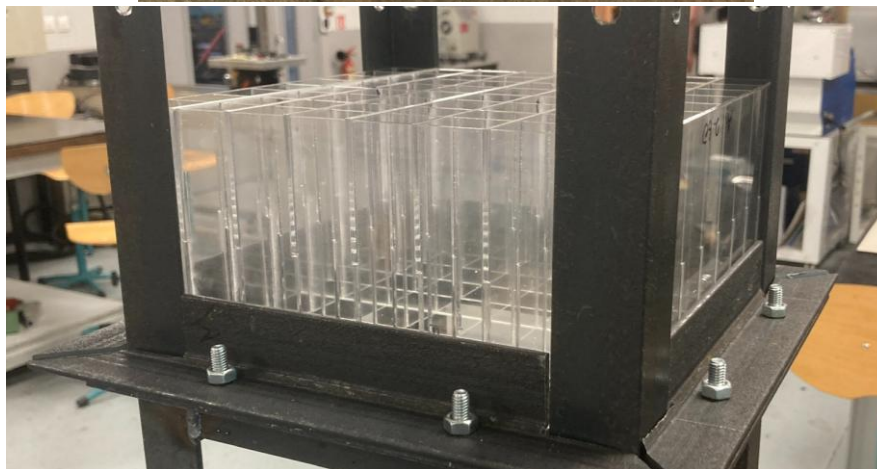


Figure 11 — Conditionneur d'écoulement : (a) grille en plexiglas seule sur établi, (b) conditionneur installé dans le convergent

Couvercle de la veine d'essai

Pour permettre un accès facile à l'intérieur de la veine d'essai tout en assurant une bonne étanchéité lors des expériences, j'ai conçu et fabriqué un couvercle démontable en plexiglas de 8mm d'épaisseur.

Conception

J'ai choisi le plexiglas de 8mm pour sa rigidité suffisante pour ne pas fléchir sous son propre poids, et pour sa transparence qui permet d'observer l'intérieur de la veine d'essai

sans avoir à le retirer. J'ai également intégré deux trous dans ma conception pour y installer une poignée, facilitant la manipulation du couvercle lors des montages et démontages.

Fabrication

J'ai d'abord utilisé la découpeuse laser (Beam Studio) pour obtenir la forme générale du couvercle ainsi que les deux trous de fixation de la poignée. La découpe laser m'a permis d'obtenir des dimensions précises et des bords propres sur le plexiglas.

Cependant, pour garantir un ajustement parfait avec la surface surfacée de la veine d'essai, j'ai réalisé avec M. Eric JEANCELME une opération de contournage sur la fraiseuse CNC. Pour le bridage du couvercle sur la table de la fraiseuse CNC, j'ai utilisé les deux trous de fixation de la poignée comme Mise en Position (MIP) et Maintien en Position (MAP), garantissant ainsi un positionnement précis et répétable de la pièce pendant l'opération de contournage. Nous avons usiné un contournage de 2mm sur le pourtour du couvercle, de façon à ce qu'il soit parfaitement affleurant avec le cadre de la veine d'essai une fois posé — assurant ainsi une étanchéité optimale sans joint supplémentaire.

Pour la fixation, j'ai réalisé un lamage conique sur chaque trou de vissage, permettant d'installer des vis à tête fraisée dont la tête se retrouve parfaitement encastrée dans l'épaisseur du plexiglas. Ce choix garantit que la face intérieure du couvercle est parfaitement lisse et affleurante, sans aspérité susceptible de perturber l'écoulement dans la veine d'essai.

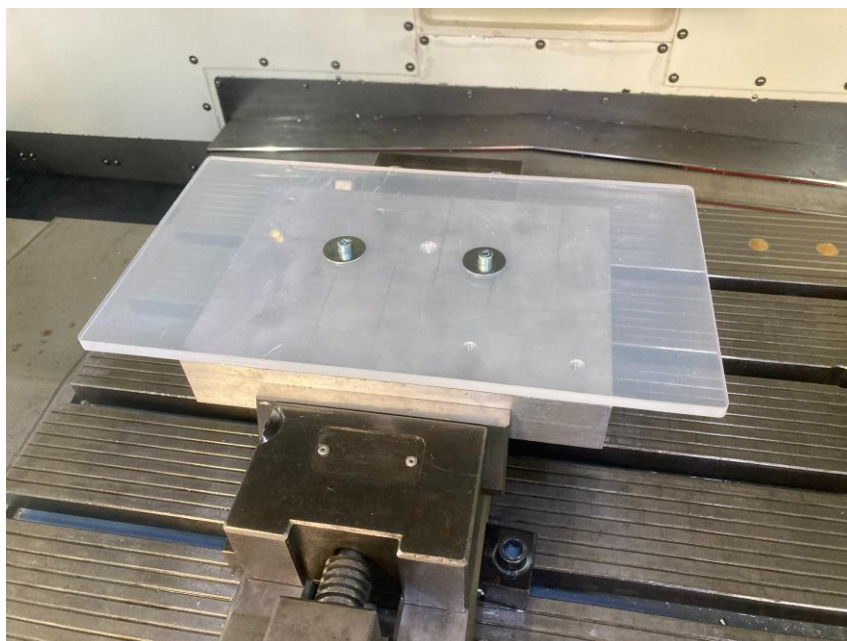


Figure 12 — Couvercle en plexiglas bridé sur la fraiseuse CNC lors de l'opération de contournage, les deux trous de fixation servant de MIP et MAP

Poignée

Pour faciliter la manipulation du couvercle, j'ai conçu et imprimé en 3D une poignée que j'ai fixée sur le dessus du couvercle via les deux trous prévus à cet effet lors de la découpe laser. La poignée a été modélisée sur CATIA V5, puis imprimée en utilisant le logiciel Cura. Ce choix de fabrication additive m'a permis d'obtenir rapidement une pièce sur mesure, adaptée exactement aux dimensions et à l'espacement des trous de fixation du couvercle, sans avoir à usiner une pièce métallique supplémentaire.

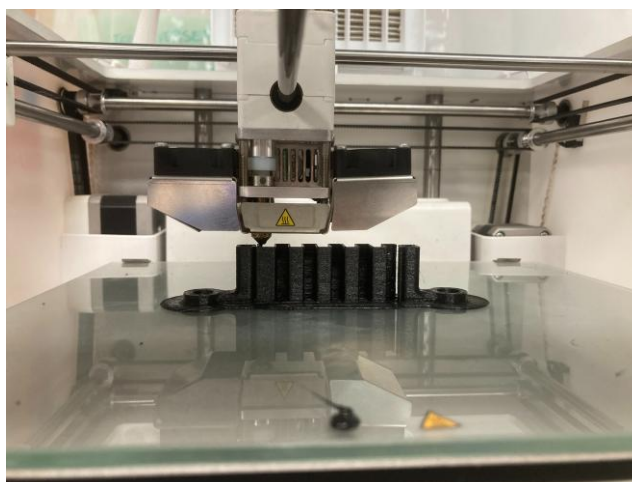


Figure 13 — Impression 3D de la poignée du couvercle en cours de fabrication

Section ventilateurs

La section ventilateurs est le module qui assure l'aspiration de l'air à travers la soufflerie. Elle est composée de quatre ventilateurs Foxconn PVA092K12N montés sur un support en plexiglas découpé au laser.

Choix des ventilateurs

Pour garantir un débit d'air uniforme dans la veine d'essai, j'ai sélectionné quatre ventilateurs strictement identiques — même marque, même modèle, même référence (Foxconn PVA092K12N, 92×92mm, 18W, 12V) — parmi les ventilateurs d'ordinateur récupérés disponibles au laboratoire. Ce critère d'identité était essentiel : des ventilateurs de modèles différents auraient des débits et des caractéristiques aérauliques différentes, ce qui aurait créé des inhomogénéités dans l'écoulement.

Conception et fabrication du support

J'ai conçu le support des ventilateurs sous Beam Studio et l'ai découpé au laser dans une plaque de plexiglas de 2mm d'épaisseur. Le support présente les caractéristiques suivantes :

- 4 découpes octogonales (plutôt que carrées) pour loger les ventilateurs — la forme octogonale facilite la mise en place des ventilateurs en guidant leur insertion

- 4 trous de fixation autour de chaque découpe octogonale pour visser les ventilateurs sur le support
- Des trous oblongs sur les bords du support pour la connexion à la veine d'essai, offrant un jeu d'ajustement permettant de compenser le léger défaut dimensionnel de la veine d'essai (198×205mm)

Assemblage

J'ai vissé les quatre ventilateurs sur le support plexiglas, en disposant les 4 unités en grille 2×2. J'ai ensuite fixé le support directement sur le cadre de la veine d'essai par vissage via les trous oblongs. Les ventilateurs sont orientés en aspiration — ils aspirent l'air depuis le convergent à travers la veine d'essai, ce qui génère un écoulement plus uniforme dans la zone de mesure que si les ventilateurs soufflaient directement.

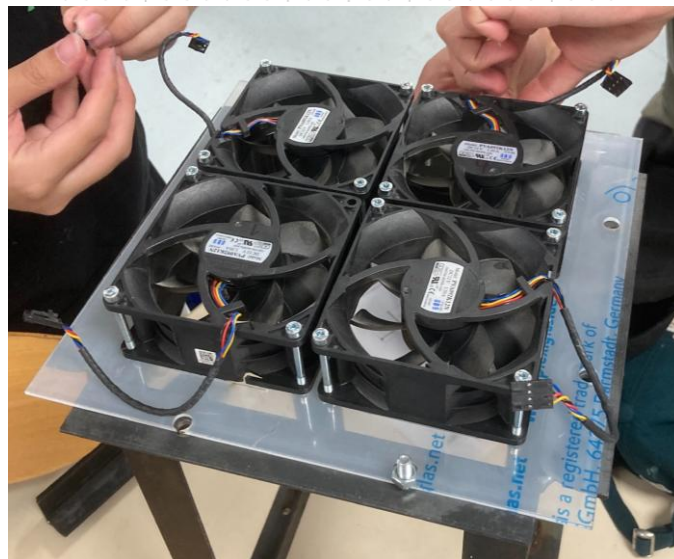
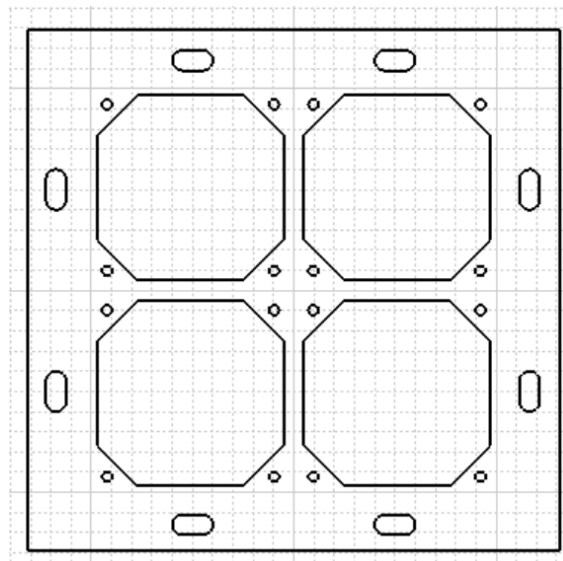


Figure 14 — Section ventilateurs : (a) plan de découpe laser du support plexiglas sous Beam Studio, (b) quatre ventilateurs Foxconn montés en grille 2×2 sur le support plexiglas

Système électronique et pilotage

Pour contrôler la vitesse des quatre ventilateurs de manière précise et reproductible, j'ai mis en place un système électronique de pilotage PWM (*Pulse Width Modulation*) basé sur un microcontrôleur Raspberry Pi Pico.

Choix des composants

J'ai sélectionné les composants suivants :

- **Raspberry Pi Pico** : microcontrôleur compact et économique, capable de générer des signaux PWM sur ses broches GPIO, programmable en MicroPython
- **Alimentation Mean Well LRS-150-12** : alimentation industrielle fixe 12V/12,5A, choisie pour sa fiabilité et sa puissance suffisante pour alimenter les quatre ventilateurs simultanément (puissance totale 72W)
- **Breadboard et jumper cables** : pour le câblage et les connexions entre le Raspberry Pi Pico et les ventilateurs, permettant une mise en place rapide et modifiable sans soudure
- **Laptop avec Thonny** : environnement de développement MicroPython utilisé pour programmer et communiquer avec le Raspberry Pi Pico

Programmation

Durant ce stage, j'ai appris les bases du MicroPython — un langage que je n'avais jamais utilisé auparavant. J'ai programmé le Raspberry Pi Pico pour générer un signal PWM sur les quatre broches GPIO connectées aux fils PWM des ventilateurs (4 fils, fil tachymètre non utilisé). Le programme permet de contrôler la vitesse des ventilateurs via un menu interactif accessible depuis Thonny, avec les options suivantes : augmenter la vitesse par paliers de 10%, diminuer la vitesse par paliers de 10%, passer à pleine vitesse (100%), passer à vitesse minimale (0%), et afficher la vitesse actuelle.

Débogage

Cette phase a été marquée par un problème de débogage : le code semblait correct mais ne s'exécutait pas normalement sur la carte. Après investigation, j'ai découvert que le premier Raspberry Pi Pico utilisé était défectueux. Son remplacement par une nouvelle unité a immédiatement résolu le problème, et le système a fonctionné correctement dès la première exécution sur la nouvelle carte.

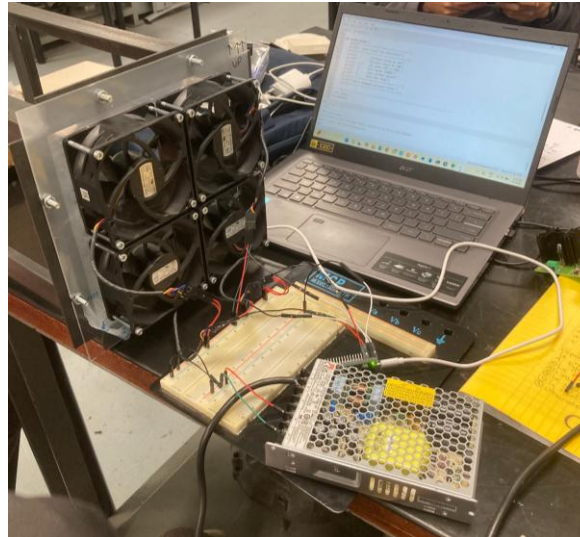


Figure 15 — Système électronique de pilotage : breadboard avec Raspberry Pi Pico, alimentation Mean Well LRS-150-12, ventilateurs connectés et laptop avec Thonny ouvert

Caisson de sortie

Le caisson de sortie est le dernier module de la soufflerie, situé en aval des ventilateurs. Sa fonction principale est de calmer l'air aspiré par les ventilateurs avant qu'il ne soit rejeté dans l'environnement, évitant ainsi que les turbulences générées en sortie des ventilateurs ne remontent dans la veine d'essai et n'affectent la qualité de l'écoulement dans la zone de mesure.

Fabrication

J'ai construit le caisson de sortie selon la même méthode que la veine d'essai : ossature en cornières soudées par MAG, de section identique à la veine d'essai ($\sim 198 \times 205 \text{ mm}$) et d'une longueur d'environ 160mm. J'ai soudé une plaque de connexion côté ventilateurs pour assurer le raccordement au module ventilateurs par vissage.

J'ai également soudé une plaque de connexion côté sortie, bien que ce côté soit actuellement ouvert et ne soit raccordé à aucun autre module. Ce choix de conception prospectif permet à l'équipe d'ajouter un divergent en aval dans une version future de la soufflerie, sans avoir à modifier le caisson de sortie existant — illustrant ainsi la logique d'évolutivité que j'ai appliquée à l'ensemble de la conception modulaire.

Contrairement à la veine d'essai, je n'ai pas réalisé d'opération de surfaçage sur le caisson de sortie : étant situé en aval des ventilateurs, ce module n'a aucune influence sur la qualité de l'écoulement dans la zone de mesure, et une planéité parfaite n'était donc pas nécessaire.

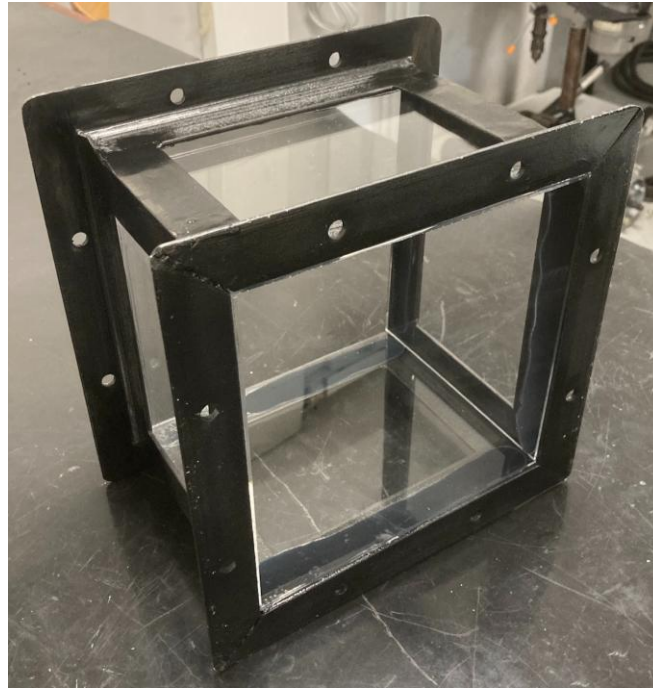


Figure 16 — Caisson de sortie assemblé, montrant les plaques de connexion des deux côtés

Pieds réglables

Pour assurer la stabilité et le nivellement de la soufflerie sur une table de laboratoire, j'ai conçu et fabriqué six pieds réglables en hauteur — quatre sous la veine d'essai et deux sous le convergent.

Conception

J'ai opté pour un système simple et efficace : des barres creuses 20×20mm dans lesquelles j'ai emmaillotté et soudé des écrous M8. En vissant des vis M8 à tête hexagonale dans ces écrous, j'obtiens des pieds dont la hauteur est réglable en tournant simplement la vis — plus la vis est dévissée, plus le pied est long. Ce système permet un réglage fin et indépendant de chaque pied, garantissant un nivellement précis de l'ensemble de la soufflerie.

Fabrication

Pour les quatre pieds de la veine d'essai, j'ai soudé les barres creuses directement sur la face inférieure du cadre de la veine d'essai, puis j'ai vissé les vis M8 à tête hexagonale pour compléter les pieds.

Pour les deux pieds du convergent, j'ai dû adapter la conception : la partie basse du convergent étant inclinée à 14°, j'ai coupé les barres creuses à cet angle de 14° afin qu'elles soient perpendiculaires au sol une fois soudées sur les cornières inclinées. J'ai soudé ces deux pieds sur les cornières inclinées de la partie pyramidale tronquée du convergent.

Nivellement

Une fois tous les modules assemblés, j'ai réglé la hauteur de chaque pied individuellement pour niveler l'ensemble de la soufflerie et m'assurer que la veine d'essai est parfaitement horizontale — condition importante pour garantir un écoulement symétrique dans la zone de mesure.

Perspectives d'amélioration

Durant la fabrication, j'ai envisagé d'imprimer en TPU des embouts à placer sous les vis pour protéger la surface de la table et améliorer la stabilité du dispositif par adhérence. Cette amélioration n'a pas pu être réalisée faute de temps, mais constitue une évolution simple et rapide à mettre en œuvre pour les versions futures de la soufflerie.



Figure 17 — Pieds réglables : (a) détail d'un pied de la veine d'essai montrant l'écrou M8 soudé dans la barre creuse, (b) vue d'ensemble de l'assemblage veine d'essai + convergent avec les six pieds visibles

Premier assemblage à blanc

Avant de procéder à la peinture et à la pose du plexiglas, j'ai réalisé un premier assemblage à blanc de l'ensemble des modules métalliques — convergent, veine d'essai, section ventilateurs et caisson de sortie — afin de vérifier que tout s'assemblait correctement et que les dimensions et alignements étaient satisfaisants.

Objectifs de l'assemblage à blanc

Cet assemblage à blanc avait plusieurs objectifs :

- Vérifier l'alignement entre les quatre modules et la compatibilité des plaques de connexion
- Vérifier que les trous de vissage entre modules s'alignaient correctement
- Identifier d'éventuels défauts géométriques ou problèmes d'assemblage avant la peinture — car une fois peint et silicone appliqué, les modifications deviennent beaucoup plus difficiles à réaliser
- Valider le nivellement de l'ensemble avec les six pieds réglables

- Confirmer que la soufflerie tient bien sur une table de laboratoire standard, comme demandé par M. Loïc TADRIST

Résultat

L'assemblage à blanc a confirmé que l'ensemble des modules s'assemblaient correctement et que les dimensions générales du dispositif étaient conformes au cahier des charges. Une fois cette vérification faite, j'ai procédé au désassemblage complet de la soufflerie en vue de la peinture.

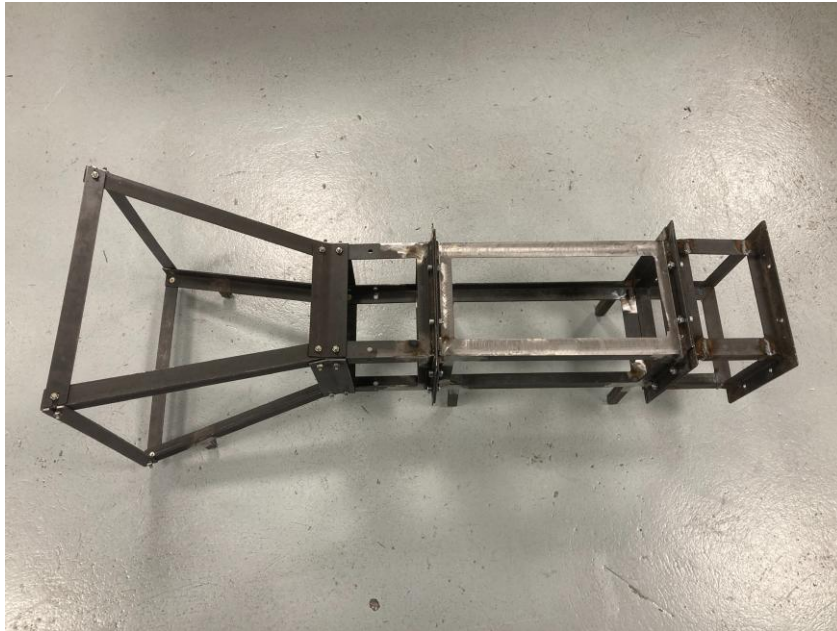


Figure 18 — Premier assemblage à blanc de la soufflerie, montrant les quatre modules assemblés sans peinture ni plexiglas

Assemblage final, peinture et étanchéité

Après validation de l'assemblage à blanc, j'ai procédé aux opérations de finition — peinture, pose du plexiglas et jointoiement au silicone — avant de réaliser l'assemblage final de la soufflerie.

Peinture

Avec les conseils de M. Eric JEANCELME, j'ai peint l'ensemble des pièces métalliques à la bombe aérosol noire mat. J'ai utilisé deux bombes au total pour couvrir l'ensemble des modules. La peinture noire a été choisie pour protéger les pièces en acier contre la corrosion. Avant d'appliquer la peinture, j'ai soigneusement nettoyé et dégraissé toutes les pièces pour garantir une bonne adhérence.

Pose du plexiglas et étanchéité au silicone

Une fois la peinture sèche, j'ai procédé à la pose des panneaux de plexiglas sur l'ensemble des modules (veine d'essai, convergent, caisson de sortie). Pour chaque module, j'ai appliqué le silicone au pistolet le long des cornières métalliques peintes, puis pressé chaque panneau de plexiglas contre le cadre. J'ai ensuite réalisé un joint

silicone à chaque intersection entre panneaux et aux coins, pour garantir l'étanchéité de l'ensemble et éviter les fuites d'air parasites.

Cette technique de jointoiement au silicone, que je n'avais jamais pratiquée auparavant, m'a été enseignée par M. Fauzan Adzim BIN AHMAD ZULFAQUR, dont l'expérience en aquariophilie s'est avérée très utile pour cette étape. Les surplus de silicone sur les surfaces en plexiglas ont été soigneusement nettoyés à l'alcool à brûler pour obtenir une finition propre et transparente.

Assemblage final

Une fois la peinture et le silicone appliqués et secs, j'ai procédé à l'assemblage final de l'ensemble des modules par vissage. J'ai ensuite réglé la hauteur des six pieds réglables pour niveler l'ensemble de la soufflerie sur la table de laboratoire. Le couvercle en plexiglas a été posé sur la veine d'essai.



Figure 19 — Séchage des modules métalliques après application de la peinture noire à la bombe aérosol

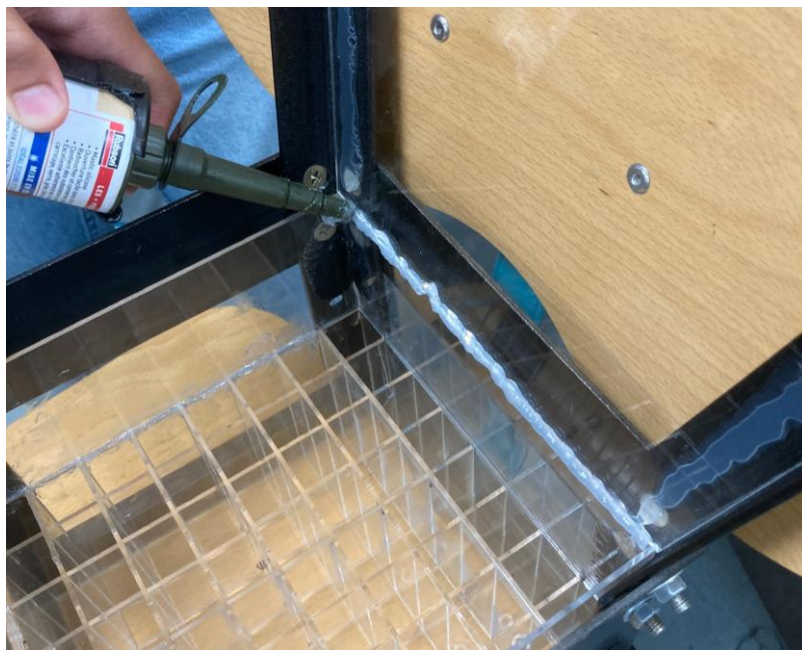


Figure 20 — Application du silicone au pistolet sur les joints plexiglas/cadre métallique

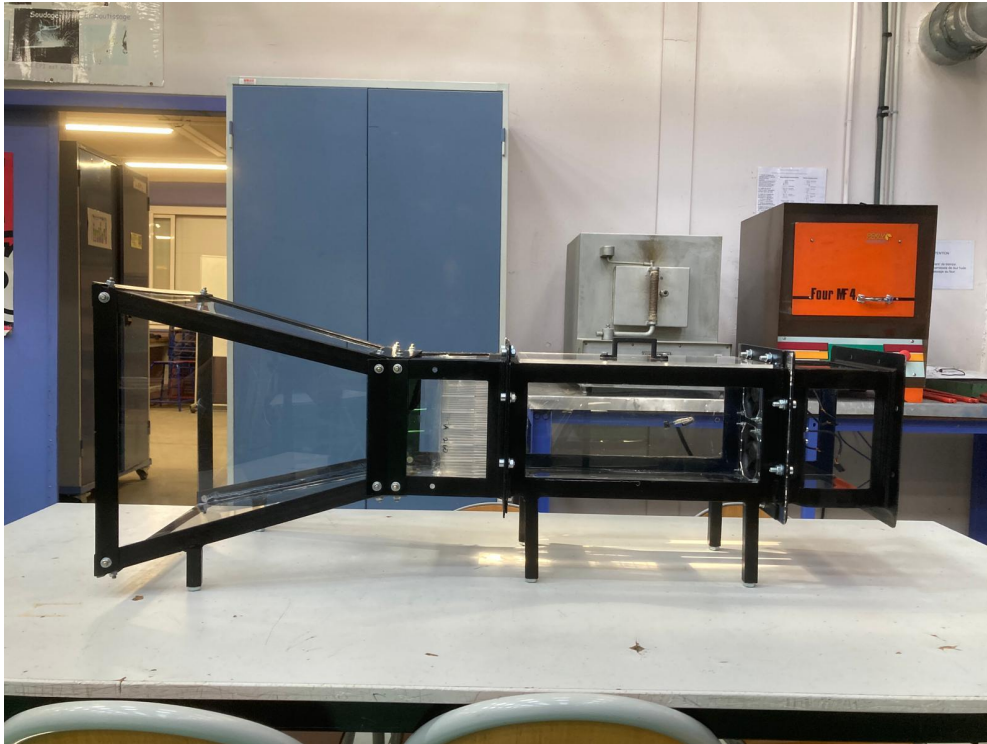


Figure 21 — Vue d'ensemble de la soufflerie assemblée et finalisée

Validation fonctionnelle

Une fois la soufflerie entièrement assemblée, j'ai procédé à une validation fonctionnelle du dispositif afin de vérifier son bon fonctionnement avant de le remettre à l'équipe de recherche.

Tests réalisés

J'ai effectué les vérifications suivantes :

- **Démarrage des ventilateurs** : j'ai vérifié que les quatre ventilateurs démarraient correctement et tournaient dans le bon sens (aspiration depuis la veine d'essai) lors de la mise sous tension de l'alimentation Mean Well LRS-150-12.
- **Contrôle PWM** : j'ai vérifié via Thonny que le programme MicroPython sur le Raspberry Pi Pico permettait bien de faire varier la vitesse des quatre ventilateurs de manière synchrone, en testant plusieurs paliers de vitesse.
- **Écoulement d'air** : J'ai installé une feuille modèle dans la veine d'essai afin de valider la présence et le sens de l'écoulement. La feuille modèle a bien réagi à l'écoulement d'air en entrant en flottement et en oscillant, confirmant ainsi la présence d'un écoulement effectif dans la veine d'essai. De plus, différents paliers de vitesse ont produit des comportements distincts de la feuille, validant la capacité du dispositif à générer des conditions d'écoulement variables et contrôlables.
- **Étanchéité visuelle** : j'ai vérifié visuellement l'absence de fuites d'air importantes au niveau des joints silicone et des connexions entre modules.

- **Stabilité mécanique** : j'ai vérifié que la soufflerie restait stable sur la table de laboratoire lors du fonctionnement des ventilateurs, sans vibrations excessives ni déplacement du dispositif.

Résultat

L'ensemble des tests a été concluant — la soufflerie est fonctionnelle et prête à être utilisée pour la campagne expérimentale. Le dispositif respecte le cahier des charges initial : il tient sur une table de laboratoire standard, génère un écoulement d'air contrôlable dans la veine d'essai de section $\sim 198 \times 205 \text{ mm}$, et permet un contrôle précis de la vitesse des ventilateurs via le Raspberry Pi Pico.

À la date de remise de ce rapport, trois éléments d'instrumentation sont en cours de finalisation et seront complétés avant la fin officielle du stage (jeudi/vendredi) : l'installation du tube de Pitot pour la mesure de la vitesse réelle de l'écoulement, la mise en place du système de chauffage des feuilles modèles (tapis chauffant), et le raccordement du thermocouple et de l'amplificateur pour l'acquisition des données de température.



Figure 22 — Feuille modèle installée dans la veine d'essai lors du test de validation

Conception théorique des feuilles modèles et protocole expérimental

Bien que la fabrication des feuilles modèles et la campagne expérimentale n'aient pas pu être réalisées dans le temps imparti, j'ai établi durant ce stage les bases théoriques et le protocole expérimental nécessaires à la suite du projet, de sorte que l'équipe puisse poursuivre directement les expériences sans avoir à reprendre cette réflexion depuis le début.

Conception des feuilles modèles

Conformément au sujet de stage et aux discussions avec M. Loïc TADRIST, deux feuilles modèles devront être fabriquées :

- **Feuille rigide** : pétiole en plastique dur rigide, tige rigide — cette feuille ne peut pas entrer en flottement et servira de référence pour les mesures thermiques
- **Feuille en flottement** : pétiole en plastique dur rigide, tige en corde de piano — la flexibilité de la corde de piano permet à la feuille d'entrer en flottement aéroélastique au-delà d'une certaine vitesse de vent critique, conformément au critère de Den Hartog

Le limbe des deux feuilles modèles sera réalisé en un matériau rigide (plastique dur) et équipé d'un tapis chauffant pour simuler l'apport d'énergie solaire, ainsi que d'un thermocouple pour mesurer la température de surface. La caméra infrarouge (IR) permettra de visualiser la distribution de température sur la surface de la feuille depuis l'extérieur de la veine d'essai, couvercle retiré.

Protocole expérimental

Le protocole expérimental que j'ai établi pour la suite du projet s'articule autour de la comparaison systématique du bilan thermique des deux feuilles modèles sous différentes conditions de vent. Les variables du plan d'expérience sont les suivantes :

- **Variable manipulée** : condition de flottement — feuille rigide vs feuille en flottement
- **Variables à faire varier** : vitesse du vent (contrôlée via le PWM du Raspberry Pi Pico), puissance du tapis chauffant, rugosité de surface de la feuille, et angle d'inclinaison de la feuille par rapport à la direction de l'écoulement
- **Variables mesurées** : température de surface (thermocouple + caméra IR), amplitude et fréquence du flottement (caméra vidéo)
- **Variables constantes** : géométrie et dimensions des feuilles, température ambiante, humidité

Pour chaque condition expérimentale, la procédure sera la suivante : installer la feuille modèle dans la veine d'essai, régler la puissance du tapis chauffant, attendre la stabilisation thermique, régler la vitesse de vent via Thonny, puis enregistrer les données de température et de mouvement. Chaque expérience sera identifiée par un code au format AAAAMMJJ_HHMM et les données seront stockées dans une base de données MATLAB (fichier resultats.mat) conformément aux instructions du laboratoire.

Instrumentation prévue

- Un tube de Pitot + capteur de pression différentielle pour mesurer la vitesse réelle de l'écoulement dans la veine d'essai — j'ai d'ores et déjà percé deux trous sur la paroi latérale de la veine d'essai pour permettre l'installation du tube de Pitot lors de la campagne expérimentale (en cours de réalisation)
- Un thermocouple fixé sur chaque feuille modèle (en cours de réalisation)
- Une caméra infrarouge (IR) pour la cartographie thermique de surface

- Un amplificateur connecté au Raspberry Pi Pico pour le traitement du signal (en cours de réalisation)
- Un ordinateur pour l'acquisition et le stockage des données

Bilan de l'étude : conclusion technique

Bilan technique — prévisionnel vs réalisé

Au terme de ce stage de dix semaines, le bilan technique met en évidence un écart significatif entre la démarche prévisionnelle et la démarche réellement suivie. Sur les cinq grandes tâches initialement prévues, une seule a été intégralement réalisée : la conception et la fabrication de la soufflerie. La recherche bibliographique a été partiellement menée en parallèle des phases de fabrication, mais n'a pas pu être approfondie autant que prévu. Les tâches de caractérisation de la soufflerie, de fabrication des feuilles modèles et de campagne expérimentale n'ont pas pu être réalisées dans le temps imparti.

Cet écart s'explique principalement par la complexité sous-estimée de la phase de fabrication, notamment :

- La fabrication de la partie haute du convergent, qui a nécessité trois tentatives successives avant d'aboutir à un résultat satisfaisant
- Le temps consacré aux opérations de finition (surfaçage, peinture, jointoiement au silicone) qui s'est avéré plus important que prévu
- Le débogage du Raspberry Pi Pico défectueux qui a retardé la phase électronique

Il est difficile de ne pas ressentir une certaine frustration face à cette situation : après dix semaines de travail intense, de nombreuses itérations et d'efforts considérables pour livrer une soufflerie fonctionnelle et de qualité, le temps a manqué pour franchir l'étape suivante et voir concrètement les feuilles modèles se mettre en flottement dans le dispositif que j'ai conçu et fabriqué de mes mains. Ne pas avoir pu mener la campagne expérimentale reste le principal regret de ce stage. Cela dit, je suis conscient que la fabrication d'un tel dispositif expérimental de zéro, dans le temps imparti et avec les moyens disponibles, représentait déjà un défi technique considérable — et que le travail réalisé constitue une base solide et directement exploitable pour la suite du projet.

Analyse du travail effectué

Malgré cet écart par rapport au planning initial, le travail réalisé durant ce stage constitue une contribution concrète et opérationnelle au projet de recherche. La soufflerie livrée est un dispositif fonctionnel, modulaire et évolutif, directement exploitable pour la suite des expériences. Elle respecte l'ensemble des critères du cahier des charges :

- Dispositif compact, utilisable sur une table de laboratoire standard
- Utilisation des ventilateurs récupérés disponibles au laboratoire
- Vitesse d'air contrôlable via PWM (Raspberry Pi Pico)
- Section d'essai ~198×205mm adaptée aux feuilles modèles prévues
- Architecture modulaire à quatre modules

Limites et perspectives d'amélioration

La soufflerie dans sa version actuelle présente plusieurs limites identifiées, qui constituent autant de pistes d'amélioration pour les versions futures :

- **Étanchéité entre modules** : les connexions entre modules sont actuellement assurées uniquement par vissage en appui plan, sans joint d'étanchéité. L'ajout de joints entre modules permettrait de réduire les fuites d'air parasites et d'améliorer l'uniformité de l'écoulement.
- **Pieds réglables** : l'ajout d'embouts en TPU imprimés en 3D sous les vis des pieds améliorerait la stabilité du dispositif et protégerait la surface de la table de laboratoire.
- **Caractérisation de l'écoulement** : la vitesse d'air dans la veine d'essai a été estimée théoriquement (~ 10 m/s) mais n'a pas encore été mesurée expérimentalement. Une campagne de mesures au tube de Pitot permettra de valider ce résultat et de cartographier le profil de vitesse dans la section d'essai.
- **Transmission infrarouge** : le plexiglas standard utilisé pour les parois ne transmet pas le rayonnement infrarouge thermique ($7,5\text{--}13\ \mu\text{m}$). Pour les mesures à la caméra IR, il sera nécessaire soit de retirer le couvercle, soit de remplacer une paroi par un matériau IR-transparent (germanium, séléniure de zinc).
- **Divergent** : le caisson de sortie est actuellement ouvert et équipé d'une plaque de connexion prévue à cet effet — l'ajout d'un divergent en aval des ventilateurs permettrait de récupérer de l'énergie cinétique et d'améliorer le rendement global de la soufflerie.

Perspectives pour la suite du projet

La soufflerie étant désormais opérationnelle, l'équipe peut poursuivre le projet selon le protocole expérimental établi en section 3.3.14. Les prochaines étapes sont :

1. Caractérisation de la soufflerie (profil de vitesse au tube de Pitot, niveau de turbulence)
2. Fabrication des deux feuilles modèles (feuille rigide + feuille en flottement avec corde de piano)
3. Instrumentation des feuilles (tapis chauffant, thermocouple)
4. Campagne expérimentale selon le plan d'expérience établi
5. Analyse des données et comparaison des bilans thermiques

4. Rapport PPP : présentation du métier d'Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche (ATER)

Dans le cadre de ce rapport PPP, j'ai eu l'opportunité d'interviewer M. Dhruva Rajesh KHANZODE, Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche (ATER) au sein de l'équipe Systèmes Bio-Inspirés (SBI) de l'Institut des Sciences du Mouvement. Son parcours atypique et son sujet de recherche original m'ont particulièrement intéressé, car ils illustrent bien la diversité des profils et des sujets que l'on peut trouver au sein d'un laboratoire de biomécanique. Cet entretien s'est déroulé en anglais, langue qui nous était plus accessible à tous les deux et qui constitue par ailleurs la langue de travail commune au sein de l'équipe internationale de l'ISM.

Parcours académique et professionnel

M. KHANZODE a effectué sa licence en génie mécanique en Inde, à l'université RTMNU, avant de poursuivre avec un master en mécatronique à l'IIEST, également en Inde. C'est durant ce master qu'il a effectué une année de recherche au CSIR — l'équivalent indien du CNRS français — qui l'a introduit au monde de la recherche et lui a donné envie de poursuivre dans cette voie. Il a alors décidé de réaliser un doctorat, qu'il a effectué en cotutelle entre l'ACSIR en Inde et Centrale Nantes, au sein du laboratoire LS2N. Sa thèse portait sur les outils chirurgicaux robotiques inspirés de la trompe d'éléphant — un sujet à l'interface entre la biomécanique animale et la robotique médicale. En dernière année de thèse, il a candidaté à un poste d'ATER à Aix-Marseille Université, au sein de l'ISM, en raison de la proximité thématique avec ses travaux de doctorat. Son contrat se termine à la fin de cette année universitaire, après quoi il rejoindra une équipe R&D en entreprise, toujours dans le domaine de la biomécanique.

Sujet de recherche actuel

Au sein de l'équipe SBI, M. KHANZODE étudie le crabe vert méditerranéen (*Carcinus maenas*), un petit crustacé très commun sur les côtes méditerranéennes. Son objectif principal est de mesurer et d'analyser les forces de réaction au sol générées par le crabe lors de ses déplacements. Ce travail est mené en collaboration avec M. Thomas GUILLANTON, doctorant au sein de la même équipe, qui étudie quant à lui les angles articulaires des pattes du crabe, et avec M. Santiago ARROYAVE-TOBON, chercheur et directeur de thèse de M. GUILLANTON.

Une journée type

M. KHANZODE m'a expliqué que son travail est fortement conditionné par la disponibilité des animaux — chaque nouveau crabe peut donner des mesures différentes, ce qui impose une grande flexibilité dans l'organisation du travail. Outre les expériences, son rôle implique de développer les équipements auxiliaires nécessaires au bon déroulement des recherches. À titre d'exemple, l'équipe a récemment dû réfléchir à une

méthode d'euthanasie éthique des crabes, ce qui l'a amené à concevoir et fabriquer un dispositif d'électrocution. Comme il me l'a résumé lui-même : "If required, we develop" — une phrase qui illustre bien la polyvalence exigée par le métier de chercheur expérimental.

Compétences requises

Selon M. KHANZODE, le métier de chercheur expérimental en biomécanique repose sur deux piliers complémentaires. Sur le plan de l'ingénierie, il insiste sur l'importance de maîtriser trois domaines : la mécanique, l'électronique et la programmation — et surtout leur combinaison, car c'est leur interaction qui permet de concevoir des dispositifs expérimentaux complets et fonctionnels. Sur le plan de la recherche, il souligne l'importance de la curiosité intellectuelle : il faut toujours se poser la question "pourquoi ?", et avoir la capacité de trouver comment y répondre.

Ce qui est passionnant... et difficile

M. KHANZODE m'a confié que ce qu'il trouve à la fois le plus passionnant et le plus difficile dans son travail, c'est la même chose : travailler avec des animaux vivants. Contrairement aux systèmes électroniques ou mécaniques, dont le comportement est prévisible et reproductible, les animaux vivants ne se comportent jamais exactement de la même façon d'une session à l'autre. Cette imprévisibilité rend les expériences excitantes et uniques, mais impose également une grande capacité d'adaptation — il faut savoir réagir à l'inattendu et ajuster sa démarche expérimentale en temps réel.

Conclusion

L'interview de M. Dhruva Rajesh KHANZODE m'a permis de découvrir un métier que je ne connaissais pas bien avant ce stage : celui de chercheur expérimental en biomécanique. Son parcours international, sa polyvalence technique et sa passion pour les systèmes biologiques m'ont beaucoup impressionné. Cette rencontre m'a également confirmé que la recherche en biomécanique est un domaine où les compétences d'ingénieur sont pleinement valorisées et mobilisées au quotidien.



Figure 23 — Entretien avec M. Dhruva Rajesh KHANZODE, ATER au sein de l'équipe SBI de l'ISM

5. Conclusion générale et personnelle

Conclusion générale

Ce stage de dix semaines au sein de l'équipe Systèmes Bio-Inspirés (SBI) de l'Institut des Sciences du Mouvement m'a permis de concevoir et de fabriquer une soufflerie de table destinée à l'étude du rôle du flottement aéroélastique dans le bilan thermique des feuilles d'arbre. Bien que la campagne expérimentale n'ait pas pu être menée dans le temps imparti, le dispositif livré est fonctionnel, modulaire et directement exploitable par l'équipe pour la suite du projet. Le protocole expérimental établi et les bases théoriques posées constituent également des livrables concrets qui permettront à l'équipe de poursuivre les expériences sans avoir à reprendre cette réflexion depuis le début.

Apports techniques

Sur le plan technique, ce stage a été extrêmement formateur. J'ai acquis de nouvelles compétences sur des machines et outils que je ne maîtrisais pas auparavant : la plieuse CNC Jean Perrot, la disqueuse, le pistolet à silicone et la peinture à la bombe aérosol. J'ai également appris les bases du soudage MAG, du surfaçage sur fraiseuse conventionnelle, et de la découpe laser sous Beam Studio. En électronique et programmation, j'ai découvert le MicroPython, l'environnement Thonny et le microcontrôleur Raspberry Pi Pico — des outils que je ne connaissais pas avant ce stage. Enfin, si j'utilisais déjà CATIA V5 avant ce stage, je considère avoir significativement progressé dans sa maîtrise au fil des semaines, notamment pour la conception de pièces mécaniques complexes.

Apports scientifiques

Sur le plan scientifique, j'ai découvert un domaine que je ne connaissais pas du tout avant ce stage : le flottement aéroélastique et son lien avec le bilan thermique des feuilles d'arbre. Si je savais déjà, de par ma formation en biologie générale, que la chaleur affecte le métabolisme, la photosynthèse et la transpiration des plantes, j'ignorais totalement que le mouvement mécanique d'une feuille pouvait avoir un impact mesurable sur sa température de surface — et donc sur son efficacité physiologique. Cette découverte m'a donné envie d'approfondir le sujet par la lecture des articles de référence du domaine.

Apports personnels et professionnels

Sur le plan personnel, ce stage a été une expérience marquante. L'ambiance au sein de l'équipe SBI et du département GMP de l'IUT était stimulante — j'ai été frappé par la passion que chaque membre de l'équipe portait à ses recherches, ce qui m'a donné envie de m'investir pleinement dans mon propre travail. J'ai également beaucoup apprécié les échanges avec mes camarades stagiaires, dont l'entraide a rendu cette expérience encore plus enrichissante.

Le moment le plus difficile de ce stage a sans doute été de devoir recommencer la fabrication de la partie haute du convergent une troisième fois, après deux tentatives infructueuses. Trouver la motivation de repartir de zéro après tant d'efforts n'a pas été simple, mais c'est précisément dans ces moments que j'ai le plus appris — sur la fabrication, mais aussi sur moi-même et sur la persévérance que demande un projet d'ingénierie.

La fierté la plus grande de ce stage reste de voir la soufflerie fonctionner pour la première fois. Après toutes les difficultés rencontrées, les heures supplémentaires passées à l'atelier au-delà des horaires habituels, et les nombreuses itérations de conception et de fabrication, voir le dispositif tourner et générer un flux d'air dans la veine d'essai a été un moment d'émotion sincère.

Enfin, ce stage a conforté mon orientation professionnelle : j'ai toujours souhaité travailler dans le domaine des turbomachines, notamment dans les secteurs de l'énergie, où les turbines jouent un rôle central. Ce stage, qui m'a confronté concrètement à la mécanique des fluides, à l'aéroélasticité et à la conception de dispositifs expérimentaux, constitue pour moi une excellente introduction à ces domaines. Si je pouvais recommencer ce stage, je le referais sans hésitation — avec les connaissances et la précision acquises, je suis convaincu que j'aurais pu aller jusqu'à la campagne expérimentale.

Bibliographie

Articles scientifiques :

- [1] TADRIST, L., JULIO, K., SAUDREAU, M., & DE LANGRE, E. (2015). Leaf flutter by torsional galloping: experiments and model. *Journal of Fluids and Structures*, 56, 1–10.
<https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2015.04.001>
- [2] TADRIST, L., SAUDREAU, M., HÉMON, P., AMANDOLESE, X., MARQUIER, A., LECLERCQ, T., & DE LANGRE, E. (2018). Foliage motion under wind, from leaf flutter to branch buffeting. *Journal of the Royal Society Interface*, 15, 20180010.
<https://doi.org/10.1098/rsif.2018.0010>
- [3] MASRI, I., LENI, D., MUCHLISINALAHUDDIN, ALGHANI, I., VADILA, Y., & STEVANO, R. (2025). Mini-Scale Windtunnel Design Using SolidWorks. *5th International Conference on Innovations in Social Sciences Education and Engineering (ICoISSEE-5)*, Bandung, Indonésie.

Ouvrages et chapitres :

- [4] CATTAFESTA, L., BAHR, C., & MATHEW, J. (2010). Fundamentals of Wind-Tunnel Design. Dans R. Blockley & W. Shyy (Éds.), *Encyclopedia of Aerospace Engineering*. John Wiley & Sons.

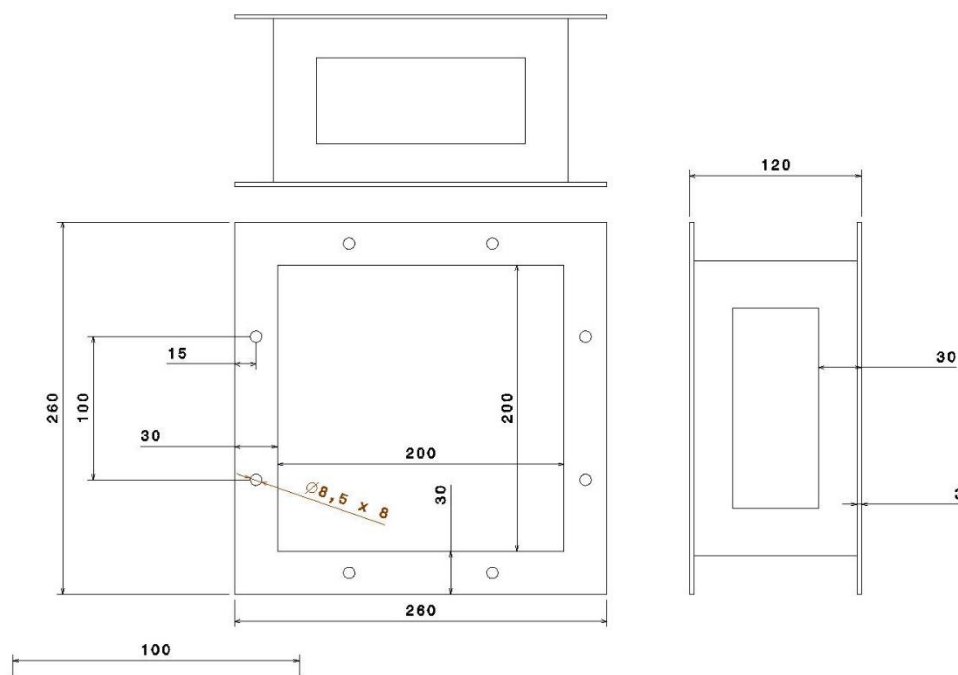
Documents techniques :

- [5] TENSI, J. (2014). *La soufflerie EOLIA : un bel exemple d'action éducative de la 3AF*. Association Aéronautique et Astronautique de France (3AF), Groupe Régional Poitiers Centre Atlantique.
- [6] SCORDO, B. *BOREA : Une soufflerie à vocation pédagogique*. Association d'Aéromodélisme (AAM), Belgique. Consulté le 17 juin 2026, sur <http://www.soufflerie-borea.be>

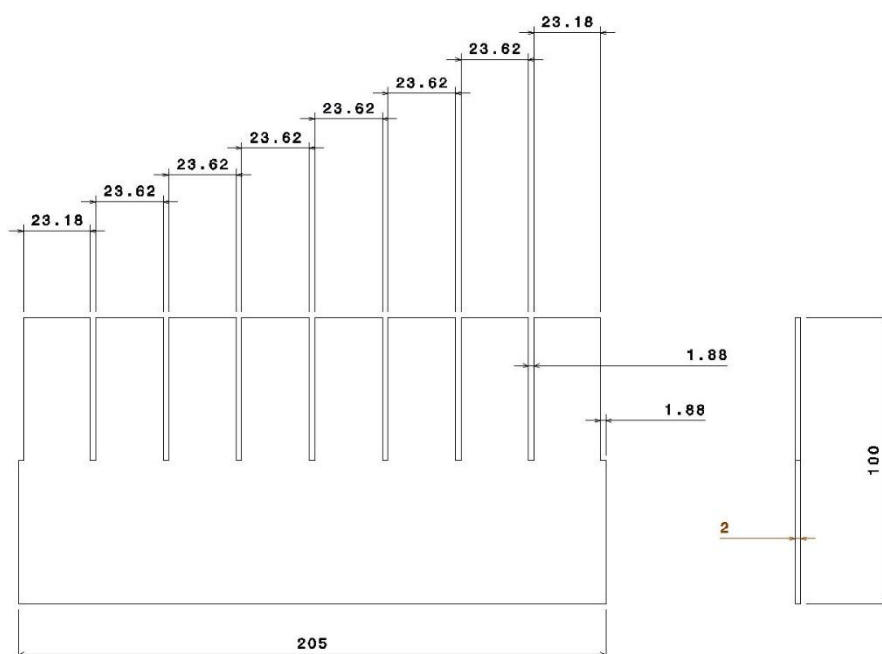
Sites web :

- [7] Institut des Sciences du Mouvement Etienne-Jules Marey (ISM). *Présentation de l'ISM*. Aix-Marseille Université / CNRS. Consulté le 17 juin 2026, sur <https://ism.univ-amu.fr/fr>
- [8] Mean Well. *LRS-150-12 — Alimentation industrielle 12V*. Consulté le 17 juin 2026, sur <https://www.gotronic.fr/art-alimentation-lrs150-12-26285.htm>
- [9] Foxconn. *Fiche technique ventilateur PVA092K12N*. Consulté le 17 juin 2026.

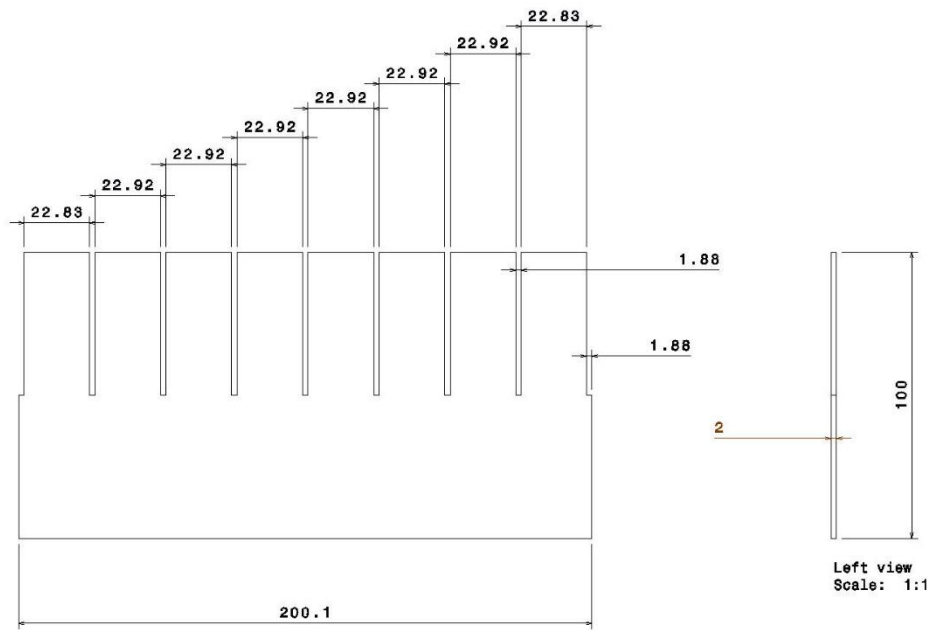
Annexe



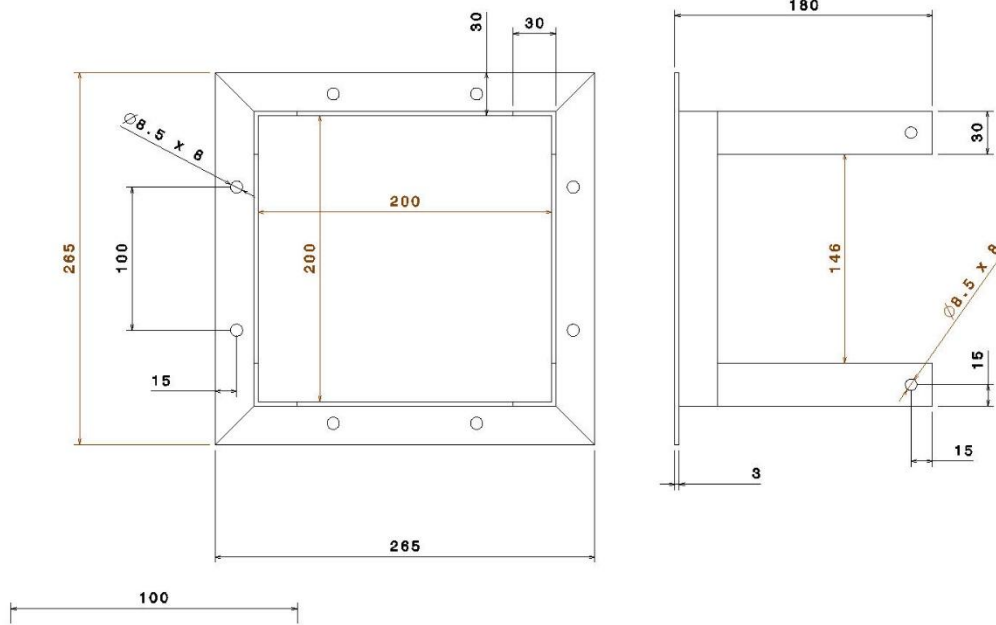
Ensemble : -	Echelle : 1:1	N° N°
Caisson de sortie	Nom : Aidan	IUT - GMP AIX EN PROVENCE
Nom du fichier : -	Date : -	Tel. Gén : 150 2708...



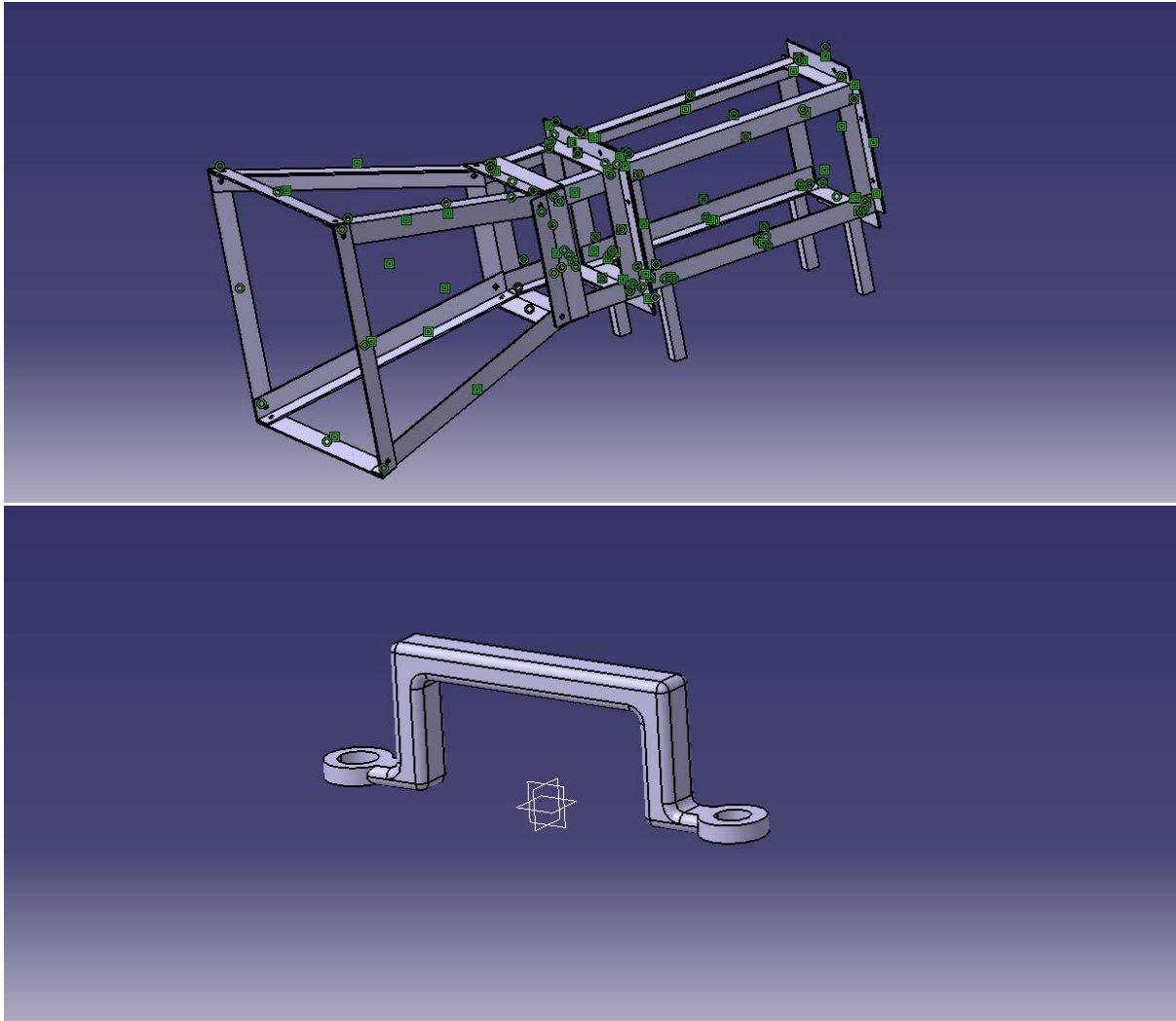
Ensemble : -	Echelle : 1:1	N° N°
Cond. d'ec. A	Nom : Aidan	IUT - GMP AIX EN PROVENCE
Nom du fichier : -	Date : Date	Tel. Gén : 150 2708...



Ensemble : -	Echelle : 1:1	N° N°	
Cond d'ec B	Nom : Aidan	IUT - GMP AIX EN PROVENCE	
Nom du fichier : -	Date : Date	Tel.06n : 160 2706...	



Ensemble : -	Echelle : 1:2	N° N°
Connecteur	Non : Aidan	IUT - 6MP AIX EN PROVENCE
	Date : -	Tel.066 180 2766...
Non du fichier : -		



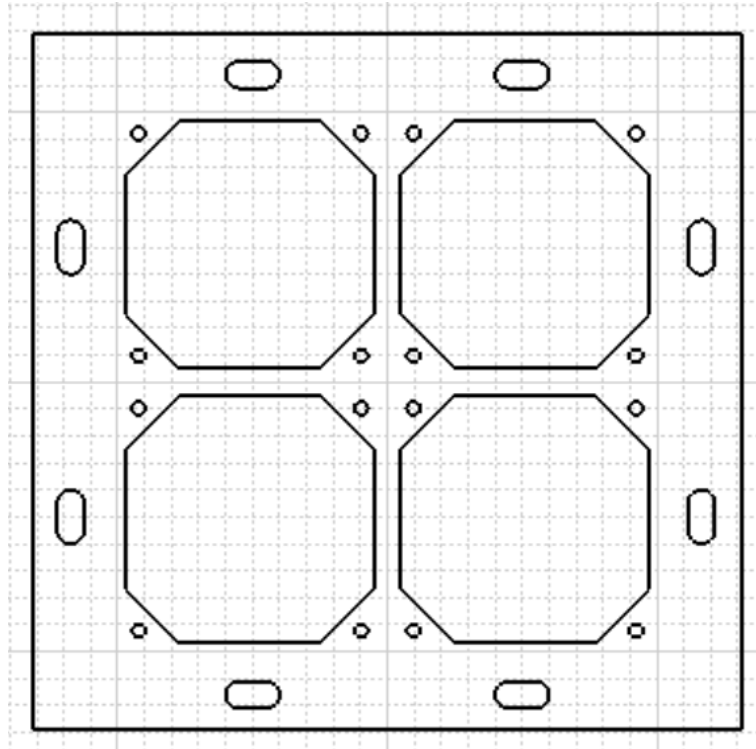
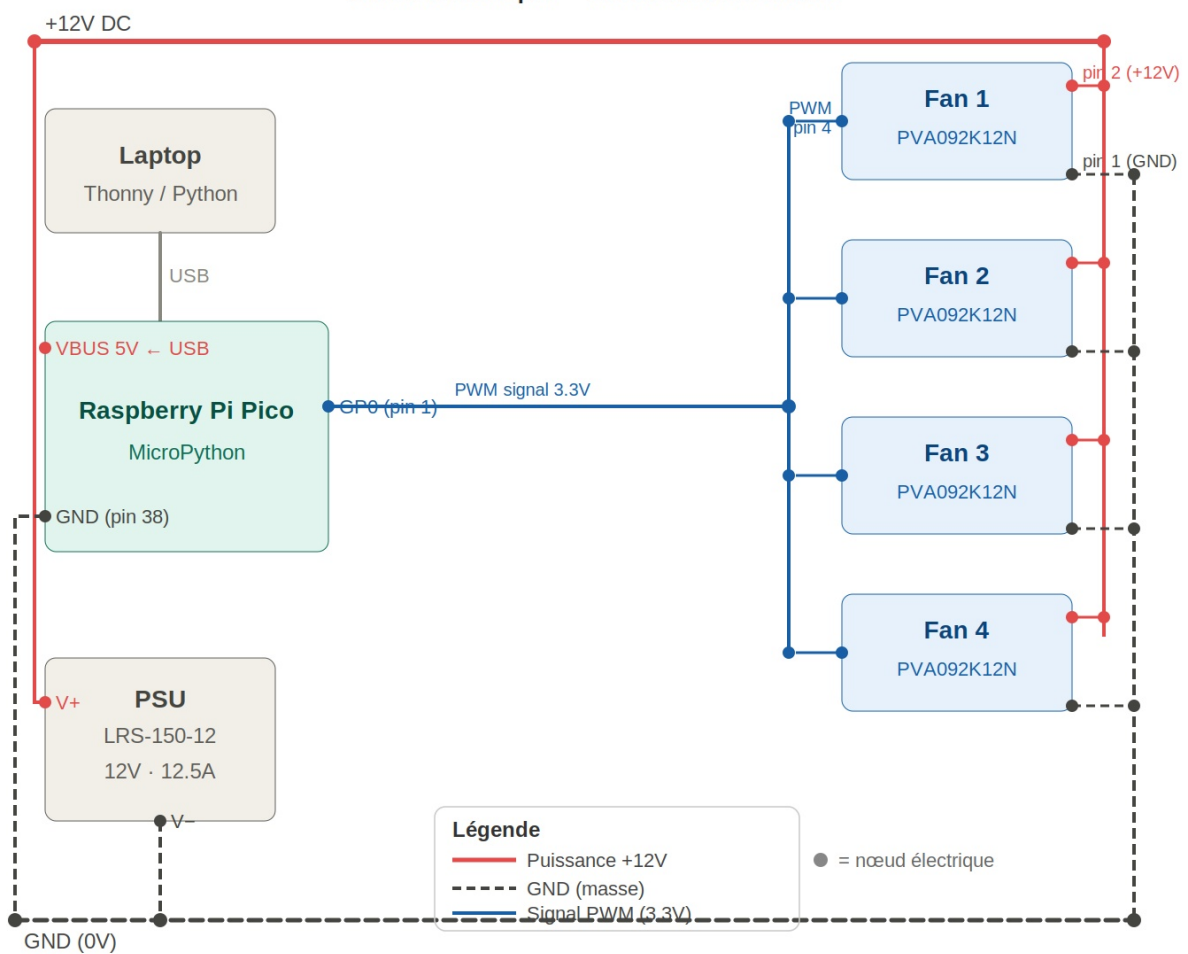


Schéma électrique — Tunnel de vent ISM/SBI



```

"""
Wind Tunnel Fan Controller – Raspberry Pi Pico
ISM / SBI Lab – Leaf flutter thermal balance study

All 4 fans connected to GP0 (pin 1)

Control fan speed using keyboard in Thonny Shell:
+ → increase speed by 10%
- → decrease speed by 10%
0 → stop fans
1 → 10% speed
2 → 20% speed
...
9 → 90% speed
f → 100% full speed
s → show current speed
h → show help
"""

from machine import Pin, PWM

# — Step 1: Set PWM frequency —————
# 25000 Hz is the correct frequency for computer fans

FAN_FREQ_HZ = 50

# — Step 2: Set up GP0 as PWM output —————
# All 4 fans are connected to GP0 (physical pin 1 on the Pico)
fan = PWM(Pin(0))
fan.freq(FAN_FREQ_HZ)
fan.duty_u16(0) # start at 0 speed

# — Step 3: Speed control function —————
current_speed = 0 # percentage 0 to 100

def set_speed(percent):
    global current_speed
    # Make sure speed stays between 0 and 100
    percent = max(0, min(100, percent))
    current_speed = percent
    # Convert percentage to 16-bit value (0-65535)
    duty = int(percent / 100 * 65535)
    fan.duty_u16(duty)
    print(f"Speed set to {current_speed}%")
    print(duty)

# — Step 4: Help menu —————
def print_help():
    print("_____")
    print(" Wind Tunnel Fan Controller")
    print("_____")
    print(" +      increase speed by 10%")
    print(" -      decrease speed by 10%")
    print(" 0-9    set speed (0% to 90%)")
    print(" f      full speed (100%)")
    print(" s      show current speed")
    print(" h      show this help")
    print("_____")
    print("Type a command and press Enter")
    print("_____")

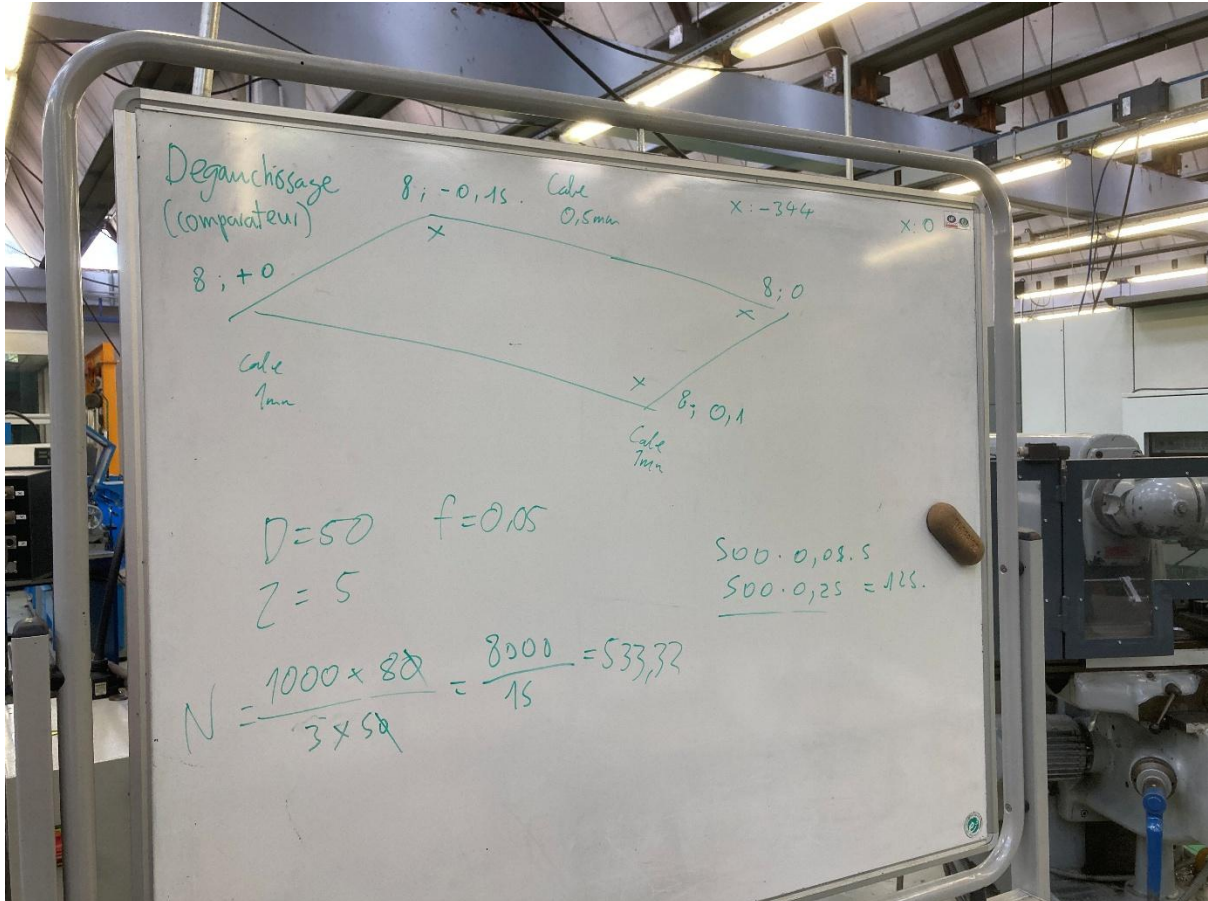
# — Step 5: Main loop —————
print_help()
set_speed(0)

```

```
try:
    while True:
        command = input("> ").strip().lower()

        if command == "+":
            set_speed(current_speed + 10)
        elif command == "-":
            set_speed(current_speed - 10)
        elif command == "f":
            set_speed(100)
        elif command == "s":
            print(f"Current speed: {current_speed}%")
        elif command == "h":
            print_help()
        elif command.isdigit():
            set_speed(int(command) * 10)
        else:
            print("Unknown command - type h for help")

except KeyboardInterrupt:
    print("Stopping fans...")
    fan.duty_u16(0)
    print("Done.")
```



4ème de couverture

Nom et Prénom du stagiaire : BIN MOHD ASHRAF Muhammad Afieq Aidan

Stage BUT : Génie Mécanique et Productique (GMP) — 2ème année

Nom entreprise : Institut des Sciences du Mouvement Etienne-Jules Marey (ISM, UMR7287)

Lieu du stage (Ville) : Aix-en-Provence

Tuteur industriel : M. Loïc TADRIST

Fonction : Enseignant-chercheur, Maître de Conférences, Aix-Marseille Université

Tuteur universitaire : M. JEANCELME Eric

Résumé du projet de stage :

Ce rapport présente le travail réalisé lors d'un stage de dix semaines au sein de l'équipe Systèmes Bio-Inspirés (SBI) de l'Institut des Sciences du Mouvement (ISM, UMR7287, Aix-Marseille Université / CNRS), dans le cadre d'un projet de recherche portant sur le rôle du flottement aéroélastique dans le bilan thermique des feuilles d'arbre.

L'objectif principal du stage était de concevoir et fabriquer une soufflerie de table à partir de ventilateurs d'ordinateur récupérés, destinée à servir de banc d'essai expérimental pour comparer le comportement thermique d'une feuille rigide et d'une feuille en flottement sous différentes conditions de vent. La soufflerie réalisée est composée de quatre modules démontables et modulaires : un convergent pyramidal tronqué équipé d'un conditionneur d'écoulement en plexiglas, une veine d'essai de section $\sim 198 \times 205 \text{ mm}$ à parois transparentes, une section ventilateurs regroupant quatre ventilateurs Foxconn PVA092K12N disposés en grille 2×2 , et un caisson de sortie. La vitesse d'air dans la veine d'essai, estimée théoriquement à environ 10 m/s, est pilotée par un microcontrôleur Raspberry Pi Pico programmé en MicroPython via l'environnement Thonny, et alimenté par une alimentation industrielle Mean Well LRS-150-12.

La soufflerie est désormais fonctionnelle et constitue la base expérimentale pour la suite du projet. Le protocole expérimental établi permettra à l'équipe de poursuivre la campagne de mesures thermiques sur les feuilles modèles.

Les mots clés : Soufflerie, flottement aéroélastique, bilan thermique, feuille d'arbre, biomécanique végétale, veine d'essai, conditionneur d'écoulement, Raspberry Pi Pico, MicroPython, fabrication mécanique, soudage MAG, plexiglas.

Logiciels utilisés : CATIA V5, Cura, Beam Studio, Thonny (MicroPython).

Nombre de pages du rapport : 36

Nombre de pages des annexes : 6