

## Rapport de stage de Fin d'Études

En vue de l'obtention du diplôme

# d'Ingénieur Généraliste de l'ECAM Rennes

Sous le thème :

---

**Conception, fabrication et évaluation d'un banc expérimental dédié à l'étude de la stratégie d'atterrissement des abeilles sur des fleurs mobiles**

---

*Écrit par :*

Mme Lina Le Guellec

*Sous la direction de :*

**Dr. Julien Serres** - Maître de conférences à AMU  
**Dr. Antoine Morice** - Maître de conférences à AMU

*Stage réalisé :*

à l'Institut des Sciences du Mouvement - Etienne-Jules  
Marey (UMR 7287)  
dans l'équipe Systèmes Bio-Inspirés (SBI)  
du 30 janvier 2023 au 28 juillet 2023

# 1 Remerciements

Je tiens à remercier mes tuteurs Dr. Julien Serres et Dr. Antoine Morice de m'avoir donné l'opportunité de travailler sur le projet "BeeDeckBot", d'avoir pris le temps de répondre à toutes mes questions, et d'avoir élargi ma culture scientifique.

Je remercie Jean-Marc Ingargiola et Léo Wurtz pour leur grand soutien technique, respectivement, en électronique et en mécanique.

Je remercie Gino Aubert de m'avoir assisté le premier mois de mon stage pour la fabrication de la chambre de vol.

Je remercie Philippe Cinzia Castaldo, apiculteur et Président d'APIS AMU, pour avoir entretenu la ruche et nourri les abeilles correctement afin qu'elles soient attirées par mes appâts pendant mes deux mois d'expérimentation.

Je remercie Dr. Nicolas Marchand du GIPSA-Lab à Grenoble et Dr. Franck Ruffier de l'équipe des Systèmes Bio-inspirés de m'avoir recruté en thèse à partir du 1er octobre 2023.

Je remercie aussi Dr. Franck Ruffier et Dr. Julien Serres d'avoir su valoriser mon travail en invitant des journalistes à me filmer pour un reportage télévisé sur France 5.

Je remercie toutes les personnes de l'équipe de Systèmes Bio-Inspirées pour les moments agréables passés ensemble.

Enfin, je tenais à remercier Pierre Giacomini, mon responsable de suivi pédagogique, d'avoir suivi le bon déroulement de mon stage avec bienveillance et de m'avoir rendu visite deux fois à mon laboratoire.

# Table des matières

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Remerciements</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Introduction</b>  | <b>5</b>  |
| <b>3</b> | <b>Le laboratoire de recherche de mon stage</b>  | <b>6</b>  |
| 3.1      | L’Institut des Sciences du Mouvement - Étienne-Jules Marey . . . . .                           | 6         |
| 3.2      | L’équipe Systèmes Bio-Inspirés (SBI) . . . . .   | 7         |
| <b>4</b> | <b>Contexte de ma mission</b>  | <b>8</b>  |
| 4.1      | Le projet de recherche . . . . .   | 8         |
| 4.2      | Ma mission dans le projet de recherche . . . . .   | 9         |
| 4.3      | Les ressources mises à ma disposition . . . . .  | 10        |
| <b>5</b> | <b>Ma démarche de résolution de problèmes</b>  | <b>11</b> |
| 5.1      | L’état de l’art sur l’atterrissement des abeilles . . . . .                                    | 11        |
| 5.2      | Le cahier des charges . . . . .  | 12        |
| 5.3      | Le plan d’action . . . . .   | 14        |
| <b>6</b> | <b>Le déroulé technique de ma mission</b>  | <b>16</b> |
| 6.1      | La chambre de vol . . . . .  | 16        |
| 6.2      | Le système RFID . . . . .  | 19        |
| 6.3      | La caméra . . . . .  | 20        |
| 6.4      | La fleur robotique . . . . .   | 20        |
| 6.5      | La structure métallique . . . . .  | 29        |
| 6.6      | Le relevé des données . . . . .  | 33        |
| 6.7      | Le traitement des données . . . . .  | 36        |
| <b>7</b> | <b>Retour d’expérience</b>   | <b>41</b> |
| <b>8</b> | <b>Conclusion</b>  | <b>43</b> |
| <b>9</b> | <b>Annexes</b>   | <b>46</b> |
| 9.1      | Diagramme de Gantt prévisionnel et réel. . . . .   | 46        |
| 9.2      | Photos du banc de test . . . . .   | 47        |
| 9.3      | Devis pour les éléments de montage de la chambre de vol et de la structure métallique. . . . . | 53        |

# Table des figures

|    |   |    |
|----|---|----|
| 1  | Organigramme de l’Institut des Sciences du Mouvement - Etienne-Jules Marey (CNRS/Aix Marseille Université, ISM UMR7287). . . . .  | 6  |
| 2  | Robot fourmi Antbot (a) inspirée de la fourmi <i>Cataglyphis fortis</i> (b). D’après [12]. . . . .  | 7  |
| 3  | Abeille qui se pose sur une fleur (a) et hélicoptère qui apponte sur un bateau (b). . . . .   | 8  |
| 4  | Chambre de vol (33x45x66cm) des travaux de Zhang et al. [3] (a), et système de captation 3D de la trajectoire de l’abeille des travaux de Srinivasan et al. [4] (b). . . . .  | 11 |
| 5  | Abeilles acceptant la cible statique (a) puis celle en mouvement (b). D’après [17]. . . . .   | 12 |
| 6  | Trajectoires horizontale (a) et verticale (d) des fleurs du laboratoire en fonction du temps. Histogrammes du nombre de fleurs en fonction de l’amplitude pour chaque axe (b et c) puis en fonction de la fréquence pour chaque axe (e) et (f). D’après [17]. . . . . | 13 |
| 7  | Maquette numérique de la chambre de vol (a et b) et chambre de vol réelle (c). . . . .  | 16 |
| 8  | Schémas de dimensionnement de la chambre de vol. . . . .  | 17 |
| 9  | Système RFID de chez microsensys en Allemagne. . . . .  | 19 |
| 10 | Caméra SONY RXO 500 images/secondes. . . . .  | 20 |
| 11 | Maquette numérique de ma fleur robotique (a) et découpeuse CNC (b). . . . .   | 21 |
| 12 | Schémas de la cible montante (a) et descendante (b). Maquette numérique de la partie légère de la fleur robotique (c). . . . .  | 22 |
| 13 | Système bielle manivelle (a). Maquettes numériques de la partie légère de la fleur robotique (b) et de la cible (c). Le système bielle-manivelle n’est pas adapté, car il ne permet pas de découpler les commandes d’amplitudes et de fréquences. . . . .             | 22 |
| 14 | Réducteur de couple de la fleur robotique (a) et mécanisme de tension de sa courroie (b). . . . .   | 23 |
| 15 | Servomoteur Dynamixel AX-12A. . . . .   | 24 |
| 16 | Puissance minimale requise au moteur de l’axe horizontal pour une fréquence de 3 Hz (a) et une fréquence de 0,5 Hz (b). Position de la cible en fonction du temps pour une fréquence de 3 Hz (c et d). . . . .  | 26 |
| 17 | Position réelle de la cible pour une amplitude de 10 cm et des fréquences de 0,2 Hz (bleu) 0,5 Hz (vert) 3 Hz (rouge). . . . .  | 27 |
| 18 | Circuit électronique de commande des 2 servomoteurs de la fleur robotique. . . . .  | 28 |
| 19 | Maquette numérique (a) et photo (b) du banc de test. . . . .  | 29 |
| 20 | Support de la chambre de vol. (a) Vue d’ensemble. (b) Vue détaillée. (c) Vue de dessus. (d) Vue de côté.(b) En bleu : les profilés qui bloquent la translation réglable du bloc de profilés numérotés en rouge. . . . .   | 30 |

|    |   |    |
|----|---|----|
| 21 | L'ensemble { robot + chambre de vol + caméra } en translation sur le chariot. La translation assure une répartition égale du poids sur les 4 roues du chariot. Elle est totalement bloquée pour les expérimentations. . . . .                   | 31 |
| 22 | (a) Le pied rétractable et le système de tige filetée de l'about du pied.(b) La fleur robotique qui translate. Lors de la maintenance des moteurs, la fleur robotique peut descendre en coulissant sur les quatre profilés verticaux.           | 32 |
| 23 | Abeilles butinant sur la cible. . . . .   | 33 |
| 24 | <a href="#">Extrait de films des abeilles se posant sur la cible.</a> . . . . .   | 34 |
| 25 | Banc de test lors d'une expérimentation dans le hall extérieur. . . . .   | 34 |
| 26 | Abeilles qui butinent sur le grand abreuvoir. . . . .   | 35 |
| 27 | Méthode pour apprendre aux abeilles à entrer dans la chambre de vol. . . . .  | 36 |
| 28 | Différentes étapes de transformations pour mettre en valeur l'abeille. . . . .  | 37 |
| 29 | Reconstitution de la trajectoire 3D de l'abeille avec la méthode de sous-traction de l'arrière-plan et de DeepSort. . . . .   | 39 |
| 30 | Vues planes des trajectoires 3D. . . . .  | 40 |
| 31 | Diagramme de Gantt prévisionnel. . . . .  | 46 |
| 32 | Diagramme de Gantt réel. . . . .  | 46 |
| 33 | Intérieur du moteur Dynamixel (a). Arbre du moteur cassé par des contraintes de torsions importantes (b et c). . . . .  | 47 |
| 34 | Câblage électronique réel du banc de test. . . . .  | 48 |
| 35 | Cible de différentes tailles (a). Filtre rouge de la caméra (b). . . . .  | 48 |
| 36 | Vue de l'intérieur du banc de test. (a) Vue de face. (b) Vue de côté. (c) Vue de dessous. . . . .   | 49 |
| 37 | Partie légère de la fleur robotique (a). Partie lourde de la fleur robotique (b).   | 50 |
| 38 | Chambre de vol vue de côté. . . . .   | 50 |
| 39 | Simulation de la force (a), puissance (b), vitesse de rotation (c) et couple (d) minimal(e) requis(e) au moteur de la partie légère de la fleur robotique sans le réducteur de couple pour $f = 3 \text{ Hz}$ et $A = 10 \text{ cm}$ . . . . .  | 51 |
| 40 | Simulation de la force (a), puissance (b), vitesse de rotation (c) et couple (d) minimal(e) requis(e) au moteur de la partie légère de la fleur robotique avec le réducteur de couple pour $f = 3 \text{ Hz}$ et $A = 10 \text{ cm}$ . . . . .  | 51 |
| 41 | Simulation de la force (a), puissance (b), vitesse de rotation (c) et couple (d) minimal(e) requis(e) au moteur de la partie légère de la fleur robotique avec le réducteur de couple pour $f = 2.5 \text{ Hz}$ et $A = 7 \text{ cm}$ . . . . . | 52 |

## 2 Introduction

Future ingénierie généraliste de l'ECAM Rennes et diplômée d'une maîtrise en génie mécanique de l'Université de Sherbrooke (Uds) au Québec, j'ai réalisé mon stage de fin d'études de six mois (février-juillet 2023) dans un institut de recherche d'Aix Marseille Université, l'Institut des Sciences du Mouvement (ISM) - Etienne-Jules Marey (CNRS/Aix Marseille Université, ISM UMR7287) dans l'équipe Systèmes Bio-Inspirée (SBI), situé à Marseille.

Lors de l'élaboration de mon plan de carrière, «la Bio-robotique», cette discipline qui consiste à s'inspirer des animaux pour réaliser des robots m'est apparue comme celle qui concilie le mieux mes passions que sont : la robotique, la mécanique, les animaux et l'aéronautique.

Mon projet de fin d'études universitaires à l'UdS, dans l'équipe de recherche CREATEK de l'Institut Interdisciplinaire d'Innovation technologique (3IT) m'a motivée pour renouveler une expérience professionnelle dans un laboratoire de recherche. J'ai donc choisi de réaliser mon stage de fin d'études d'ingénieur généraliste dans la seule équipe de recherche en France consacrée à la bio-robotique capable de réaliser à la fois des expériences animales et robotiques.

J'ai occupé le poste de stagiaire en ingénierie de recherche en mécanique. Ma mission était de construire un banc de test permettant de filmer à très haute vitesse la trajectoire des abeilles atterrissant sur une fleur robotique mobile.

Dès l'envoi de ma candidature spontanée à mon actuel encadrant, monsieur Serres, je voulais :

- Réaliser un projet qui ait du sens pour moi.
- Approfondir mes compétences acquises à l'ECAM en réalisant entièrement un projet pratique.
- Accomplir une mission pluridisciplinaire (informatique, mécanique ...).
- Comprendre le fonctionnement d'un laboratoire de recherche français.
- Commencer à me constituer un réseau professionnel solide en France en vue d'une éventuelle poursuite en thèse, toujours en robotique bio-inspirée.

Par la suite, je vais vous présenter dans ce rapport :

1. L'organisation, le fonctionnement et les enjeux de l'ISM et de l'équipe SBI.
2. Le contexte de ma mission et dans quel projet de recherche elle s'inscrit.
3. Mes stratégies de résolution de problèmes et méthodes d'organisation.
4. Le déroulé technique de ma mission : j'ai choisi dans cette partie de regrouper les tâches effectuées en mini missions plutôt que dans l'ordre chronologique. Je présenterai et analyserai les principaux résultats obtenus pour chacune d'entre elles, je ferai un retour sur les points fort et les points à améliorer et justifierai les principaux choix de conception.
5. Mes nouvelles connaissances techniques et mes relations humaines.

### 3 Le laboratoire de recherche de mon stage

#### 3.1 L’Institut des Sciences du Mouvement - Étienne-Jules Marey

L’Institut des Sciences du Mouvement - Étienne-Jules Marey, ou ISM, est une unité mixte de recherche (UMR 7287), sous la tutelle à la fois d’Aix Marseille Université (AMU) et du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS). Ce dernier est rattaché à l’ISM principalement par l’Institut des Sciences Biologiques (INSB), mais aussi par trois autres instituts, dits secondaires : l’Institut des Sciences de l’Ingénierie et des Systèmes (INSIS), l’Institut des Sciences Informatiques et des leurs Interactions (INS2I) et l’Institut des Sciences Humaines et Sociales (INSHS).

Cet établissement a pour objet de recherche le Mouvement, et son objectif est son étude sous tous les angles possibles. On y pratique donc des sciences très variées, notamment les neurosciences, la robotique, la physiologie, la biomécanique, mais aussi la psychologie et la sociologie. L’interdisciplinarité est ici une thématique forte de cet institut, et les différentes approches sont mises en relation afin d’obtenir une vision globale et la plus complète possible de la production du mouvement.

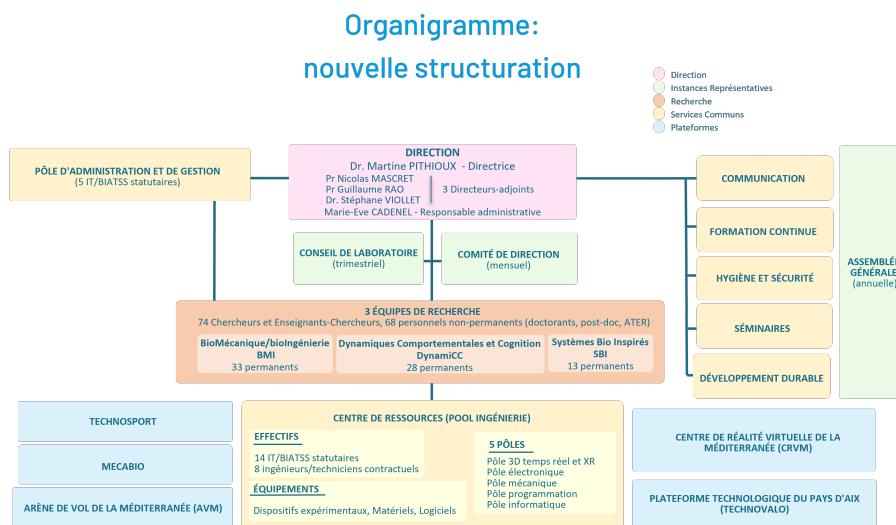


FIGURE 1 – Organigramme de l’Institut des Sciences du Mouvement - Etienne-Jules Marey (CNRS/Aix Marseille Université, ISM UMR7287).

L’organigramme de l’ISM est représenté sur la figure 1. La refonte de sa structuration date du 1er janvier 2023. L’ISM est divisé en plusieurs sites, tous appartenant à l’AMU : le campus Luminy, l’hôpital Sainte-Marguerite, l’hôpital de la Timone et le site de l’Institut Universitaire Technologique d’Aix-en-Provence. Ses chercheurs sont répartis en trois équipes, chacune se focalisant sur deux axes. On trouve l’équipe Biomécanique Bioingénierie - BMI - (axes Biomécanologie et Biomécanique Intégrative), l’équipe Dynamiques Comportementales et Cognition - DynamiCC - (axes Processus Sensorimoteurs, Perceptifs et Psychologiques et Contexte, Adaptation, Intervention), et enfin l’équipe Systèmes Bio-Inspirés - SBI - (axes Biorobotique et Mécanismes bio-inspirée). Grâce à la pluridisciplinarité de ses activités, l’établissement possède de multiples partenariats avec des entreprises variées telles qu’Airbus Helicopters, AG2R, Safran, Thales, Nike, et Stellantis, mais également d’autres agences nationales comme l’Agence Innovation Défense (AID) dont dépend la Direction Générale de l’Armement (DGA). Il dispose également d’un budget de fonctionnement récurrent accordé par ces tutelles scientifiques (AMU 50 % et le CNRS 50 %) d’environ 380 000 € par an pour un effectif total de 170 personnels com-

tenant les permanents et les non-permanents. Cette somme ne représente qu'une infime partie des crédits utilisés par l'ISM, car la recherche se finance aujourd'hui sur contrats de recherche, ce qui représente chaque année plusieurs millions d'euros. Enfin, l'ISM est doté de plateformes technologiques de pointe, dont, par exemple, une arène de vol et un centre de réalité virtuelle, permettant d'une part la réalisation personnalisée et poussée de pièces et de biomatériaux, et d'autre part des mesures extrêmement précises de comportements, en travaillant avec tous types de participants allant du sportif de haut niveau aux personnes âgées, ou bien encore les personnes handicapées. Mon tuteur de stage, Julien Serres, est le responsable de l'axe Biorobotique au sein de l'équipe Systèmes Bio-Inspirés (SBI).

### 3.2 L'équipe Systèmes Bio-Inspirés (SBI)

L'équipe SBI modélise le mouvement de façon bio-inspirée. Elle s'inspire des mécanismes de perception et d'action des animaux, optimisés depuis des milliards d'années par la nature, pour fabriquer des robots innovants. Ces derniers sont aussi utilisés pour comprendre en retour comment les insectes naviguent. L'équipe SBI s'inspire, par exemple, de la fourmi du désert *Cataglyphis fortis*, capable de s'orienter précisément de jour comme de nuit avec uniquement les données du soleil, pour fabriquer des véhicules autonomes nageant sans GPS (Fig. 2). Elle s'inspire aussi des abeilles, capables de stabiliser leur vol et de s'orienter uniquement à l'aide de données visuelles et sans accéléromètre, pour fabriquer des contrôleurs de drones innovants. Ces prototypes permettent de déposer de nombreux brevets d'invention, non seulement en partenariat avec les industriels, mais aussi en pleine propriété via la [Société de Transfert de Technologie Sud-Est](#) (SATT Sud-Est).

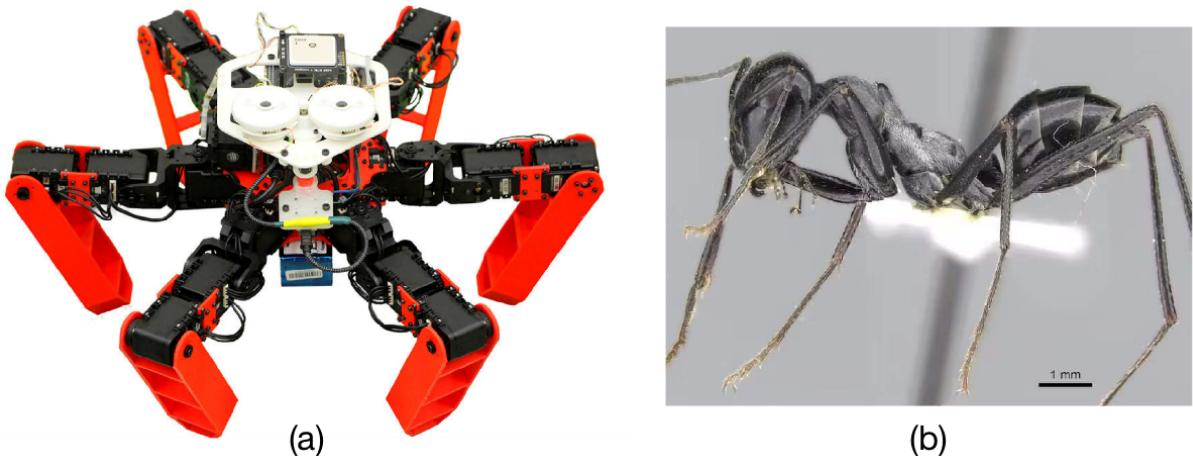


FIGURE 2 – Robot fourmi Antbot (a) inspirée de la fourmi *Cataglyphis fortis* (b). D'après [12].

## 4 Contexte de ma mission

### 4.1 Le projet de recherche

L'objectif du projet de recherche de mon stage est d'apporter des éléments de réponse à la problématique suivante : comment une abeille est-elle capable d'atterrir rapidement avec une grande précision sur une fleur qui a un mouvement assez ample et imprévisible ? Les chercheurs de mon équipe s'intéressent uniquement aux stratégies visuelles que les abeilles utilisent pour atterrir sur une fleur. Ils ont aussi choisi de se concentrer en particulier sur la visualisation de la trajectoire 3D relative entre l'abeille et la fleur.

Les chercheurs de mon équipe souhaiteraient exploiter le concept d'affordance (du verbe anglais *afford* ou s'offrir/se permettre) introduit par James J. Gibson en 1977 [1] et largement développé depuis. Ce néologisme traduit *les possibilités d'actions offertes par l'environnement compte tenu des potentialités de l'acteur*. Ainsi, l'hypothèse directrice de ce projet de recherche postule que des pilotes d'hélicoptère appontant sur une frégate secouée par les flots et des abeilles atterrissant sur une fleur ballottée par le vent décideraient si l'atterrissement est possible et réguleraient leur descente grâce à la perception d'une affordance d'*atterrabilité* spécifiant leurs possibilités de se poser sur leur cible sans s'écraser grâce à une calibration de leur perception par rapport aux limites de portance de l'hélicoptère ou de l'abeille.

En effet, les modèles de comportement basés sur les affordances [7] se sont relevés pertinents pour expliquer non seulement la prise de décision, mais aussi la régulation visuelle dans un grand nombre de contextes. Récemment, les modèles basés sur les affordances ont permis de démontrer que les humains étaient capables de percevoir l'*attrapabilité* d'une cible en mouvement [13]. Ces modèles s'appliquent également à la conduite d'engins motorisés. En automobile, la décision de freiner et la quantité de freinage seraient contrôlées en calibrant la décélération requise pour arrêter le véhicule avant la collision avec l'obstacle en fonction de la décélération maximum du véhicule [6]. La portée de ces modèles a d'ailleurs été étendue par nos équipes au dépassement automobile [8][10], à la traversée d'intersection [9], et à l'*atterrabilité* sur le pont d'un navire [15, 14, 18].



(a)



(b)

FIGURE 3 – Abeille qui se pose sur une fleur (a) et hélicoptère qui apposte sur un bateau (b).

Mon équipe de recherche s'inspire des stratégies d'appontage des abeilles sur les fleurs mises en mouvement par le vent pour bientôt permettre aux véhicules aériens de se poser plus efficacement et de façon plus sécuritaire sur des cibles statiques ou en mouvement (Fig. 3). Dans le cas où ces stratégies d'appontage seraient moins efficaces que les stratégies actuelles, elles seront utilisées comme stratégie de secours, car, comme une abeille,

et contrairement à toutes les méthodes modernes, elles ont l'avantage de n'utiliser aucun moyen de communication entre la cible (bateau en mouvement, piste d'atterrissement ...) et le véhicule (hélicoptère, drone ...). Ces stratégies d'appontage innovantes, basées uniquement sur l'analyse visuelle de la cible par le véhicule aérien, pourront devenir essentielles dans le cas où, par exemple, une attaque pendant une guerre supprimerait ou usurperait les signaux de communication entre un bateau et un hélicoptère. Ces stratégies pourraient aussi rendre totalement autonome l'appontage tout en étant référencée vision. Elles pourraient aussi être utilisées comme assistance visuelle dans un véhicule piloté manuellement. Il serait alors possible de les utiliser pour enrichir l'environnement perceptif du pilote avec des stimuli qui orientent son attention sur des endroits pertinents. C'est-à-dire, pour faire remarquer au pilote des éléments pertinents de la scène visuelle et ainsi le faire réagir plus intelligemment et plus rapidement dans le contexte d'une tâche bien précise (ici l'appontage). Ces augmentations visuelles seraient des variables optiques, issues du flux optique, que le pilote percevrait de manière consciente et inconsciente pour optimiser ses performances de guidage.

Les chercheurs de mon équipe prévoient d'étudier la trajectoire d'abeilles qui se posent sur une cible en mouvement. Ils prévoient, en particulier, de comprendre l'effet qu'un mouvement brusque et imprévisible de la cible peut avoir sur la trajectoire des abeilles. Ils prévoient aussi d'étudier l'influence de la taille de la cible sur la trajectoire des abeilles en faisant atterrir celles-ci sur des cibles de tailles différentes. Les abeilles seront filmées à 500 images par seconde.

Des recherches portent déjà sur l'atterrissement des abeilles sur une cible en mouvement (voir partie 5.1, état de l'art), mais notre projet reste très innovant car :

- Les abeilles sont filmées à très haute vitesse (500 images par seconde contre 24 images par secondes pour les travaux antérieurs).
- La cible se déplace verticalement et horizontalement (les travaux antérieurs ne mettent en mouvement la cible que sur un plan horizontal).

## 4.2 Ma mission dans le projet de recherche

Actuellement, le projet de recherche de mon stage est à son commencement. Ma mission a donc été de concevoir et de construire entièrement le banc de test expérimental qui servira à la visualisation de la trajectoire 3D d'abeilles qui se poseront sur une fleur en mouvement.

Il m'a été demandé en particulier de :

- Construire un robot qui reproduit certaines caractéristiques visuelles d'une fleur qu'une abeille peut percevoir. En particulier la taille, la couleur et le mouvement.
- Extraire la trajectoire 3D de l'abeille et de la fleur robotique.
- Réaliser une première série d'expérimentations en présence d'abeilles pour valider le bon fonctionnement de ma construction et quantifier ses performances et ses limites.

En regardant mes résultats de fin de stage, mes encadrants et moi-même sommes certains que ma construction sera l'outil de base pour entamer une thèse de doctorant réalisée par un entomologiste sur trois ans.

## 4.3 Les ressources mises à ma disposition

### 4.3.1 Les ressources humaines

J'ai disposé d'un encadrant principal Dr. [Julien Serres](#) et d'un co-encadrant Dr. [Antoine Morice](#). Tous les deux sont maîtres de conférences à Aix Marseille Université. J'avais une réunion d'une heure toutes les semaines avec mes deux encadrants durant les trois premiers mois de mon stage. Ces fréquentes rencontres ont été prévues pour s'assurer que j'avais bien compris les attentes et faire en sorte que mon plan d'action soit le plus efficient possible en le réactualisant à chaque fois. Les trois mois suivants, les réunions étaient toutes les deux semaines. À chaque réunion, je présentais un diaporama avec mes résultats (calculs, vidéos) et mes questions. Les encadrants me faisaient un retour sur la qualité de mon travail. Leur critère principal de satisfaction était le résultat final : mes constructions et mes algorithmes devaient fonctionner, satisfaire le maximum de requis du cahier des charges. À chaque fin de petite mission (tous les mois et demi environ), je faisais une démonstration concrète de mes constructions. Dr. [Franck Ruffier](#) suivait aussi mon travail, et me prodiguait quelques conseils. Dr. Ruffier est directeur de recherche au CNRS. Il fabrique et teste des contrôleurs de robots aériens miniatures inspirées de la vision des insectes qui se basent uniquement sur les informations visuelles de leur environnement.

Pendant tout mon stage, j'ai pu demander de l'aide à mes deux encadrants par mél ou en allant les voir dans leur bureau. Ils se sont toujours montrés très disponibles et me fournissaient de l'aide dans la journée à ma demande. Le rôle de mes encadrants était de me donner des conseils sur les décisions les plus importantes à prendre ainsi que sur la façon de piloter la globalité du projet. Ils validaient (ou non) mes maquettes numériques et calculs, achetaient le matériel pour la construction, après avoir pris le temps de discuter de mes choix de conception. Pour toutes les missions, ils tenaient à ce que ce soit moi qui initie les idées, et pas eux qui me livrent les solutions. Pour les problèmes techniques du quotidien, j'ai surtout demandé aux ingénieurs du laboratoire spécialistes en électronique (Jean-Marc Ingargiola) et mécanique (Léo Wurtz).

### 4.3.2 Les ressources matérielles

Le laboratoire dispose :

- d'un atelier de prototypage rapide avec en particulier des imprimantes 3D, une découpeuse laser, du matériel consommable (visserie...),
- d'un atelier de mécanique avec des perceuses à colonne, des tours, une machine Charly,
- d'un atelier d'électronique avec un fer à souder, des oscilloscopes, des cartes électroniques,
- d'équipements de protection individuels,
- d'une ruche d'abeilles d'élevage située à 63 m de mon lieu d'expérimentation,
- de tout le matériel nécessaire pour se protéger des abeilles et pour les attirer sur le lieu d'expérimentation,
- d'une cuisine et d'une salle de pause.

Je disposais aussi :

- d'une porte RFID,
- d'une caméra capable de filmer à 500 images par seconde,
- d'objectifs de différentes distances focales à fixer sur la caméra,

- d'un chariot de manutention capable de supporter 200 kg.

J'ai utilisé SolidWorks pour les maquettes numériques, Arduino pour contrôler les moteurs, MATLAB pour les simulations numériques de dimensionnement mécanique et Python pour le traitement des vidéos.

## 5 Ma démarche de résolution de problèmes

J'ai consacré les deux premières semaines de mon stage à constituer l'état de l'art, un cahier des charges et un plan d'action de mes six mois de travail. Je n'ai pas réalisé ces trois tâches l'une après l'autre. L'avancement d'une d'entre elles me permettait de débloquer ou de modifier progressivement les deux autres. En effet, contrairement à une entreprise, le cahier des charges d'un projet de recherche est en constante évolution. Les modifications du cahier des charges impliquent forcément une révision du plan d'action.

### 5.1 L'état de l'art sur l'atterrissement des abeilles

De façon très semblable à mon projet de recherche, Zhang et al. [3] ont déjà travaillé en 1990 sur la captation de la position 3D d'abeilles se posant sur une fleur en mouvement (Fig. 4a). Ils ont aussi étudié l'influence que la couleur de la cible et du fond a sur l'atterrissement des abeilles. Pour filmer la position 3D de l'abeille avec une unique caméra, ils ont utilisé une boîte transparente avec un miroir à  $45^\circ$  afin de voir sur la vitre de la face avant à la fois une vue du dessus (en haut de la vitre) et une vue de côté (en bas de la vitre). Pour mettre en mouvement la cible (3,4 cm de diamètre), ils ont placé sous la boîte un système mécanique avec un aimant à son extrémité. Ils ont ainsi évité de trouver la boîte et de perdre les abeilles. Pour certaines expérimentations, la cible bougeait selon l'axe X à une fréquence allant de 0,5 Hz à 1 Hz et une amplitude de 10 cm.

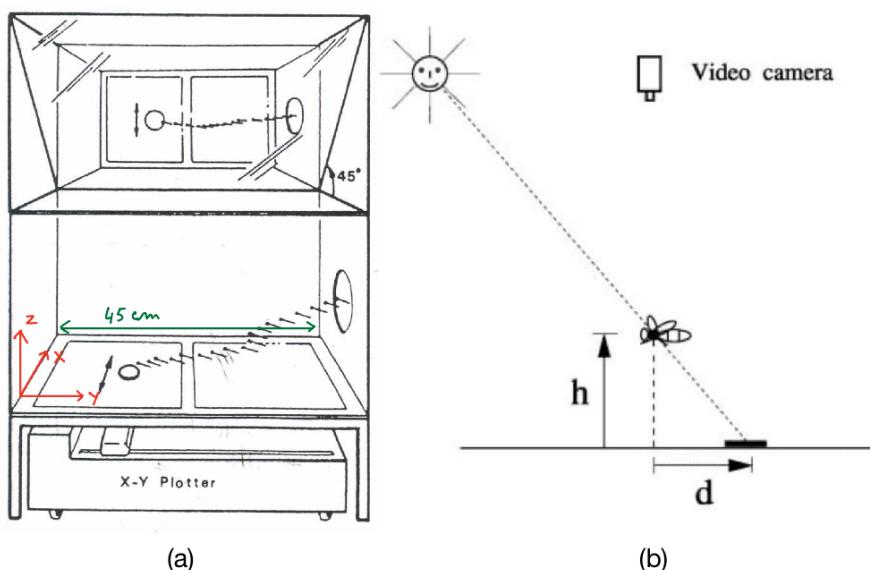


FIGURE 4 – Chambre de vol (33x45x66cm) des travaux de Zhang et al. [3] (a), et système de captation 3D de la trajectoire de l'abeille des travaux de Srinivasan et al. [4] (b).

En 2000, Srinivasan et al. [4] ont étudié l'atterrissement d'abeilles sur une surface plane avec une cible immobile. Ils avaient mis en place un système de captation 3D de la position de l'abeille avec une unique caméra. Ils placèrent la caméra au-dessus du plan d'atterrissement.

La hauteur de l'abeille à chaque instant était calculée avec la position du soleil et la distance entre l'abeille et son ombre (Fig. 4b). Srinivasan et al. [4] démontrent, avec cette méthode de captation, que l'angle d'atterrissement d'une abeille se situe toujours entre  $22^\circ$  et  $41^\circ$ . En faisant varier la couleur des cibles, ils ont aussi démontré que parmi les cibles ayant une couleur visible par l'Homme, les plus attractives pour les abeilles avaient un contraste optique bleu-vert. Les couleurs que peuvent voir à la fois les humains et les abeilles sont donc principalement le vert et le bleu.



FIGURE 5 – Abeilles acceptant la cible statique (a) puis celle en mouvement (b). D'après [17].

Damien Rambeau, un précédent stagiaire de monsieur Serres, a réalisé une étude de faisabilité de mon sujet de stage [17]. Il a travaillé avec des cibles de 5, 7,5 et 10 cm de diamètre ayant chacune pour motif des cercles concentriques vert et bleu (Fig. 5). Ce choix réfléchi s'explique par les travaux antérieurs (voir partie 5.1, état de l'art) nous apprenant qu'une abeille voit surtout les contrastes optiques vert-bleu. Ces deux couleurs sont présentes en même temps sur chaque cible, car, comme l'Homme, l'abeille ne perçoit pas une couleur, mais uniquement un contraste, c'est-à-dire dire une différence de couleurs appartenant à son spectre de vision. L'abeille perçoit donc ici le contraste entre les cercles vert et bleu. Il a validé expérimentalement que les tailles et couleurs de cibles choisies attiraient bien les abeilles du laboratoire (Fig. 5). Il a aussi validé que les abeilles acceptaient de se poser sur ces cibles mises en mouvement par une structure mécanique volumineuse (Fig. 5). Il a déterminé des premiers requis chiffrés pour la fleur robotique en filmant différentes familles de fleurs du laboratoire. Il a d'abord relevé les profils de déplacements (Fig. 6) et a constaté qu'une fleur fait un mouvement plan (de haut en bas et de gauche à droite) et ne fait pas de rotations. Il a aussi remarqué que le profil de déplacement des fleurs est semblable à des sinusoïdes. Il a ensuite déterminé à quelles fréquences et amplitudes oscillaient chaque fleur (Fig. 6). Avec les résultats des histogrammes et le constat que les fleurs oscillantes à basses amplitudes oscillaient uniquement à haute fréquence et inversement. Il a ainsi posé les limites de fonctionnement de la fleur mécanique :

- Un déplacement possible à l'horizontale et à la verticale.
- Un intervalle de fréquences de 0 à 3 Hz pour les deux axes.
- Un intervalle d'amplitudes de 0 à 3 cm pour l'axe vertical.
- Un intervalle d'amplitudes de 0 à 10 cm pour l'axe horizontal.

## 5.2 Le cahier des charges

Contrairement à une entreprise, dans un laboratoire de recherche, il n'est pas possible de fournir un cahier des charges complet et chiffré dès le début de la construction d'un

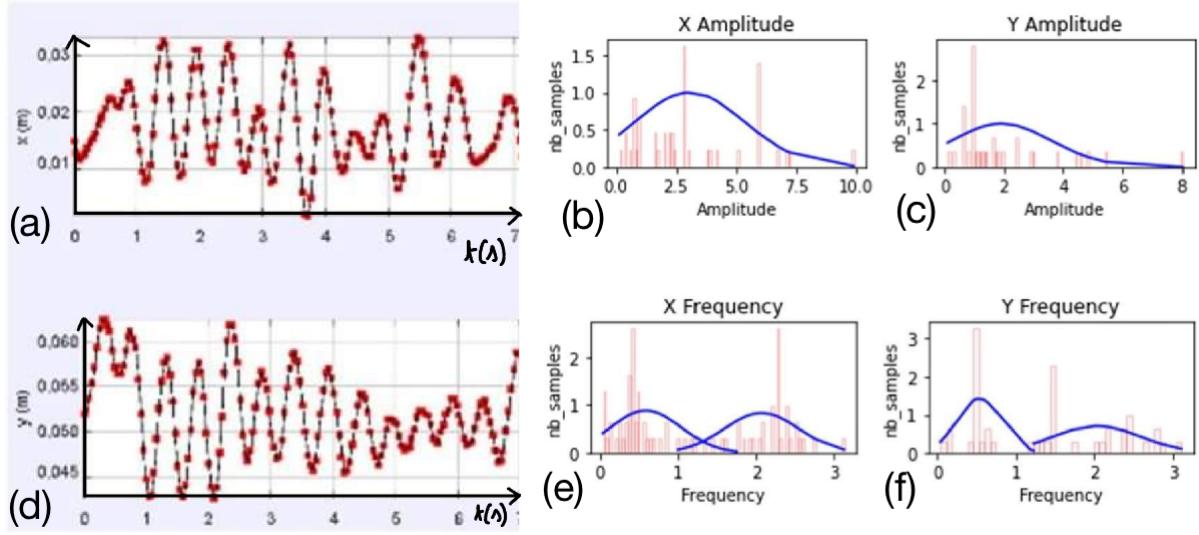


FIGURE 6 – Trajectoires horizontale (a) et verticale (d) des fleurs du laboratoire en fonction du temps. Histogrammes du nombre de fleurs en fonction de l'amplitude pour chaque axe (b et c) puis en fonction de la fréquence pour chaque axe (e) et (f). D'après [17].

banc de test. Le cahier des charges évolue tout au long de la construction, puis au cours des expérimentations. En effet, les bancs de tests sont construits, pour des expériences dont on ne connaît pas encore les résultats. Par exemple, on ne connaît pas exactement les valeurs numériques des grandeurs physiques que l'on souhaite mesurer. Il est donc difficile d'attribuer dès le début une valeur à la précision d'un capteur ou d'un actionneur. Par contre, il est possible de s'inspirer de bancs de test déjà utilisés pour des expériences semblables aux nôtres et de les modifier légèrement pour satisfaire nos propres contraintes. Le prototype développé ainsi aidera à remplir un cahier des charges pour une deuxième version du banc de test. De cette façon, je me suis inspiré de l'état de l'art, et des travaux de l'équipe SBI pour d'abord choisir des solutions techniques :

- Comme les travaux de Zhang et al. [3] la captation de la position 3D des abeilles sera réalisée avec une chambre de vol close et transparente avec un miroir à 45°.
- Contrairement aux travaux de Zhang et al. [3], ma cible ne sera pas mise en mouvement par l'intermédiaire d'un aimant, car celui-ci génère des champs électromagnétiques que perçoit l'abeille [11]. Le sens visuel de l'abeille ne serait pas alors le seul stimulé. Il est préférable d'éviter de stimuler magnétiquement l'abeille, car la perception du champ magnétique par l'abeille fait encore débat au sein de la communauté scientifique.
- Comme les travaux de Srinivasan et al. [4], ma chambre de vol donnera à l'abeille un angle d'atterrissement entre 22° et 41°, quelle que soit la position de la fleur.
- Les travaux de Damien Rambeau [17] donnent directement les contraintes suivantes sur la cible :
  - existe en 3 diamètres : 5 cm/7,5 cm/10 cm.
  - est couverte de cercles concentriques bleu et vert.
  - à un mouvement de translation sinusoïdal selon 2 axes.
  - à un intervalle d'amplitude de l'axe vertical :  $0 \text{ cm} < A < 3 \text{ cm}$ .
  - à un intervalle d'amplitude de l'axe horizontal :  $0 \text{ cm} < A < 10 \text{ cm}$ .
  - à un intervalle de fréquence selon les 2 axes :  $0 < F < 3 \text{ Hz}$ .

Pour construire le cahier des charges, il est aussi possible de procéder par itérations. On peut d'abord poser un cahier des charges qui donne de très fortes exigences sur un aspect uniquement. Par exemple, construire un premier banc de test qui fait des mesures beaucoup plus précises que ce que l'on pense nécessaire, mais qui n'a aucune exigence sur la fatigabilité. On attribue des ordres de grandeur aux premières mesures prises par ce prototype. Il est maintenant possible de réaliser un nouveau prototype avec une exigence de précision moindre et de nouvelles contraintes sur la fatigabilité. J'ai utilisé cette seconde méthode pour donner un premier ordre de grandeur à la précision nécessaire des oscillations de la cible : 1 mm sur les 2 axes. Soit environ un dixième de la taille d'une abeille. Les premières trajectoires d'abeilles m'indiqueront si ce niveau d'exigence est pertinent. Les contraintes du laboratoire ont ajouté les exigences suivantes :

- Le banc de test est facilement transportable sur le chariot de manutention fourni.
- Les achats supplémentaires (hors matériel déjà à ma disposition) doivent être inférieurs à 1000 €.
- Les expériences sont répétables à la fois au cours de la mesure d'une trajectoire et entre chaque mesure.

### 5.3 Le plan d'action

Dès la 2<sup>e</sup> semaine de mon stage, j'ai constitué un premier plan d'action (voir diagramme de Gantt prévisionnel, Fig. 31 en annexe) :

- Le premier mois :
  - Concevoir et fabriquer une chambre de vol transparente.
  - Choisir l'objectif à placer sur la caméra.
  - Mettre en place d'un système de reconnaissance visuel et de suivi de la trajectoire des abeilles dans la chambre de vol.
- Les 2 mois suivants :
  - Concevoir et fabriquer la fleur robotique.
- Les 2 mois suivants :
  - Concevoir et fabriquer la structure unissant la chambre de vol, la fleur, le chariot et la caméra.
- Le dernier mois :
  - Installer un système d'identification des abeilles entrantes dans la chambre de vol.
  - Entraîner les abeilles à se poser sur la cible.

J'ai commencé par la conception et la fabrication de la chambre de vol, car, en février 2023, un stagiaire en ergonomie de Mr. Serres avait pour mission de découvrir la fabrication (imprimante 3D, découpeuse laser) à travers la fabrication de ma chambre de vol. C'est pour cette raison que j'ai choisie, dès le début de mon stage, de fabriquer la chambre de vol. Ainsi, j'ai pu utiliser les compétences acquises lors de ma première mission pour le reste de mes constructions plus importantes. Étant donné les délais importants (deux semaines) des pièces mécaniques commandées suite à la conception, j'ai prévu dès le début de séparer les temps de conception mécanique et de fabrication par des périodes de travail uniquement sur l'ordinateur. J'ai donc, après la conception de la chambre de vol, prévu de tester la caméra et de développer les algorithmes de suivi de trajectoire. Sachant que les

abeilles ne sortent qu'à une température supérieure à 14°C, j'ai planifié leur entraînement à la fin du stage. Voici la chronologie réelle de l'accomplissement de ma mission (voir diagramme de Gantt réel, Fig. 32 en annexe) :

- Le premier mois :
  - Conception de la chambre de vol.
  - Choix de l'objectif de la caméra.
  - Développement de premiers algorithmes de suivi de la trajectoire.
  - Construction de la chambre de vol.
- Les 2 mois suivants :
  - Construction et conception du prototype de la fleur robotique.
- Le mois suivant :
  - Conception de la structure qui unit la fleur robotique, la chambre de vol, le chariot et la caméra.
  - Construction de la fleur robotique finale et de la structure.
- Le mois suivant :
  - Mise en place du système d'identification des abeilles.
  - Entraînement des abeilles.
- Le dernier mois :
  - Première prise de mesures expérimentales.
  - Amélioration de la structure mécanique.
  - Amélioration des algorithmes de suivi de la trajectoire.

## 6 Le déroulé technique de ma mission

### 6.1 La chambre de vol

#### 6.1.1 Cahier des charges

La chambre de vol (Fig. 7) :

- Permet d'observer toute la trajectoire de l'abeille.
  - Laisse au moins 17,5 cm de débattement à l'abeille dans toutes les directions autour de la fleur.
- Contrôle le flux d'abeilles entrant et sortant.
  - Laisse passer par l'entrée une unique abeille.
  - Fait sortir cette abeille avant l'entrée de la suivante.
  - Identifie quelle abeille rentre et sort et à quel moment.
- Reproduit les conditions d'appontage naturelles de l'abeille sur la fleur.
  - Est transparente.
  - Respecte l'angle de descente naturel de l'abeille sur la fleur : entre  $22^\circ$  et  $41^\circ$ .
- Est suffisamment légère pour être soutenue par le chariot.
- Est assez solide.
  - Résiste aux vibrations dues au transport sur le chariot sur un sol en extérieur, 2 fois par jour pendant 3 étés.
- Est facile à entretenir.
  - Est facilement nettoyable.
  - Est facilement démontable.
- Stimule uniquement le sens visuel de l'abeille.

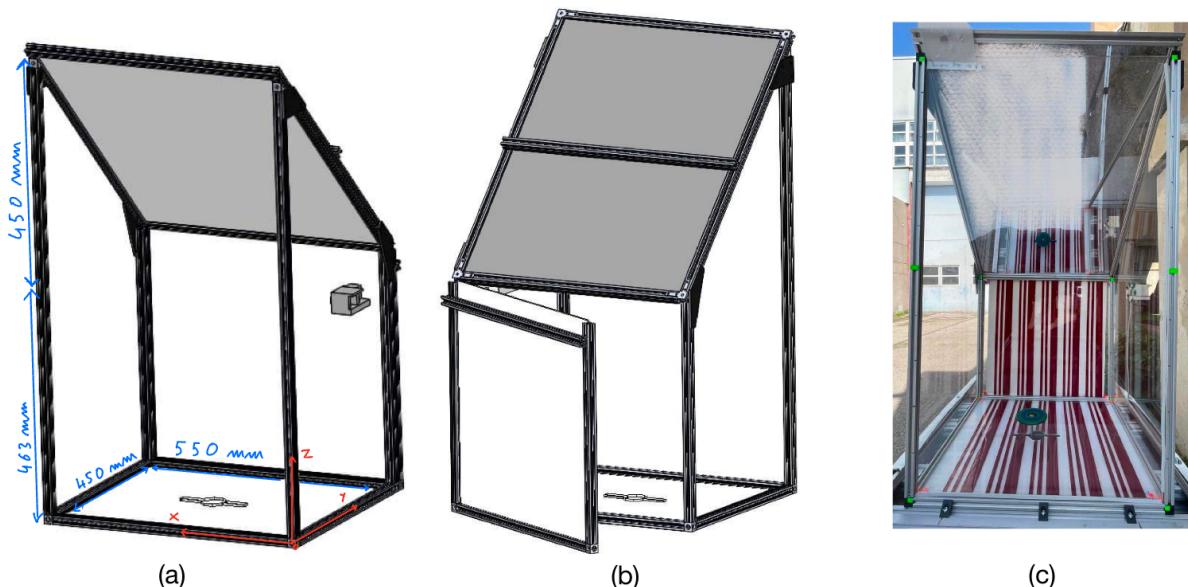


FIGURE 7 – Maquette numérique de la chambre de vol (a et b) et chambre de vol réelle (c).

La chambre de vol définit un volume de contrôle dans lequel on peut visualiser en 3D de façon répétable, au travers de la face avant, une unique abeille qui se pose sur la cible.

### 6.1.2 Dimensions géométriques

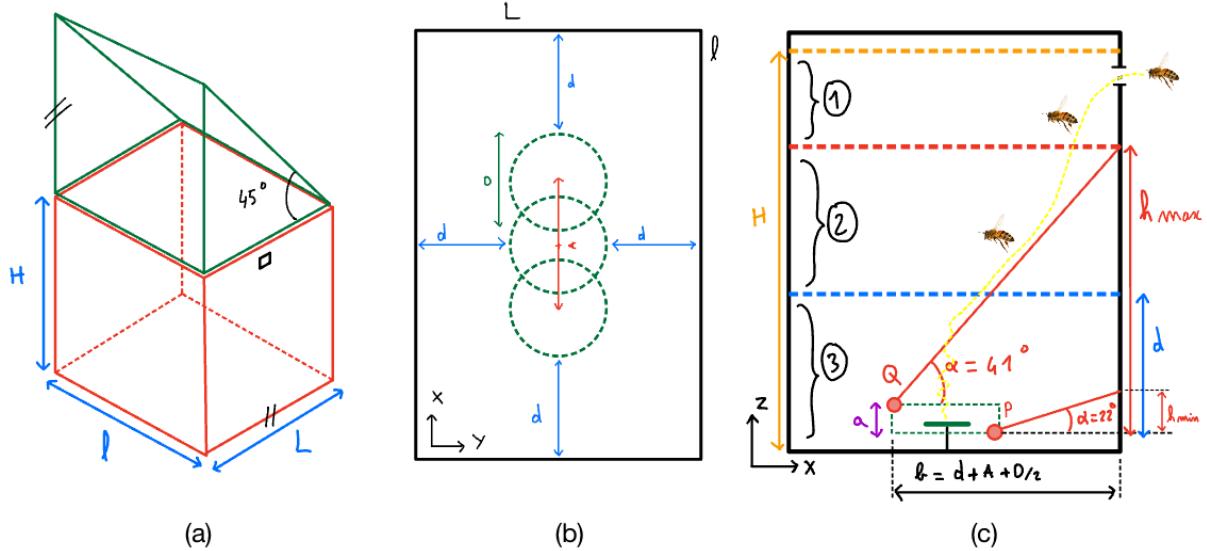


FIGURE 8 – Schémas de dimensionnement de la chambre de vol.

(a) Vue globale de la chambre de vol. En rouge : la partie basse. En vert : la partie haute avec le miroir à 45°. (b) Fond de la partie basse de la chambre de vol, vue du dessus.  $A$  amplitude d'oscillation horizontale maximale de la cible,  $D$  Diamètre maximal de la cible,  $d$  débattement minimal exigé entre la cible et la paroi,  $l$  longueur intérieure de la chambre de vol,  $L$  largeur intérieure de la chambre de vol. (c) Partie basse de la chambre de vol vue de face.  $a$  amplitude maximale d'oscillation verticale de la cible,  $b$  distance maximale entre le bord de la cible et la paroi d'entrée, 1 : zone de manœuvre de l'abeille, zone 2 : zone de descente naturelle de l'abeille, zone 3 : zone où l'abeille suit la cible pour se poser,  $\alpha$  angle de descente naturel de l'abeille.

J'ai d'abord calculé les dimensions minimales du fond de la partie basse de la chambre de vol (Fig. 8b). Sachant que pour n'importe quel instant et pour n'importe quelle position de la fleur, je devais avoir un débattement  $d \geq 17,5 \text{ cm}$ . Connaissant aussi les diamètres  $D$  et amplitudes horizontales  $A$  maximales de ma cible, j'ai pu en déduire la longueur  $l$  et la larguer  $L$  de la chambre de vol. Ainsi, j'ai obtenu :

$$L = D + 2d = 100 + 2 \cdot 175 = 450 \text{ mm} \quad (1)$$

$$l = A + D + 2d = 100 + 100 + 2 \cdot 175 = 550 \text{ mm} \quad (2)$$

J'ai ensuite calculé la hauteur  $H$  de la partie basse de la chambre de vol (Fig. 8a,c) afin de respecter l'angle de descente naturelle de l'abeille, quelle que soit la position de la fleur. L'abeille rentre naturellement dans la chambre de vol avec une altitude maximale  $h_{max}$  dans le cas où elle a un angle de descente maximal ( $41^\circ$ ) et que la cible est située le plus en haut à gauche de la chambre de vol (point Q, Fig. 8c). L'abeille rentre naturellement dans la chambre de vol avec une altitude minimale  $h_{min}$  dans le cas où elle a un angle de descente minimal ( $22^\circ$ ) et que la cible est située le plus en bas à droite de la chambre de vol (point P). Pour satisfaire toutes les situations d'approche de l'abeille, l'ouverture de la boîte devrait être  $O = (h_{max} - h_{min})^2 \text{ cm}^2$ . L'ouverture de la porte RFID étant seulement de  $1 \text{ cm}^2$ , j'ai pris  $H$  la hauteur de l'entrée 15 cm plus haut que l'entrée maximale théorique. De cette façon, l'abeille a le temps de descendre de façon "non naturelle" (zone n°1, Fig. 8c) puis suit son angle de descente naturel (zone n°2). J'obtiens donc une hauteur de :

$$h = \tan(\alpha_{max}) * b_{max} + a = 313 \text{ mm} \quad (3)$$

Avec

$$b_{max} = d + A + \frac{D}{2} \quad (4)$$

et  $b_{max}$  la distance maximale entre la fleur et l'entrée.

Comme j'ai placé l'entrée 15 cm plus haut, j'ai donc  $H = 463 \text{ mm}$ .  $H$  est aussi voulu comme étant supérieur au débattement de 17,5 cm. La partie basse de la chambre de vol a donc un volume de  $L = 450 * l = 550 * H = 463$  ce qui reste raisonnable pour monter le tout sur le chariot (Figs. 7 et 8).

### 6.1.3 Résultats obtenus

J'ai conçu les arêtes de la chambre de vol (Fig.7) avec des profilées en aluminium de section 20x20 cm. Les profilés ont l'avantage d'être modulaires et rigides. La structure est donc démontable facilement. Toutes les faces de la chambre de vol sont en plexiglas opaques aux ultraviolets. L'avantage d'un tel matériau est la légèreté et la flexibilité pour résister aux vibrations. J'ai choisi l'épaisseur des faces pour qu'elles coulissent parfaitement dans les fentes des profilés. Ainsi, après le montage des faces, j'ai simplement glissé les plaques de plexiglas. J'ai ajouté des joints entre les arêtes et les faces pour que le tout résiste aux vibrations. La face du haut est le miroir à 45°, il est en plexiglas recouvert d'une couche réfléchissante. J'ai conçu le haut de la chambre de vol de façon à ce que le miroir soit facilement démontable pour le nettoyer. J'ai fixé la porte RFID directement sur le plexiglas résistant avec des vis (Fig. 7c). J'ai trouvé le fond de la chambre de vol pour laisser passer la cible et permettre son mouvement. Derrière le miroir, j'ai placé un profilé supplémentaire pour rigidifier la structure et surtout pour fixer une ventouse au centre de la face (Fig. 7, b). Cette dernière redresse le miroir légèrement flexible qui se courbe à cause de sa grande surface. Pour faciliter le nettoyage de l'intérieur de la chambre de vol et l'accès à la cible, j'ai transformé la face du fond en une porte. La porte est fixée avec une charnière sur le profilé vertical arrière de la boîte. Les bandes rouges sur la construction réelle (Fig. 7c) sont ajoutées pour donner un repère visuel aux abeilles, ce qui leur est indispensable pour contrôler leur vol. En effet, les abeilles se basent en particulier sur le flux optique (vitesse de défilement du sol) pour réguler leur vol et s'orienter. Ce flux ne peut être perçu que dans un environnement en contraste et en mouvement. Les abeilles n'ont donc pas d'informations visuelles exploitables si elles restent immobiles ou si le fond de la boîte est uniforme. Le flux optique du paysage vu à travers les vitres est trop lointain pour être exploité par les abeilles. Les abeilles ne voient pas le rouge, mais elles perçoivent le contraste rouge-blanc, car elles sont sensibles au vert et bleu contenu dans le blanc. Le rouge est choisi pour éventuellement filmé avec un filtre rouge de même nature et faire disparaître le fond optique durant l'enregistrement vidéo.

### 6.1.4 Discussions sur la chambre de vol

La structure a résisté aux vibrations dues au transport du chariot tout le mois de juillet 2023. J'ai utilisé du plexiglas qui ne laisse pas passer les ultraviolets (UV) du soleil (4% du spectre d'amplitude du soleil, soit environ  $40\text{W/m}^2$  à Marseille) à l'intérieur de la chambre de vol. Il aurait été plus pertinent d'utiliser du plexiglas qui ne filtre pas les UV pour reproduire au mieux l'environnement extérieur dans la boîte. Un tunnel de vol a déjà été construit au laboratoire avec des plaques de plexiglas transparentes aux UV (taux de transmission 80%) [16], mais le coût est exhortant auprès d'un fabricant de cabine de

bronzage en Allemagne, seul fournisseur européen identifié à ce jour. Dans un premier temps, nous avons alors convenu de construire une chambre de vol opaque aux UV. La mise en position des profilées a été difficile, car les éléments de liaison aux sommets sont des cubes qui ne laissent donc pas de flexibilité de positionnement, ce qui est un problème pour une construction hyperstatique comme la mienne. Malgré la ventouse pour redresser le miroir, ce dernier reflète la vue du dessus de la cible de façon légèrement déformée. Remplacer le miroir par du verre n'est pas pertinent. La distorsion de l'image sera résolue informatiquement.

## 6.2 Le système RFID



FIGURE 9 – Système RFID de chez microsensys en Allemagne.

Le système RFID "Radio Frequency IDentification" est composé d'un contrôleur, d'une ou plusieurs portes, et de la puce à coller sur le dos des abeilles (Fig. 9). Il enregistre sur une clef USB branchée sur le contrôleur :

- L'identifiant de l'abeille.
- La date, l'heure, la minute et la seconde de passage.
- Si l'abeille entre ou sort de la porte.
- Combien de passage l'abeille effectue dans une journée.
- Dans quelle catégorie, définie à l'avance par l'utilisateur, l'abeille appartient-t'elle.

Le contrôleur RFID possède un interrupteur intégré qui se ferme en temps réel lors du passage d'une abeille. Il est possible de ne faire fermer l'interrupteur que pour un ensemble de puces défini à l'avance sur le logiciel du contrôleur fourni par le fabricant. J'ai validé le fonctionnement du système RFID dans le contexte de mon banc de test. En raison du coût des puces élevé (5 € par puce), je n'ai pas collé les puces sur les abeilles. En passant brièvement une puce sur le pas de la porte, les moteurs de la fleur robotique se mettent en marche. En passant la puce une seconde fois, les moteurs s'arrêtent comme voulu. Par contre, un stationnement de plus d'une seconde de la puce sur la porte fait clignoter l'interrupteur relié à la carte Arduino. Les moteurs alternent donc entre marche

et arrêt. Ce phénomène pose un problème puisque dans certains cas, les abeilles moins entraînées stationnent à la porte avant d'entrer. J'ai donc développé un algorithme qui, si l'interrupteur se ferme successivement au-delà d'un rythme seuil, ce dernier ne prend en compte pour le démarrage ou l'arrêt des moteurs uniquement la première fermeture de l'interrupteur. Comme l'interrupteur est le seul outil de communication en temps réel du contrôleur RFID, il n'est pas possible de savoir instantanément si l'abeille rentre au sort de la chambre de vol. Cela ne pose pas de problème dans le cadre de mon stage. Mon travail sur le système RFID va être réutilisé par des doctorants du laboratoire travaillant aussi sur les abeilles. Une abeille pesant environ 100 mg, elle est capable de transporter 20 mg de pollen en conservant un vol naturel. La puce RFID, qui ne pèse que 5 mg, soit 5 % de la masse d'une abeille, n'est donc pas un élément perturbateur. En effet, la charge utile maximale que peut porter une abeille en vol pourrait aller jusqu'à 80% de la masse de son corps [2]. Des travaux plus récents ont montré que l'on pouvait charger une abeille jusqu'à 18% de la masse de son corps sans affecter son comportement en vol [5].

### 6.3 La caméra

J'ai utilisé une [caméra SONY RXO](#) capable de filmer à 500 images par secondes (Fig. 10).



FIGURE 10  
— Caméra [SONY RXO](#) 500 images/seconde.

J'ai choisi l'objectif optique de la caméra en testant expérimentalement ceux déjà présents au laboratoire (six objectifs à distance focale réglable). L'achat d'un nouvel objectif dépassait le budget de mon stage. Je n'ai donc pas réalisé de calculs théoriques qui auraient été pertinents, uniquement, si j'avais eu à dimensionner un objectif sur mesure. La distance focale, l'ouverture et la profondeur de champ sont les principaux paramètres à ajuster pour le choix de l'objectif qui devait permettre à la caméra :

1. D'afficher tout le cadre de la face avant de la chambre de vol.
2. D'afficher, sur plus de 5 pixels, le passage d'une abeille (ellipse de 13x4 mm) quelles que soient sa position et son orientation dans la chambre de vol.
3. De voir net simultanément l'image de la partie basse de la chambre de vol et l'image reflétée par le miroir.
4. D'être le plus proche possible de la chambre de vol.
5. D'afficher une image la moins distordue possible par la lentille de l'objectif.

L'objectif choisi satisfait tous les critères ci-dessus. Il peut donc être conservé à long terme pour le projet. Par contre, la grande distance (1,5 m) requise entre la caméra et la chambre de vol en raison du critère n°1 et n°5 a engendré des contraintes géométriques supplémentaires pour la conception de la structure métallique du banc de test.

### 6.4 La fleur robotique

#### 6.4.1 Cahier des charges

La fleur robotique met en mouvement la cible pour lui faire reproduire l'oscillation sinusoïdale horizontale et verticale naturelle d'une fleur dans le vent. La fleur robotique doit en particulier :

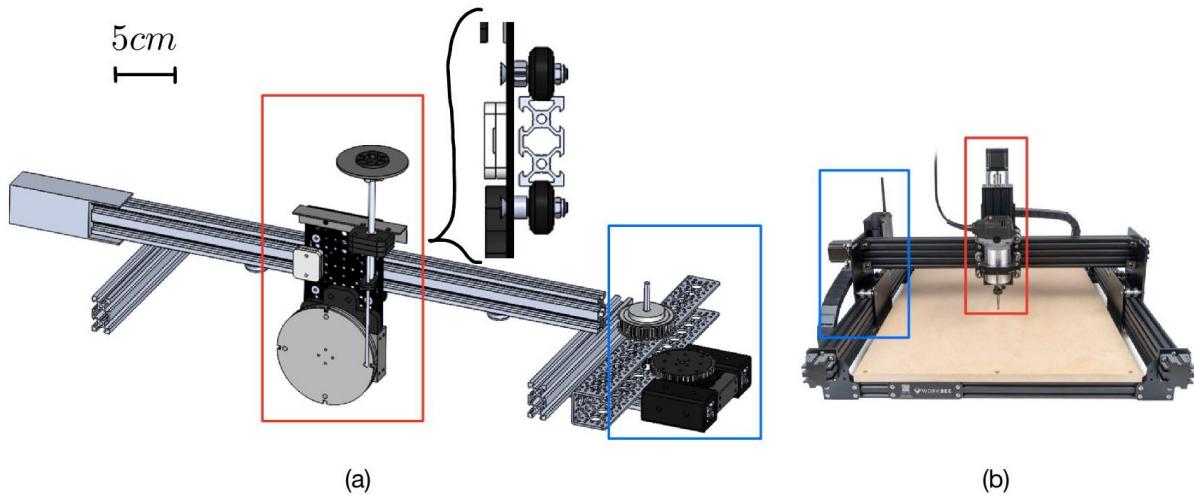


FIGURE 11 – Maquette numérique de ma fleur robotique (a) et découpeuse CNC (b). Encadré en rouge : les parties légères. Encadré en bleu : les parties lourdes.

- Avoir une commande indépendante sur chaque axe.
- Découpler sur chaque axe la commande en amplitude, fréquence d'oscillation et phase à l'origine.
- Réaliser au maximum une oscillation de 10 cm d'amplitude à 3 Hz pour l'axe horizontal.
- Réaliser au maximum une oscillation de 3 cm d'amplitude à 3 Hz pour l'axe vertical.
- Avoir une précision de déplacement de 1 mm sur les 2 axes. Sois environ  $\frac{1}{10^{eme}}$  de la taille d'une abeille.
- Endurer l'utilisation sur une journée en plein soleil.

#### 6.4.2 Choix de conception

La façon dont je devais mettre en mouvement la cible m'a fait penser à la façon dont une découpeuse CNC (Computer Numerical Control) fait bouger rapidement et précisément son foret (Fig. 11). Pour découpler facilement la commande entre tous les axes, la découpeuse CNC à un moteur par degré de liberté du foret. J'ai donc pris un moteur pour chaque axe de mouvement de ma cible. Sur les découpeuses CNC, les mécanismes les moins lourds sont embarqués sur les mécanismes les plus massifs. On a donc un mouvement composé où le mécanisme léger, faisant translater de haut en bas le foret, est entraîné par le mécanisme le plus lourd qui translate de gauche à droite. Dans mon cas, le mécanisme léger sera le moins demandant en puissance, c'est-à-dire celui qui met en mouvement l'axe vertical à basses fréquences et basses amplitudes. J'ai utilisé les mêmes profilés en aluminium que pour la chambre de vol. Ainsi, tout est compatible et donc assemblable au besoin. Ces profilés ont été conçus spécialement pour fabriquer des petites découpeuses CNC. J'ai utilisé dans un premier temps des servomoteurs du laboratoire qui avaient démontré, lors d'anciens projets une précision de commande et une résistance à la chaleur suffisante. Ne sachant pas si ces moteurs étaient assez puissants pour mon projet, j'ai conçu dès le début tout le robot de façon à ce que les moteurs soient remplaçables facilement. J'ai ensuite dimensionné la puissance requise pour mes moteurs avec des simulations et des tests expérimentaux.

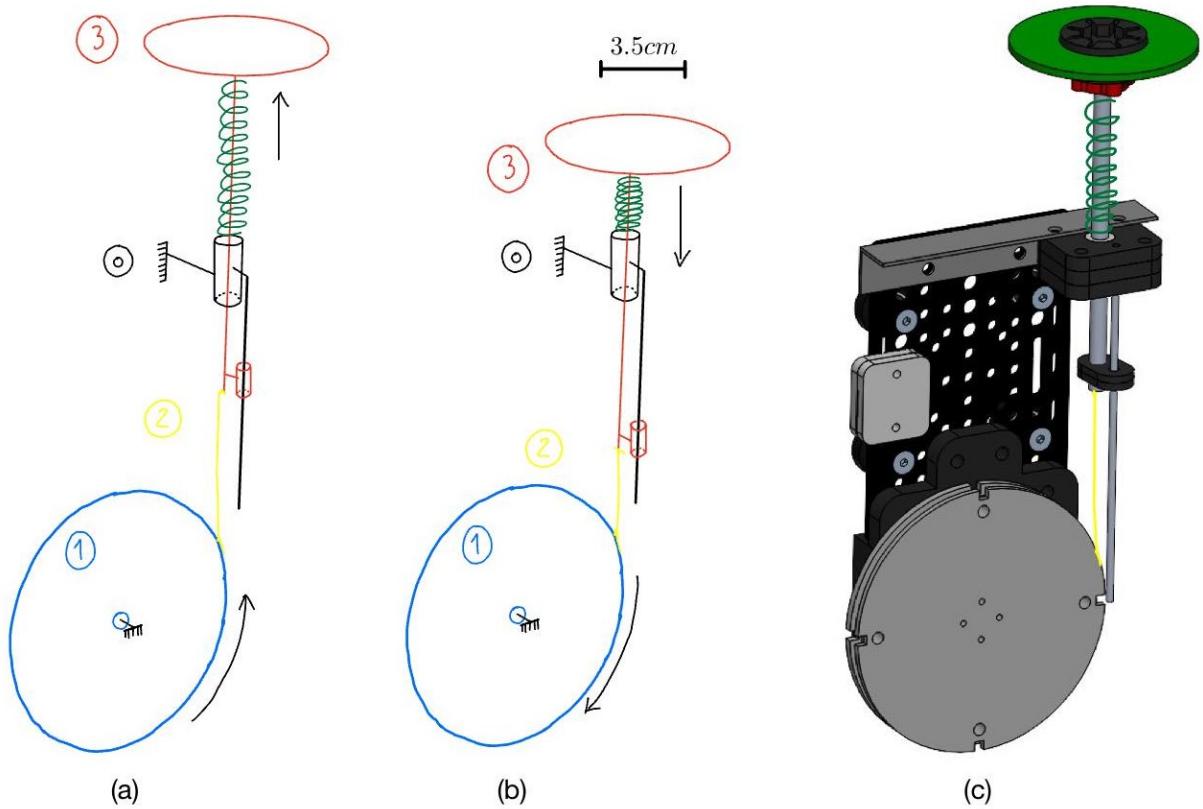


FIGURE 12 – Schémas de la cible montante (a) et descendante (b). Maquette numérique de la partie légère de la fleur robotique (c).

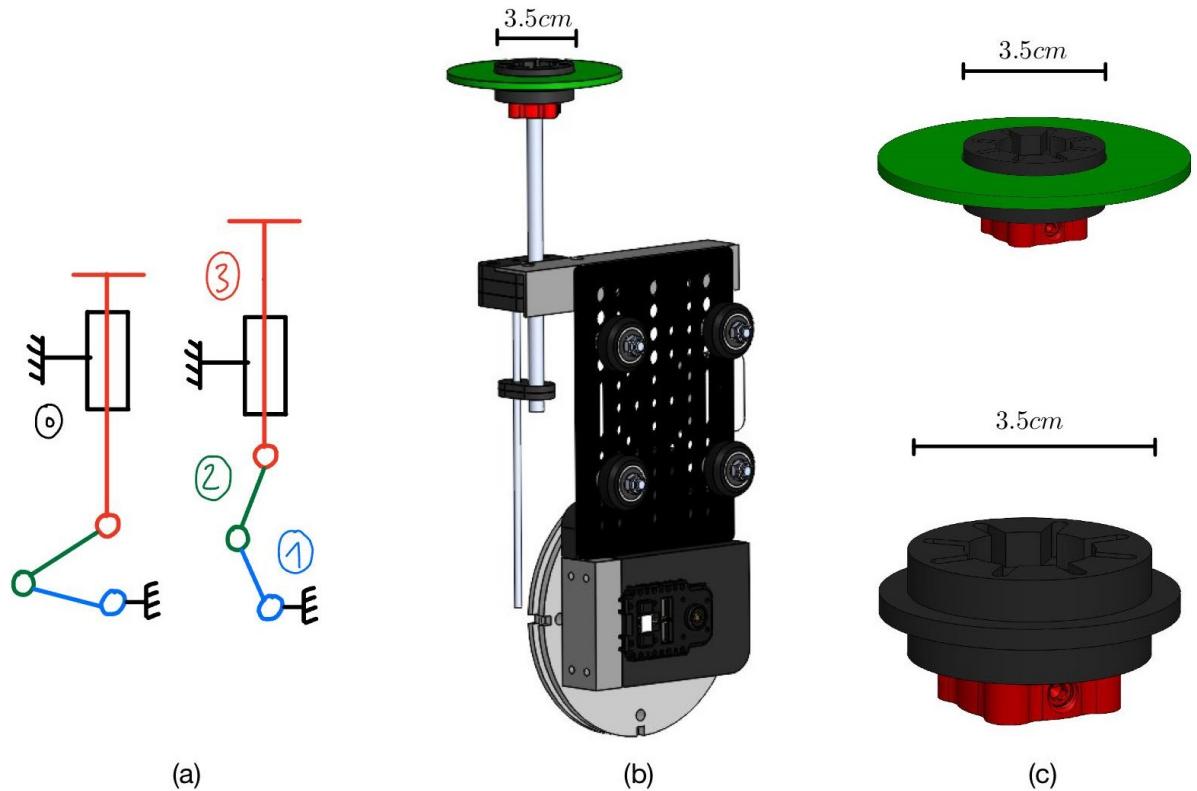


FIGURE 13 – Système bielle manivelle (a). Maquettes numériques de la partie légère de la fleur robotique (b) et de la cible (c). Le système bielle-manivelle n'est pas adapté, car il ne permet pas de découpler les commandes d'amplitudes et de fréquences.

#### 6.4.3 Choix de conception de l'axe vertical

Mon mécanisme à l'avantage principal de permettre une commande indépendante de la fréquence, de l'amplitude et de la phase d'oscillation de la cible. Il est donc possible pour n'importe quelle amplitude de choisir n'importe quelles fréquences, contrairement à un système de bielle manivelle, par exemple (Fig. 13). Mon mécanisme a aussi un bon rendement en raison du peu de pièces entre le moteur et la cible. Il est simple et léger. Pour la descente de la cible (Fig. 12b), le moteur tourne, entraîne une roue qui tire la cible par l'intermédiaire d'un câble lié à une tige coulissante. Le ressort autour de la tige est compressé par la cible. Pour la montée (Fig. 12a), le ressort se détend passivement et pousse donc sur la cible. Le moteur tourne dans le sens inverse que pour la descente et à la même vitesse que précédemment pour freiner l'extension du ressort et avoir ainsi une vitesse de montée exactement égale à la vitesse de descente. J'ai choisi un ressort assez raide pour faire remonter assez vite la cible pour toutes les commandes, mais assez flexible pour ne pas demander une force de traction inutile aux moteurs. J'ai choisi un ressort assez long pour permettre les commandes d'amplitudes élevées, mais assez court pour ne pas encombrer. J'ai fait mes choix de conception mécanique, surtout en fonction du matériel déjà existant au laboratoire, car les délais de commande de nouvelles pièces sont longs. Toutes les pièces sont fixées sur un plateau avec des roues. L'ensemble coulisse sur un rail pour permettre le mouvement horizontal (Fig. 11a). La pièce qui entoure le moteur et le rend solidaire du plateau imprimé en 3D est en PETG (Fig. 13b). Elle est donc solide. Le moteur reste démontable en dévissant simplement les deux parties de la pièce. Les pas de vis sont en métal et ont été inclus dans le plastique avec un fer à souder. Le PETG qui se refroidit emprisonne le pas de vis. La tige métallique coulisse dans un roulement à billes encastré dans trois plaques empilées découpées au laser et fixées sur le plateau avec une équerre métallique. Une tige plus fine encastrée dans les plaques empilées permet de bloquer la rotation de la tige dans le roulement. La poulie qui enroule/déroule le câble est imprimée en 3D en PLA et est fixée au moteur par 4 vis. Deux pièces en PLA compriment et fixent sur le plateau la courroie pour le mouvement horizontal (Fig. 12c). Le cœur de la cible est en PLA (Fig. 13c), il est conçu pour pouvoir mettre un appât liquide pour les abeilles sans que celui-ci ne se renverse avec les mouvements. Les cibles de différent diamètre sont installées à tour de rôle sur le cœur (Fig. 13).

#### 6.4.4 Choix de conception de l'axe horizontal

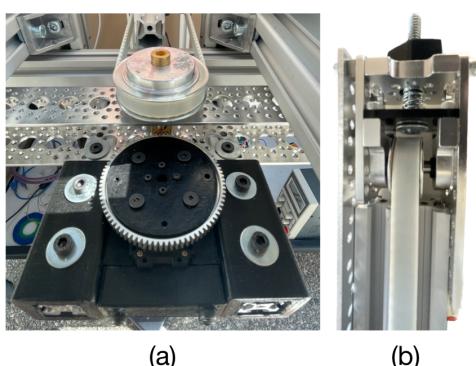


FIGURE 14 – Réducteur de couple de la fleur robotique (a) et mécanisme de tension de sa courroie (b).

Je me suis inspiré du système mécanique des imprimantes 3D du laboratoire pour la conception de l'axe horizontal. En effet, ce système a déjà prouvé un jeu mécanique faible, des frottements faibles et un bon rendement sur les imprimantes 3D de la marque "Creality". Je disposais en plus déjà de tout le matériel nécessaire sans passer de commandes et perdre deux semaines. Une poulie et une courroie crantée font translater la partie légère sur un profilé en aluminium (Figs. 14 et 11). Il n'y a aucun jeu mécanique, car les 4 roues épousent parfaitement la forme en V du profilé et que l'espacement entre les deux paires de roues est réglable précisément

avec des écrous asymétriques. Le moteur déjà existant au laboratoire n'ayant pas la vitesse requise à la sortie de son arbre, j'ai fabriqué un réducteur de couple (Fig. 14a). J'ai utilisé des engrenages du laboratoire conçus pour de la robotique créative et modulaire de précision. J'ai fabriqué avec le même type de pièces de robotique modulaire, un mécanisme pour régler précisément la tension de la courroie (Fig. 14b). La pièce en PETG imprimée en 3D qui entoure le moteur et le rend fixe par rapport aux engrenages (Fig. 14a) est conçue en deux parties pour pouvoir démonter facilement le moteur de la même façon que pour la partie légère. La pièce à l'intérieur de l'engrenage de la sortie de l'arbre moteur permet de fixer solidement l'engrenage avec des vis et de limiter au maximum la flexion de l'arbre moteur.

### *Choix des moteurs*

Contrairement aux moteurs des imprimantes 3D, je n'ai pas choisi de moteur pas à pas, car leur puissance disponible est faible et que leur couple diminue rapidement avec la vitesse. Ils ne sont donc pas capables de mettre en mouvement une masse avec de fortes accélérations. De plus, sans codeur intégré au moteur, il n'est pas capable de donner un retour sur la position exacte de la cible alors que des pertes de pas arrivent fréquemment suite à une perturbation électrique ou mécanique. Je n'ai pas choisi de moteurs à courant continu, car ils mettent trop de temps à changer de direction. Les moteurs les plus adaptés étaient les servomoteurs brushless, car ils sont capables de changer de direction très rapidement. Leur couple reste important à haute vitesse et ils ont un bon rendement. Contrairement aux moteurs brushless classiques, les servomoteurs ont un capteur de position intégré qui donne un retour de l'angle réel de leur arbre de sortie. Le prix plus élevé de ces moteurs n'a pas été un problème puisqu'ils en existaient déjà deux au laboratoire (servomoteurs Dynamixel, Fig. 15). Les moteurs [Dynamixel](#) sont adressables : il est possible de les assembler en série et de les commander individuellement en envoyant une unique consigne au premier moteur seulement. Les moteurs adressables sont donc simples à coordonner et à commander. J'ai ainsi choisi d'utiliser les mêmes moteurs Dynamixel pour les deux axes.

#### **6.4.5 Dimensionnement de la puissance requise des moteurs**

##### *Simulation numérique*

Avec MATLAB, j'ai calculé la puissance minimale requise des moteurs (Fig. 16). Le cas qui requiert le plus de puissance est une oscillation de l'axe horizontal à amplitude et fréquence maximales (10 cm, 3 Hz). Je me suis donc concentré sur ce cas. Ma simulation contient les hypothèses suivantes :

- Masse de la partie légère : 350 g.
- Coefficient de frottement entre les roues et le profilé : 0,4.
- Rendement global de 0,7.
- Pas de prise en compte de l'inertie des engrenages (replacé par une légère sous-estimation du rendement).
- La cible à un mouvement sinusoïdal.

J'ai aussi les données suivantes :

- Couple de décrochage du moteur Dynamixel : 1,8 N.m.



FIGURE 15 – Servomoteur [Dynamixel AX-12A](#).

- Vitesse de rotation maximale à vide :  $V_{max,moteur} = 97$  tours/min.
- Pour avoir un contrôle stable et précis, ne pas dépasser  $\frac{1}{5}^{eme}$  du couple de décrochage, c'est-à-dire, ne pas dépasser un couple de fonctionnement  $C_{fonc}$  de 0,36 N.m.

Sur la Fig. 16, on peut voir la valeur absolue de la puissance requise du moteur en fonction du temps sur deux périodes. Sur la Fig. 16, on peut voir la position de la cible en fonction du temps sur deux périodes.

La puissance requise est le produit de la force de propulsion et de la vitesse de déplacement de la cible ( $P = F * V$ ). Dans les zones 1, 3, 5, 7 et 9, la puissance requise est nulle, car la cible change de direction et est donc de vitesse nulle. Dans les zones 2, 4, 6 et 8, la puissance est nulle, car la cible a fini de prendre de la vitesse ( $\Rightarrow accélération\ a\ nulle \Rightarrow F = 0\ car\ F = M * a$ ). La puissance requise est maximale quand le produit  $F * V$  est maximal. C'est-à-dire peu de temps après le changement de direction de la cible : quand la cible va vite et accélère encore (noté  $P_{max}$  sur la Fig. 16). À chaque fin de demi-période ( $T/2$ ), la puissance requise est négative, car le moteur doit freiner la cible avant de la faire changer à nouveau de direction. Il n'y a pas de puissances négatives pour les simulations à basse fréquence (Fig. 16b), car le moteur ne fait pas prendre des vitesses importantes à la cible en début de demi-période. Les courbes de puissance ne sont donc pas symétriques sur chaque demi-période à haute fréquence.

La puissance minimale requise simulée  $P_{min,simulee}$  est de 5,5 W. En faisant l'hypothèse que la vitesse maximale de rotation du moteur chargé est la même que celle à vide, la puissance réelle que peut fournir un moteur Dynamixel est de  $P_{min,reelle} = C_{fonc} * W_{max} = 3,5\ W < P_{min,simulee}$ . La puissance réelle des moteurs Dynamixel n'est donc pas suffisante pour mettre en mouvement la cible dans les cas les plus extrêmes. Avec mes encadrants, nous avons décidé de poursuivre tout de même avec les moteurs, mais de réduire les exigences d'amplitude et de fréquence d'oscillation. Par exemple, une amplitude maximale de 7 cm et une fréquence maximale de 2,5 Hz conviennent et donnent  $P_{min,reelle} = 2\ W < P_{min,simulee}$  (Fig. 41 en annexes).

J'ai aussi simulé le couple  $C$  et la vitesse de rotation  $w$  au niveau de la poulie crantée de la courroie (Fig. 39 en annexes). La vitesse de rotation requise étant bien supérieure à la vitesse de rotation des moteurs, j'ai fabriqué un réducteur de couple avec un rapport de réduction  $r$  de 3,85. Par exemple, pour une amplitude maximale de 7 cm et une fréquence maximale de 2,5 Hz la vitesse de rotation requise à l'arbre moteur  $V_{arbre,requise}$  sans réducteur de couple est de  $210\ tours/min > V_{max,moteur}$ . Avec mon réducteur de couple, j'ai  $V_{arbre,reduct} = \frac{V_{arbre}}{r} = 54,5\ tours/min < V_{max,moteur}$  (Fig. 41 en annexes).

Des simulations semblables montrent que mes moteurs sont suffisamment puissants pour mettre en mouvement l'axe vertical dans tous les cas. La grande poulie qui tire sur le câble est un réducteur de couple indispensable.

### **Test concret**

J'ai confirmé mes résultats de simulation avec des tests concrets (Fig. 17). J'ai filmé mon mécanisme et j'ai indiqué pour chaque image de la vidéo la position de la cible avec le logiciel tracker. Sur la Fig. 17, on peut voir la position réelle de la cible en fonction du temps pour une amplitude de 10 cm et des fréquences de 0,2 / 0,5/ 3 Hz. Pour 3 Hz, la cible n'atteint pas l'amplitude désirée, car malgré le réducteur de couple, le moteur ne tourne pas assez vite. Avec un réducteur de couple de rapport de réduction plus grand, le moteur n'aurait pas pu apporter une force de translation suffisante pour déplacer la

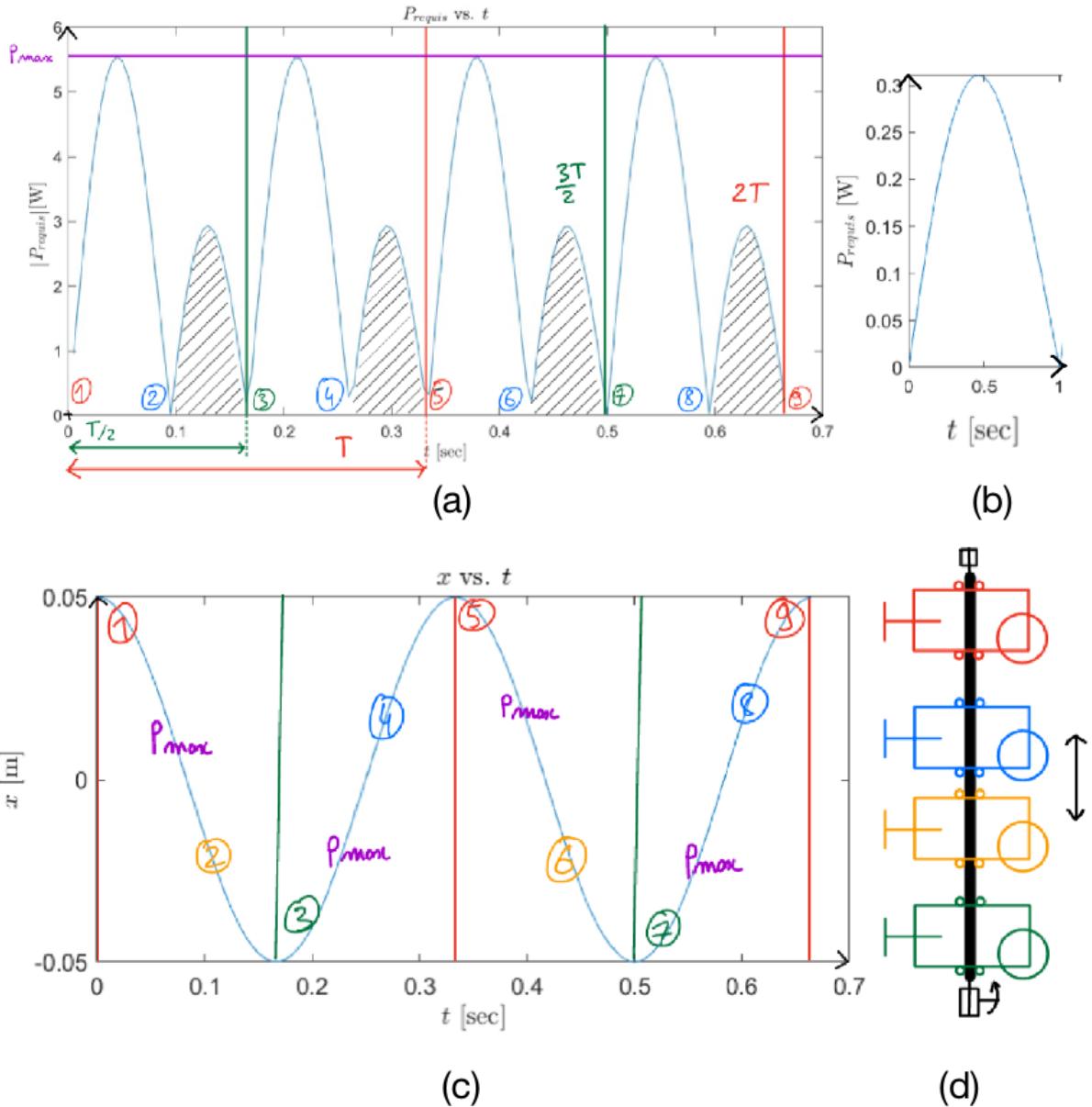


FIGURE 16 – Puissance minimale requise au moteur de l'axe horizontal pour une fréquence de 3 Hz (a) et une fréquence de 0,5 Hz (b). Position de la cible en fonction du temps pour une fréquence de 3 Hz (c et d).

(a) Les puissances négatives sont hachurées en noir. (b) On constate qu'il n'y a pas de puissances négatives à basses fréquences.

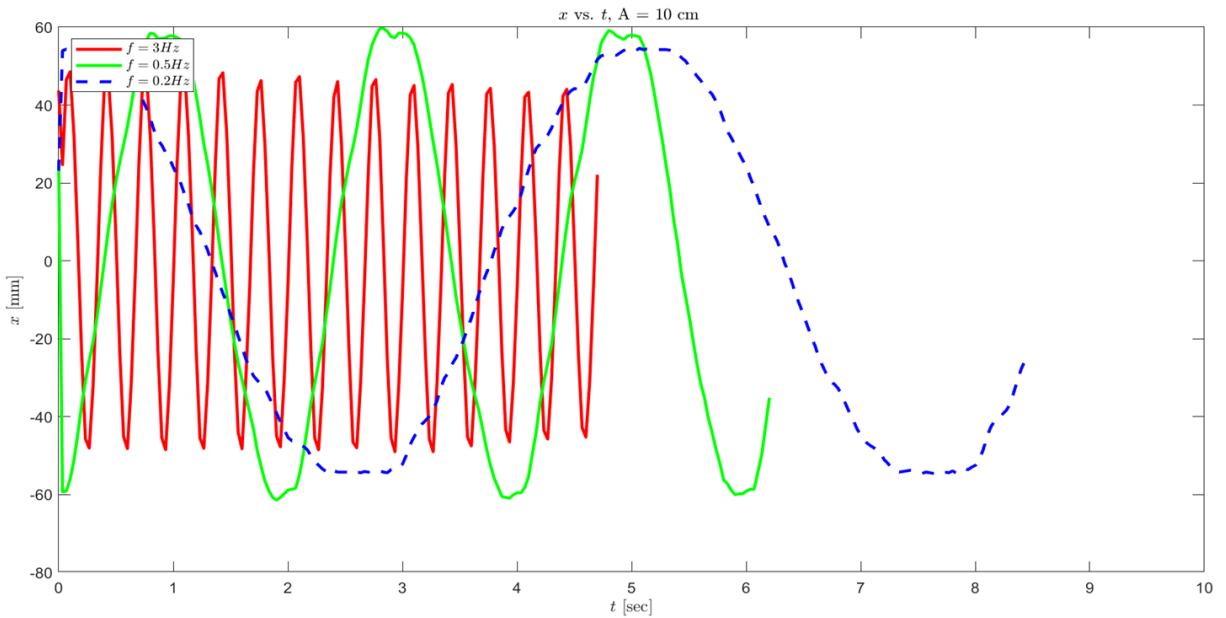


FIGURE 17 – Position réelle de la cible pour une amplitude de 10 cm et des fréquences de 0,2 Hz (bleu) 0,5 Hz (vert) 3 Hz (rouge).

cible. Pour 0,2 Hz, la cible suit la consigne avec une précision inférieure à 1 mm. Pour 0,5 Hz, la cible dépasse la consigne d'environ 15 %, car le moteur n'est pas capable de ralentir la masse lancée à pleine vitesse. Ces résultats concrets confirment les ordres de grandeur des simulations. Par contre, le moteur se montre moins performant en pratique qu'en théorie. En effet, la cible fait des petits mouvements parasites invisibles à la caméra, mais engendrant des pertes d'énergie. La réalisation d'une transformée de Fourier révèle ces mouvements parasites. Elle donne un taux de distorsion harmonique très élevé pour chaque fréquence (70% environ). Ce pourcentage est un bon ordre de grandeur de la différence entre la performance théorique et réelle du moteur. Nous avons tout de même conservé les moteurs Dynamixel et, car ils sont assez puissants et précis pour une première série d'expériences (utilisation de 0 à 1 Hz avec des amplitudes de 0 à 5 cm).

### *Discussions*

Il n'y a aucun jeu mécanique de la fleur robotique sur les deux axes, même à très hautes fréquences. Les vibrations ne dévissent pas la structure. Une mise en mouvement prolongée de l'axe vertical à 3 Hz et à 10 cm casse l'arbre en plastique à l'intérieur du moteur par une contrainte de torsion (voir Fig. 33 en annexes). Cet arbre est remplacable facilement. La courroie de l'axe vertical ne se détend presque pas avec le temps et la chaleur. Sa tension est très facile à régler.

#### 6.4.6 Commande des moteurs

Les moteurs sont commandés avec une carte Arduino (voir circuit électronique Fig. 18 et câblage électronique réelle Fig. 34 en annexe). Au déclenchement de l'interrupteur manuel, la cible commence à osciller comme une fleur à des fréquences et amplitudes aléatoires. Au 2<sup>eme</sup> appui sur l'interrupteur, les moteurs s'arrêtent et se mettent aussitôt dans la position aléatoire initiale du prochain déclenchement. Lorsque la porte RFID détecte le passage d'une abeille, elle ferme automatiquement un interrupteur ayant le même rôle électronique que mon interrupteur manuel. j'ai donc branché, l'interrupteur manuel et celui de la porte en parallèle. Ainsi, une fermeture de l'un ou de l'autre ou des deux en même

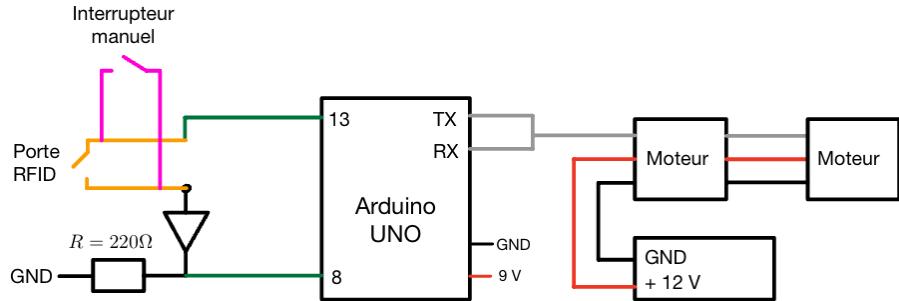


FIGURE 18 – Circuit électronique de commande des 2 servomoteurs de la fleur robotique.

temps déclenche le mouvement de la cible. Je peux donc choisir de démarrer manuellement ou automatiquement la cible. Un contrôleur en position en boucle fermée, avec des résultats suffisamment précis, rapides et stables, est déjà intégré dans les moteurs. Il est notamment composé d'un codeur qui donne le retour de la position angulaire réelle ainsi que d'algorithmes de contrôle. Je n'ai donc pas eu besoin de reconstruire un contrôleur en boucle fermée de plus haut niveau. Mes contrôleurs sont donc en boucle ouverte. En voici le fonctionnement :

Toutes les 100 millisecondes environ, les positions linéaires horizontales et verticales  $x(t)$  et  $z(t)$  des cibles sont calculés :

$$x(t) = 0.5 \cdot A_x \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f_x \cdot t}{100} + \varphi_x\right) \quad (5)$$

$$z(t) = 0.5 \cdot A_z \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f_z \cdot t}{100} + \varphi_z\right) - 0.5 \cdot A_z \quad (6)$$

où  $t$  est le temps écoulé en millisecondes depuis l'appui sur l'interrupteur.  $A$ ,  $f$  et  $\varphi$  les amplitudes, fréquences et phases. Comme voulu dans le cahier des charges, les amplitudes et fréquences sont bien indépendantes. Les positions linéaires sont ensuite converties en positions angulaires en degrés  $a_x$  et  $a_z$  :

$$a_x = \arctan\left(\frac{x(t)}{r_x}\right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (7)$$

$$a_z = \arctan\left(\frac{z(t)}{r_z}\right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (8)$$

avec  $r_x$  et  $r_z$  les rapports de réduction du réducteur de couple de chaque axe. Enfin, les positions angulaires sont converties en commandes analogiques  $cmd_x$  et  $cmd_z$  comprises entre 0 et 1023. Les moteurs sont commandables pour des angles de 0 à 300°.

$$cmd_x = \frac{1023}{2} + a_x \cdot \frac{1023}{300} \quad (9)$$

$$cmd_z = \frac{1023}{2} + a_z \cdot \frac{1023}{300} \quad (10)$$

## 6.5 La structure métallique



FIGURE 19 – Maquette numérique (a) et photo (b) du banc de test.

La structure métallique (Fig. 19) fixe la chambre de vol, la fleur robotique et la caméra sur le chariot. Elle doit en particulier :

- Être facilement transportable et stockable.
  - Passer la porte entre la salle des stagiaires et l'extérieur.
  - Avoir une masse inférieure aux capacités de charge du chariot (250 kg).
- Être facile à entretenir.
  - Rendre accessibles et démontables les moteurs du robot.
  - Être facile à nettoyer.
- Permettre de prendre des mesures répétables à la fois au cours de la mesure d'une trajectoire et entre chaque mesure.
- Résister aux vibrations dues au transport et dues au mouvement de la fleur.
- Être accepté par les abeilles.

J'ai choisi de monter toute la structure avec des profilés en aluminium "EN AW-6063-T5" de section 30x30 cm acheté chez [Systéal](#). Les alliages d'aluminium de série 6000 (silicium + magnésium) avec un traitement thermique T5 (refroidi à partir d'un processus de mise en forme à température élevée + vieilli artificiellement) sont couramment utilisés pour l'architecture d'intérieur et d'extérieur. Ils sont légers, facilement usinables, et résistants à des contraintes mécaniques moyennes.

J'ai pris exactement le même matériau que celui utilisé dans de nombreux bancs de test du laboratoire, car ils satisfont des exigences très similaires aux miennes (qualitativement et quantitativement) et ont été conçus par des ingénieurs expérimentés spécialistes en mécanique. Je me suis, en particulier, inspiré d'un banc de test monté sur roues conçu pour observer des abeilles passant dans un long tunnel [16]. Ce tunnel transportable résiste aux contraintes mécaniques et aux vibrations depuis plus de dix ans. Il est bien accepté par les abeilles.

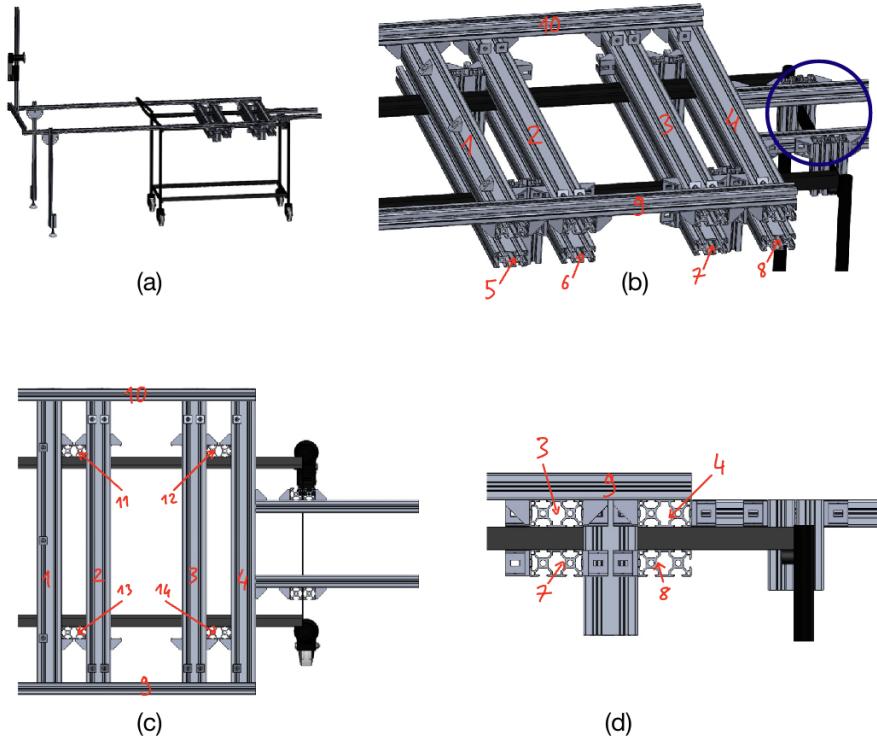


FIGURE 20 – Support de la chambre de vol. (a) Vue d'ensemble. (b) Vue détaillée. (c) Vue de dessus. (d) Vue de côté. (b) En bleu : les profilés qui bloquent la translation réglable du bloc de profilés numérotés en rouge.

Pour le choix de la section des profilés, j'ai privilégié les tests expérimentaux aux simulations numériques, car ces dernières n'auraient pas donné de meilleurs résultats rapidement. Elles m'auraient demandé de poser des hypothèses simplificatrices ou d'utiliser des logiciels de simulation numérique supplémentaires. J'ai donc testé la résistance à la flexion de chutes de profilés du laboratoire dans les mêmes conditions que s'ils étaient sur ma construction. Par exemple, pour le calcul de la section des deux profilées de 2 m éloignant la caméra de la chambre de vol (Fig. 19), j'ai fixé un profilé de 2 m parallèle au chariot et lui ai appliqué la masse de la caméra à son extrémité. Observant une flèche de quelques centimètres même pour les profilés les plus gros (45x45 cm), j'ai ajouté des pieds rétractables qui suppriment totalement cette flèche. J'ai décidé de prendre pour le support de la caméra des profilées de même section que ceux supportant la chambre de vol pour pouvoir les fixer entre eux facilement avec des équerres. Aucune flexion n'a été tolérée pour les expériences sur les profilées supportant la chambre de vol. Je n'ai pas pu tester expérimentalement la fatigabilité des profilés sur le long terme, je me suis donc fiée aux données du fabricant.

### 6.5.1 Le support de la chambre de vol

Quatre profilés de section 30x60 cm supportent la chambre de vol et les profilés qui supportent la caméra. Ils sont fixés au chariot en acier (Fig. 20). Pour que le chariot conserve une capacité de charge de 250 kg, je n'ai pas pu le trouver pour y fixer la chambre de vol, la caméra et la fleur robotique. Un trou dans une poutre fine en acier la fragilise fortement et la rend inutilisable pour soutenir des masses même faibles. J'ai donc conçu un système qui se fixe sur les barres en acier du chariot en les comprimant (Fig. 20, b). Il est ensuite possible de fixer sur ce système la chambre de vol, la caméra et la fleur robotique avec les équerres et les rainures de profilés modulaires. Les huit profilés perpendiculaires

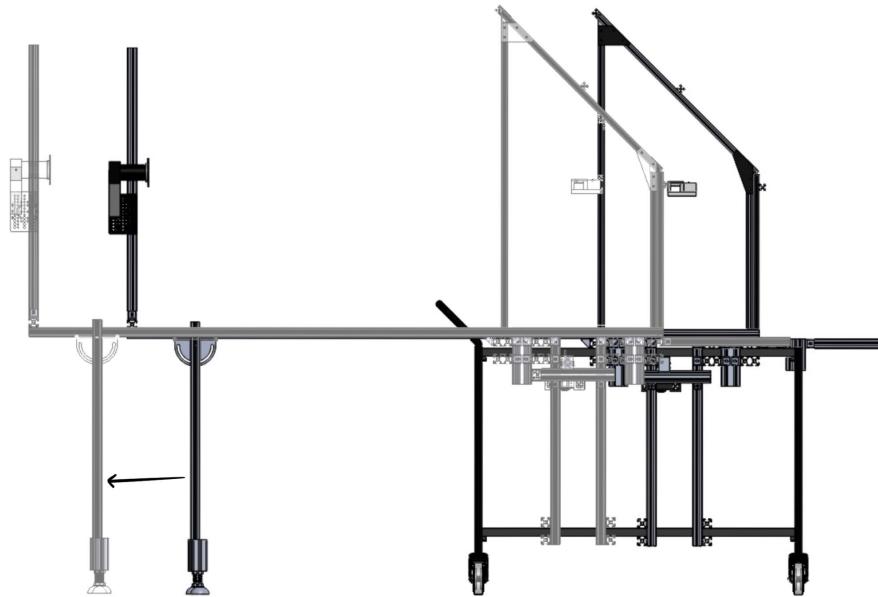


FIGURE 21 – L’ensemble { robot + chambre de vol + caméra } en translation sur le chariot. La translation assure une répartition égale du poids sur les 4 roues du chariot. Elle est totalement bloquée pour les expérimentations.

au chariot (n° 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) assurent la compression de haut en bas. Les quatre profilés les plus courts (n° 11, 12, 13, 14) assurent la compression de gauche à droite. Ils lient les profilés n°1, 2, 5 et 6 ensemble. Les arêtes de la chambre de vol parallèle au chariot lient les groupes de profilés n°1, 2, 5, 6 et n°3, 4, 7, 8 ensemble. La fleur robotique est liée aux profilés n°2, 6, 3 et 7. L’ensemble décrit ci-dessus lie donc la chambre de vol, la caméra et la fleur robotique. Son mouvement relatif par rapport au chariot est contraint : il est bloqué par compression de haut en bas et de gauche à droite. Il ne peut donc que translater le long du chariot (Fig. 21). J’ai volontairement laissé ce degré de liberté. Ainsi, lors du montage, j’ai pu régler la position de la structure pour que les quatre roues du chariot supportent le même poids. J’ai après le montage rendu fixe le dernier degré de liberté avec des profilés qui compriment la barre arrière du chariot (entourés en bleu sur la figure 20).

### 6.5.2 le support de la caméra

La distance minimale, d’environ 1,5 m, requise entre la caméra et la face avant de la chambre de vol explique la présence des deux profilées de deux mètres soutenant la caméra (Fig. 21). J’ai ajouté des pieds pour éviter la flexion des profilés (Fig. 22). Ils sont rétractables. Ainsi, les pieds ne touchent pas le sol lors du transport du chariot. Il suffit de dévisser/visser un écrou avec une clé Allen pour plier/déplier les pieds. Une fois les pieds dépliés, il est possible de régler plus en finesse leur hauteur en vissant/dévissant la tige filetée de leur extrémité. Une rotule lie l’embout du pied à la tige filetée. Ainsi, le pied est parfaitement adapté aux reliefs et aux pentes locales du sol extérieur. La hauteur de la caméra est ajustable par un système de vis/écrou qui fait coulisser la caméra sur le profilé qui la supporte (Fig. 22). La distance entre la caméra et la chambre de vol est réglable avec le profilé qui relie les deux profilées les plus longs et maintiennent leur parallélisme.

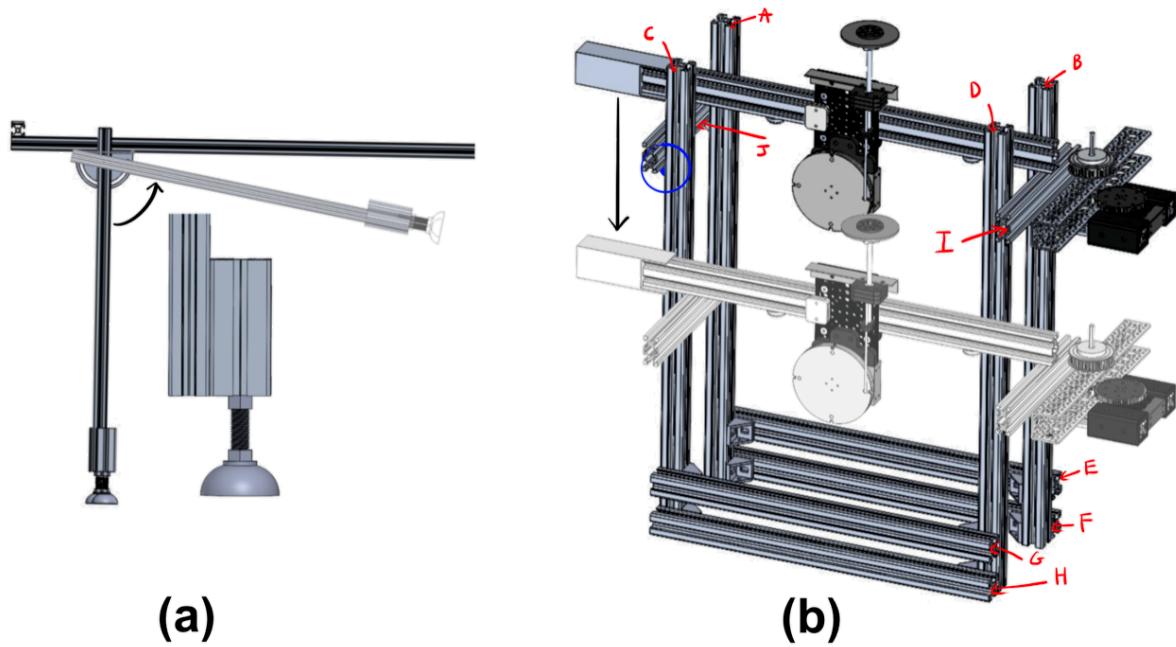


FIGURE 22 – (a) Le pied rétractable et le système de tige filetée de l'about du pied.(b) La fleur robotique qui translate. Lors de la maintenance des moteurs, la fleur robotique peut descendre en coulissant sur les quatre profilés verticaux.

### 6.5.3 Le support de la fleur robotique

J'ai conçu le support de la fleur robotique de façon à modifier le moins possible le prototype du robot réalisé avec des restes de profilés du laboratoire. La fleur est fixée (Fig. 22, b) sur les profilés C, A, D et B. Les quatre profilés (E, F, G, H) compressant les rails inférieurs du chariot permettent de maintenir le parallélisme des quatre profilés verticaux (A, B, C, D). Pour faciliter l'accès aux moteurs, la fleur robotique peut translater sur les profilés verticaux (A, B, C, D) si on desserre les écrous des 4 équerres (entouré en bleu, Fig. °22, b). Je n'ai cependant pas utilisé cette fonction, car il est difficile ensuite de replacer le robot en position haute et parfaitement à la verticale.

### 6.5.4 Discussions sur l'assemblage

L'expérience de l'assemblage de la chambre de vol m'a fait anticiper dès la conception le montage de la structure. J'ai, cette fois-ci, choisi pour fixer les profilées entre eux, des équerres permettant une flexibilité lors de la mise en position de ma maquette hyperstataque. J'ai aussi prévu l'ordre de montage des pièces :

1. Le support de la chambre de vol
2. La chambre de vol
3. Le support de la caméra
4. La fleur robotique
5. La caméra

Le montage s'est déroulé facilement et comme prévu. Une fois fixée, la caméra ne bouge absolument pas pendant la journée de prise de vidéos. La stabilité des vidéos prises est une preuve de l'efficacité des pieds rétractables. Les roues du chariot amortissent peu les chocs, car elles sont trop petites et trop rigides. Il faut donc être à deux pour sortir le chariot sans faire vibrer toute la structure.

## 6.6 Le relevé des données

Les données prélevées sont des vidéos au format MP4 haute définition (Fig. 24). En modifiant les paramètres de la caméra, les données peuvent être aussi une succession d'images. J'ai privilégié le format MP4, car il donne un aperçu visuel instantané de la qualité des résultats. Le format MP4 retourne uniquement des vidéos à 30 images par seconde. Pour les prises de vue à 500 images/secondes, le logiciel intégré à la caméra fournit donc une vidéo au ralenti et un facteur de ralentissement. Toutes les informations pertinentes sont ainsi conservées.



FIGURE 23 – Abeilles butinant sur la cible.

### 6.6.1 Protocole pour entraîner les abeilles

Ce sont les abeilles en fin de vie qui ont le rôle de "butineuses". Elles retiennent la position exacte de la nourriture trouvée en explorant. De retour à la ruche, elles communiquent cette position à leurs congénères qui se dirigent donc directement vers l'appât. Les butineuses font environ 15 aller-retours par jour entre une fleur et leurs ruches. Elles renforcent leur apprentissage du chemin parcouru à chaque trajet.

Avant de pouvoir prendre mes premières vidéos, j'ai d'abord attiré les abeilles sur mon lieu d'expérimentation (hall extérieur en face de la salle des stagiaires, Fig. 25) situé à 63 mètres de la ruche (1). J'ai ensuite appris aux abeilles à accepter la structure métallique (2), puis à entrer spontanément dans la chambre de vol (3).

1. J'ai placé deux assiettes remplies d'une solution aqueuse (sucrée à 40% , spécialement conçue pour les apiculteurs) à 2 mètres de la ruche. Dès que les abeilles ont butiné le sucre, j'ai rapproché de quelques mètres du hall les assiettes à tour de rôle. Ainsi, les abeilles disposaient toujours d'une assiette avec une position inchangée par rapport à leur passage précédent. Les abeilles ont mis une semaine à apprendre le chemin entre leur ruche et le hall.
2. J'ai placé un abreuvoir avec la solution sucrée (40% de sucre +10 % de miel ) à la position future de mon banc de test (Fig. 26). Il fallait entretenir l'abreuvoir tous les jours pour que les abeilles n'oublient pas le lieu de collecte. La mangeoire a été conçue pour distribuer goutte à goutte le liquide. Des autocollants vert et bleu ont été collés pour attirer l'abeille de la même façon que pour la cible du banc de test (Fig. 23). J'ai pu diminuer la concentration de l'appât progressivement pour arriver à une solution contenant 10% de sucre et sans miel à la fin de l'apprentissage.
3. J'ai placé le banc de test le plus près possible de l'abreuvoir. j'ai dans un premier temps positionné un petit abreuvoir (appât liquide, 10% de sucre) sur le pas de la porte RFID, puis j'ai tourné l'abreuvoir à l'intérieur de la chambre de vol (Fig. 27). Dès que les abeilles sont entrées spontanément dans la boîte, j'ai retiré le petit abreuvoir et les abeilles ont butiné la cible (Fig. 23). Les abeilles ont appris en quelques heures à entrer par la porte de la chambre de vol et à se poser sur l'appât de la cible (sucre pur sans eau).

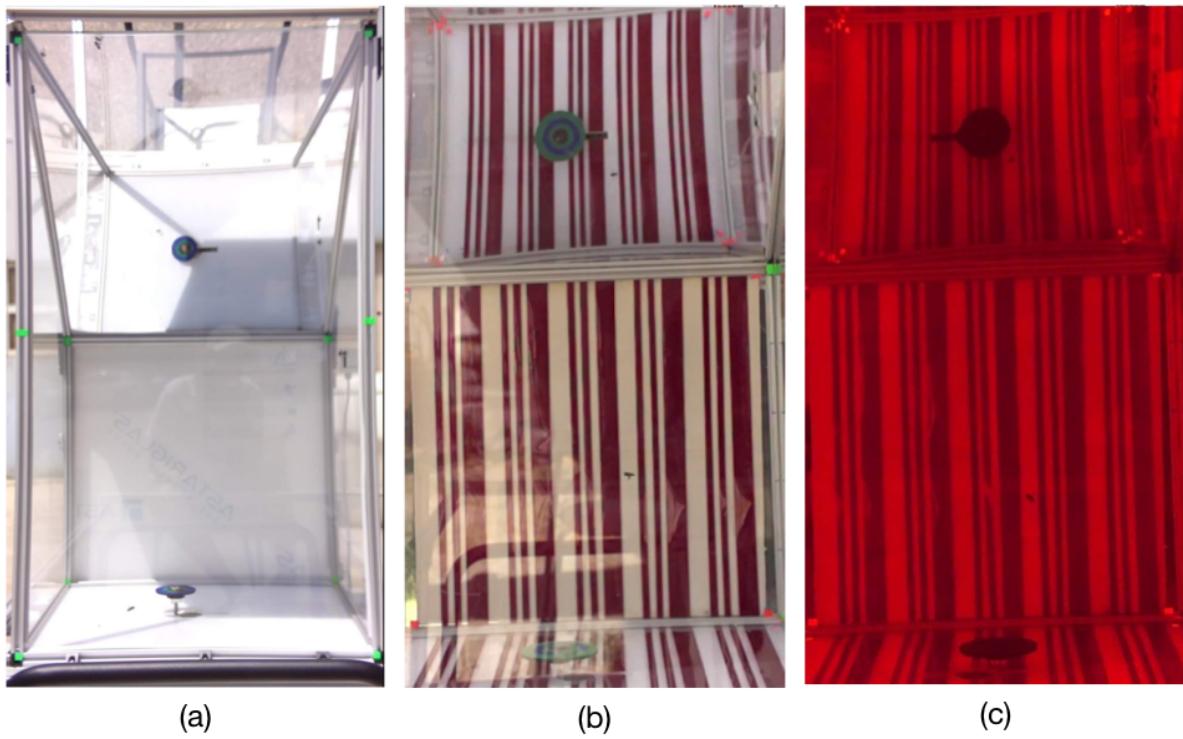


FIGURE 24 – Extrait de films des abeilles se posant sur la cible.

J'ai pris une première série de vidéos sans les bandes rouges (a). J'ai ensuite ajouté les bandes rouges (b). Puis, j'ai ajouté un filtre rouge sur la caméra pour éliminer plus facilement les bandes rouges lors du post-traitement des vidéos (c).



FIGURE 25 – Banc de test lors d'une expérimentation dans le hall extérieur.

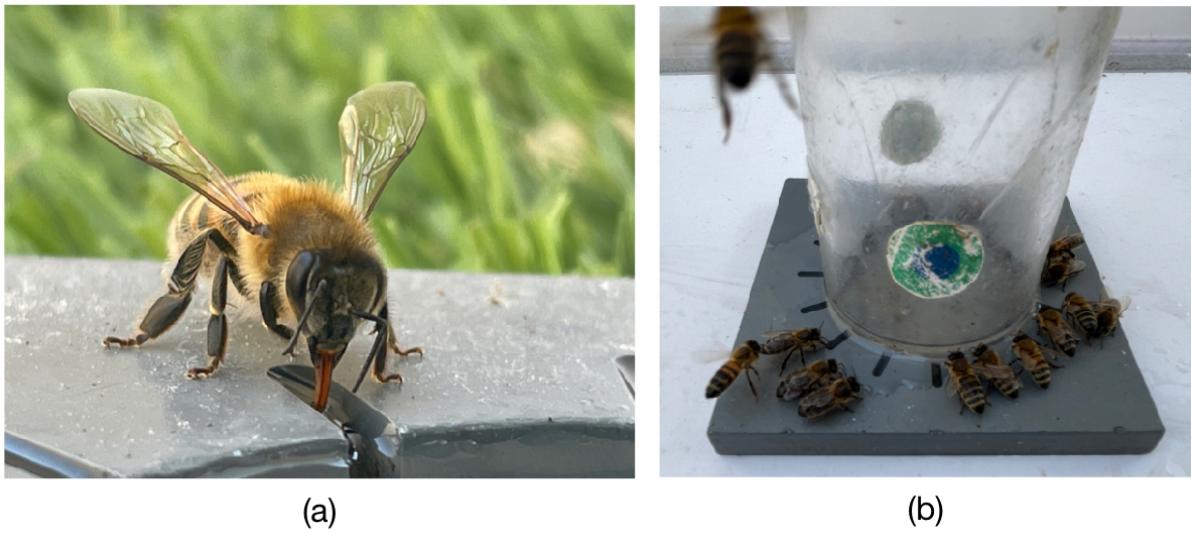


FIGURE 26 – Abeilles qui butinent sur le grand abreuvoir.

### 6.6.2 Protocole pour relever les données

Voici le protocole que j'ai suivi tous les jours pendant une semaine pour prendre mes vidéos (Fig. 24) :

1. Préparer la solution sucrée et la verser dans l'abreuvoir.
2. Transporter le banc de test depuis la salle des stagiaires vers le lieu d'expérimentation (Fig. 25).
3. Déplier et régler les pieds rétractables.
4. Installer la caméra.
5. Régler la distance focale de la caméra et la quantité de lumière entrante de l'objectif.
6. Brancher l'alimentation portative à la rallonge et brancher la pile 9V sur la carte Arduino.
7. Régler la tension de l'alimentation portative à 11.3 Volts.
8. Vérifier que le courant maximal que fournit l'alimentation est de 3.5 V (en court-circuitant les bornes de l'alimentation).
9. Brancher les bornes de l'alimentation aux moteurs.
10. Allumer l'alimentation et réinitialiser la carte Arduino.
11. Tester le bon fonctionnement des moteurs.
12. Placer une cible sur le cœur de la fleur.
13. Placer l'appât dans la cible.
14. Déclencher manuellement l'interrupteur et la caméra dès l'entrée d'une abeille (fil jaune enroulé sur le pied du banc de test sur la Fig. 25b).
15. Déclencher l'interrupteur et la caméra à la sortie de l'abeille.
16. Sauvegarder les vidéos sur un disque dur.

### 6.6.3 Discussions

Pour une concentration en sucre constante de 10% , la quantité d'abeilles sur l'abreuvoir était différente selon les jours et selon les heures. Sachant que la quantité d'abeilles attirée est proportionnelle à la concentration de l'appât, j'avais toujours de côté des solutions un peu plus et un peu moins concentrées (de 5% à 20%) pour réguler la quantité d'abeilles

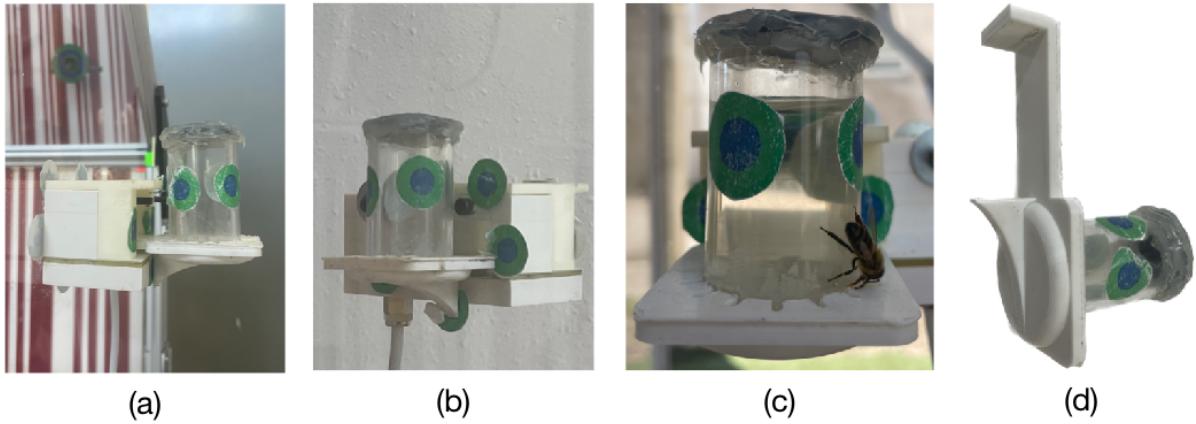


FIGURE 27 – Méthode pour apprendre aux abeilles à entrer dans la chambre de vol. On place une petite mangeoire sur le pas de la porte extérieure de la chambre de vol (a). Quand les abeilles trouvent spontanément l'appât (c), on retourne la mangeoire sur le pas intérieur de la porte (b). On retire la mangeoire et dépose du sucre sur la cible dès que l'abeille passe spontanément la porte. La mangeoire est conçue pour se fixer sur la porte RFID (d).

heures par heures. L'objectif étant d'avoir toujours environ 15 abeilles sur l'abreuvoir (Fig. 26, b). Plus d'abeilles aurait été dangereux, moins n'aurait pas permis de prendre assez de vidéos. Il faut donc constamment surveiller l'abreuvoir à abeilles.

Les abeilles entrant dans la chambre de vol ne savent pas ressortir par la porte RFID. Elles cherchent à sortir instinctivement par le coin le plus haut et le plus lumineux de la chambre de vol. Cela a provoqué une accumulation non voulue des abeilles dans la chambre de vol. J'ai donc, sous les conseils de l'apiculteur d'APIS AMU, conçu un prototype de "chasse abeilles". Ce dernier, placé sur le coin supérieur gauche de la chambre de vol, forme un cône dont la base est vers l'intérieur de la boîte, il permet de faire sortir les abeilles sans en faire rentrer.

J'ai conçu les algorithmes de traitement des données pour qu'ils ne se basent pas sur le temps de déclenchement exact de la caméra et du robot. Ainsi, les imprécisions dues au déclenchement manuel non automatisé ne sont pas un réel problème pour l'instant. Par contre, le déclenchement automatique sera indispensable à l'avenir pour construire un portail à l'entrée de la chambre de vol. Il se fermera automatiquement dès l'entrée d'une abeille et évitera donc la présence perturbatrice d'autres abeilles. Ce sera le portail RFID qui détectera en temps réel l'entrée d'une abeille.

## 6.7 Le traitement des données

Le traitement des données consiste à obtenir une trajectoire 3D de l'abeille en fonction du temps à partir des vidéos brutes fournies par la caméra. Il doit être répétable et être le plus automatisé possible. La trajectoire reconstruite doit être précise au millimètre près ( $\frac{1}{10^{eme}}$  de la taille d'une abeille).

J'ai réalisé tous mes algorithmes de traitement des données avec python. Ainsi, j'ai pu intégrer à mon travail des algorithmes libres de droits conçus et partagés par d'autres utilisateurs. De la même façon, j'ai partagé l'ensemble de mon travail sur GitHub [projet BeeDeckBot](#) (un réseau social dédié au partage de projets). Python est utilisable gratuitement contrairement à d'autres logiciels tels que MATLAB. Il était important pour mes

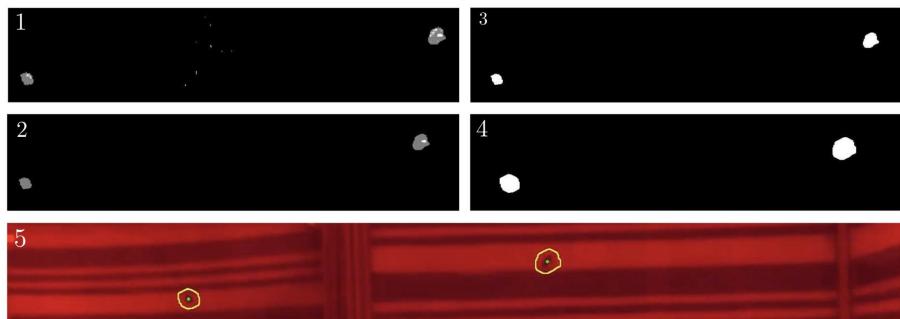


FIGURE 28 – Différentes étapes de transformations pour mettre en valeur l'abeille. Sur chaque image, il y a deux abeilles. C'est en fait la même abeille vue à la fois de face et reflétée dans le miroir. 1 : soustraction de l'arrière-plan. 2 : ouverture. 3 : binarisation. 4 : dilatation. 5 : le contour de l'abeille est dessiné sur l'image fournie par la caméra.

encadrants que j'utilise de préférence des logiciels gratuits pour rendre mon travail "Open Source" (reproductible et transformable par la communauté scientifique).

Les deux parties majeures de ma méthode de reconstruction de la trajectoire sont l'identification des abeilles puis leur suivi. Les abeilles sont identifiées et localisées sur chaque image que contient la vidéo. Sur une image, l'algorithme de suivi informe s'il s'agit de la même abeille que sur l'image précédente ou d'une autre. Il est ainsi possible d'éliminer les trajectoires parasites des éventuelles abeilles volant entre la chambre de vol et la caméra. À la suite de nombreux essais de plusieurs méthodes d'identification et de suivi, j'ai utilisé une méthode de soustraction de l'arrière-plan pour l'identification et un algorithme prêt à l'emploi appelé "[DeepSort](#)" pour le suivi.

### 6.7.1 La méthode de soustraction de l'image

Avec OpenCV, un package de Python, j'ai fait subir aux images des vidéos des transformations successives (Fig. 28) afin de mettre en valeur les abeilles (entre parenthèses le nom des transformations morphologiques utilisées) :

1. Détection et soustraction de l'arrière-plan.
2. Suppression des points gris parasites (ouverture).
3. Transformation des points gris en points blancs (binarisation).
4. Regroupement des points blanc proche l'un de l'autre indiquant la présence d'une même abeille en un seul (dilatation).
5. Détection du contour de chaque point et de leur centre.

La méthode de soustraction de l'arrière-plan ne peut pas dissocier une abeille superposée à la cible, car une abeille sur la fleur est perçue comme un unique élément en mouvement. Il n'est donc pas possible de connaître la position précise de l'abeille sur la cible. Une moindre vibration de la caméra décale l'image de fond et rend donc impossible l'identification des abeilles. Cette méthode ne pourra donc pas être conservée telle qu'elle pour la suite du projet. Contrairement à la méthode de soustraction de l'arrière-plan, l'identification des abeilles par Intelligence Artificielle - IA - (YOLOv8) ne se base pas sur un changement dans la scène visuelle, mais sur la reconnaissance d'objet dont l'identité a été apprise en amont à l'aide d'une grande base de données. La reconnaissance par l'IA identifie donc l'abeille d'une fleur à tout moment et est robuste à une image instable. Je n'ai pas pu mettre en place un système d'identification par l'IA pour mon banc de test, car la

construction d'une base de données (annotation d'environ 1000 images) aurait été très fastidieuse et le temps d'apprentissage de l'IA aurait été très long (environ 9 heures). J'ai par contre validé l'efficacité de la méthode par l'IA sur la reconnaissance d'une forme simple dans un contexte restreint (bille noire sur fond blanc) demandant une base de données moins importante (100 images) et un temps d'apprentissage court (1 heure). J'ai aussi validé l'efficacité de l'IA couplée avec la méthode de suivi des abeilles DeepSort.

### 6.7.2 La méthode de suivi des abeilles

DeepSort est un algorithme avancé de suivi d'objet. Il est basé sur les filtres de Kalman qui ont le gros avantage d'estimer la position future de l'abeille à partir de ces positions précédentes. La trace de l'abeille n'est donc pas perdue si elle sort du champ de vision ou se cache derrière la cible un court instant. J'ai remarqué que, si l'abeille change trop vite de direction où est invisible trop longtemps, elle est quand même perdue de vue (Fig. 29). En pratique, cela ne devrait pas poser de problème puisque seulement une abeille est présente dans la chambre de vol. Il est donc facile de reconstituer une unique trajectoire à partir de celles détectées par DeepSort. Cette méthode de suivi est parfaitement adaptée et il est possible de la garder pour la suite du projet.

### 6.7.3 Les résultats finaux

Mon algorithme d'identification et de suivi des abeilles retrace bien l'allure globale de la trajectoire de l'abeille qui se pose sur une cible immobile (Fig. 29). Je n'ai pas de retour exact sur l'erreur entre la trajectoire réelle de l'abeille et celle retracée, car je n'ai pas testé mes algorithmes avec un objet de la taille d'une abeille et de trajectoire connue. Par contre, je suis certaine que la position retranscrite de l'abeille à une précision moins bonne que 1 mm pour les raisons suivantes :

- Le miroir en plexiglas légèrement courbé déforme l'image reflétée (Fig. 24a-c).
- Le fond de la chambre de vol est reflété plus petit que la réalité en raison de sa distance qui le sépare du miroir (Fig. 30). La partie haute (image reflétée) et la partie basse (image réelle) des vidéos ne représentent donc pas des images à la même échelle. D'où la différence d'échelle entre l'axe Y de l'image réelle et celui de mon graphique.
- Il y a une très légère distorsion de l'image due à la géométrie de la lentille de l'objectif de la caméra et au défaut de parallélisme entre la caméra et la face avant de la chambre de vol.

Une calibration de la caméra peut résoudre tous ces problèmes. Les logiciels de calibration de caméra, utilisant une unique mire de calibration plane, corrigent uniquement la distorsion des images classiques dues à la perspective et à la géométrie de la lentille de la caméra. Ils ne corrigent donc pas les déformations dues au miroir courbé. Pour la suite du projet, il faudra donc calibrer la caméra à l'aide d'un cube de calibration et remplacer la méthode d'identification par soustraction de l'image par une méthode d'identification par IA.

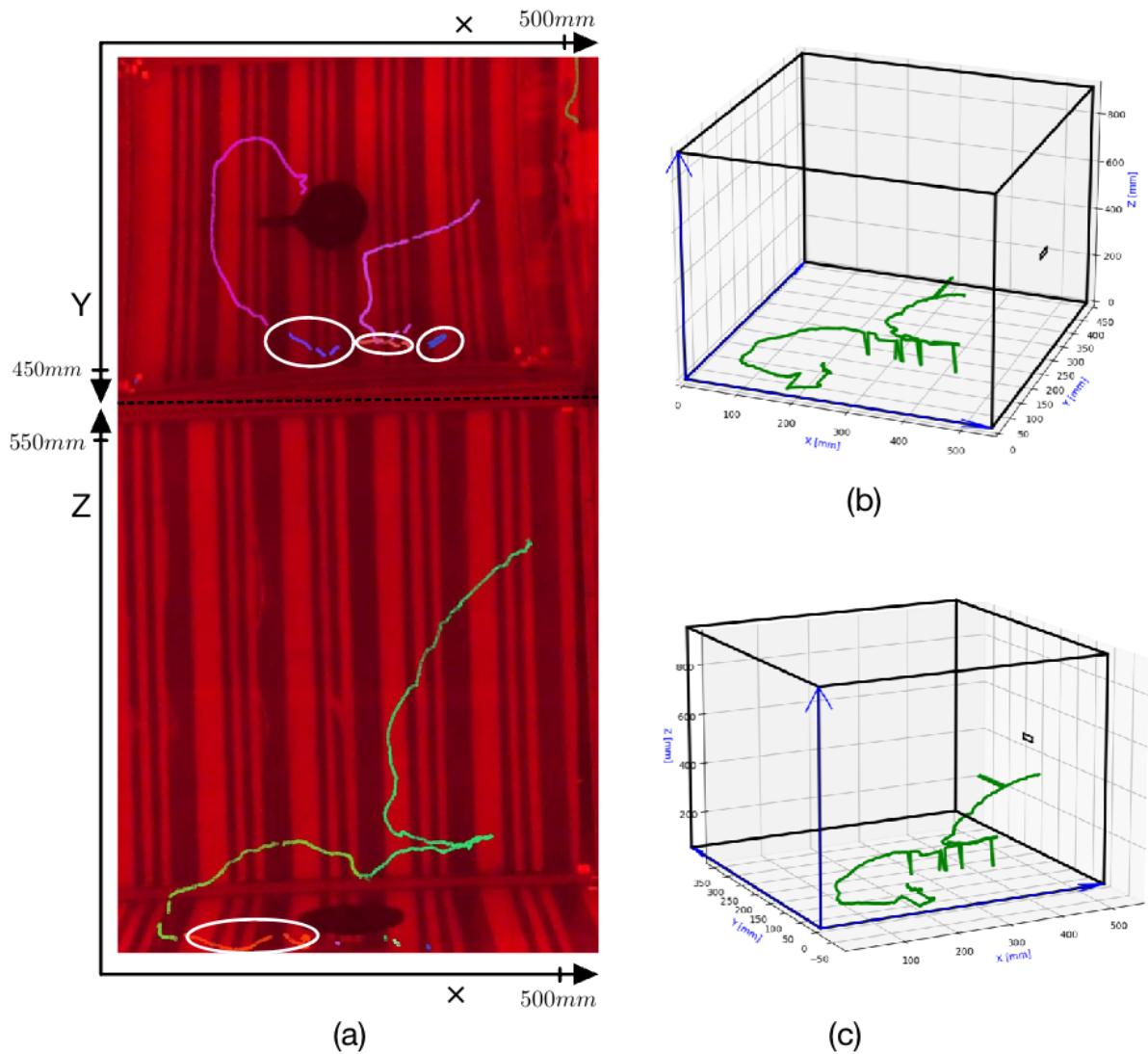


FIGURE 29 – Reconstitution de la trajectoire 3D de l'abeille avec la méthode de soustraction de l'arrière-plan et de DeepSort.

(a) Image réelle extraite d'une vidéo de la caméra sur laquelle mon algorithme a dessiné la trajectoire de l'abeille. Un changement de couleur du tracé indique que DeepSort a repéré une nouvelle abeille (entouré en blanc). Dans notre cas, il s'agit en réalité de la même abeille. (b et c) Deux vues de la trajectoire 3D reconstruite à partir des parties haute et basse de l'image de la caméra.

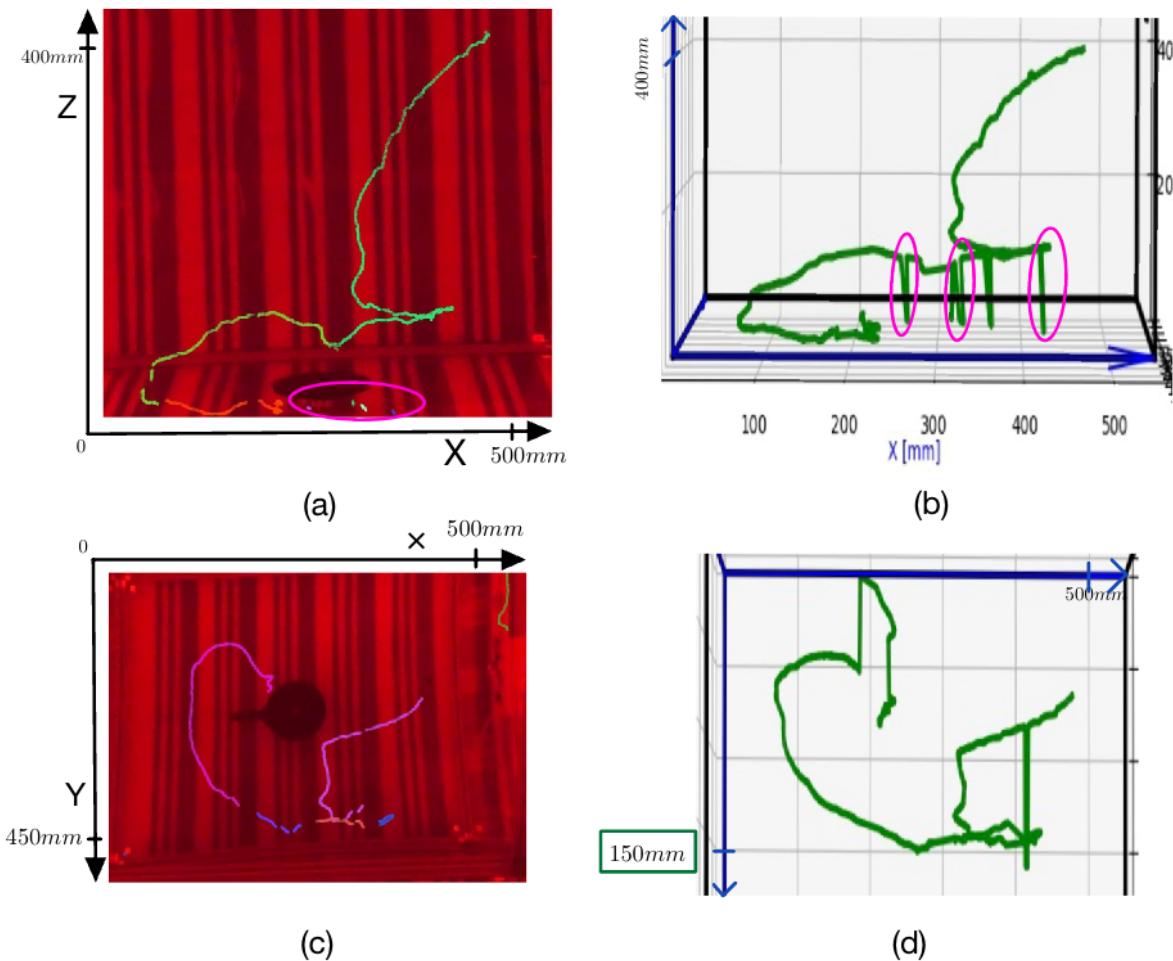


FIGURE 30 – Vues planes des trajectoires 3D.

(a et b) : Trajectoire vue de face. Les grosses discontinuités sur le tracé de la trajectoire sont dues aux fausses détections d'abeilles (entouré en rose). (c et d) Trajectoire vue du dessus, reflétée par le miroir. On remarque une différence d'échelle (encadré en vert) entre l'axe Y de l'image réelle (c) et l'axe de la reconstruction (d). La différence est due à la grande distance entre le miroir et le fond de la chambre de vol.

## 7 Retour d'expérience

### 7.0.1 Bilan de ce qui a fonctionné et de ce qui reste à améliorer sur le banc de test

Mon travail sur la construction mécanique du banc de test et sur le protocole pour filmer les abeilles de façon répétable peut être repris tel qu'il est. Une gestion automatique du flux entrant et sortant d'abeilles dans le futur rendrait le protocole de relevé des données plus simple. Il serait, par exemple, possible d'actionner une barrière dès la détection par la porte RFID de l'abeille entrante. Il serait aussi possible de fabriquer un système plus performant pour faire sortir les abeilles naturellement.

La partie sur l'identification de la trajectoire est à améliorer avant de pouvoir l'utiliser sur le banc de test. À l'issue de mes nombreuses explorations de méthodes, celle qui semble la plus performante est l'identification de l'abeille et de la cible par l'intelligence artificielle avec YOLOv8. La partie sur le suivi des abeilles avec DeepSort peut être dès maintenant réutilisée. Mon algorithme qui fait le lien entre l'identification et le suivi peut être réutilisé dès maintenant, car je l'ai conçu pour pouvoir remplacer facilement chacune des parties par différentes méthodes. Une calibration de la caméra et une correction de la distorsion de l'image reflétée par le miroir est indispensable.

### 7.0.2 Valorisations de mon travail après mon départ

Mon banc de test va être l'outil principal d'un(e) futur(e) doctorant(e) pendant au moins trois ans. Mon nom va apparaître dans les publications utilisant ma construction. J'ai rendu disponible l'ensemble de mon travail lié à mon [projet BeeDeckBot](#) à toute la communauté scientifique ainsi qu'au grand public en le déposant sur [GitHub](#). Des journalistes sont venus me filmer en train de relever la trajectoire d'abeilles à l'aide de mon banc de test. Je vais donc apparaître pendant 5 minutes d'un documentaire de 90 minutes appelé "Les secrets du vol dans la nature". Je vous invite à regarder ce film qui va sortir sur France 5 au printemps 2024 un jeudi soir.

### 7.0.3 Ce que j'ai appris techniquement

Les différentes missions de mon stage m'ont permis de développer des compétences indispensables pour ma poursuite de carrière en robotique bio-inspirée. J'ai appris à concevoir et à construire entièrement un banc de test en partant de seulement quelques consignes et d'articles scientifiques. J'ai utilisé le logiciel de Conception Assisté par Ordinataur (CAO) SolidWorks pour la réalisation de ma maquette numérique. J'ai utilisé différentes techniques de fabrication du fablab du laboratoire (découpe laser, impression 3D) pour la fabrication de la fleur robotique. J'ai dimensionné expérimentalement les profilés de la structure en aluminium afin qu'ils soient assez solides pour maintenir la chambre de vol, mais assez léger pour tenir sur le chariot. J'ai modélisé avec MATLAB la chaîne cinématique de transmission mécanique pour optimiser la transmission de puissance entre les moteurs et la cible. J'ai validé expérimentalement et par calculs numériques (MATLAB) la possibilité de continuer à utiliser les servo-moteurs déjà présents dans le laboratoire. J'ai établi leurs conditions d'utilisation quotidienne en faisant un compromis entre vitesse d'oscillation de la cible et durée de vie des moteurs. Je me suis auto formée à l'utilisation des outils basés sur de l'intelligence artificielle pour coupler différents modules open sources tels que YOLOv8 et OpenCV afin de détecter et de reconstruire la trajectoire 3D des abeilles. J'ai fait preuve de créativité pour construire la fleur robotique à partir des pièces du fablab du laboratoire. J'ai développé mon autonomie en décidant seule

de mes choix de conception avant de les faire valider par mes encadrants. J'ai appris à communiquer scientifiquement en rédigeant ce rapport et en déposant mes travaux sur GitHub.

#### 7.0.4 Ce que j'ai appris humainement

Même si mon stage s'est déroulé tranquillement, j'ai eu plusieurs doutes et difficultés, mais aussi de grandes satisfactions.

Je me suis demandé plusieurs fois si j'allais être capable de finir ma mission à temps. Mes doutes se sont amplifiés face aux imprévus. Par exemple, je n'avais pas anticipé dès le début de mon stage un délai si long entre le moment où je voulais acheter une nouvelle pièce et le moment où elle serait mise à ma disposition. J'avais bien en tête les délais de livraison, mais je n'avais pas prévu les contraintes et l'attente liées à la réalisation d'une commande chez un fournisseur encore inconnu de l'ISM. Je me suis aussi demandé si mon travail fourni était d'une qualité suffisante pour mes encadrants. Même si ces derniers m'ont tout de suite expliqué précisément ma mission, j'ai eu du mal à évaluer le degré de finition et de précision de mes livrables. J'ai dû aussi apprendre à gérer mon impatience face à l'attente des résultats de mon acceptation définitive en thèse.

Il m'a été parfois difficile de choisir parmi plusieurs idées. Par exemple, pour la reconstruction de la trajectoire 3D de l'abeille, bien que j'ai facilement trouvé et testé de nombreuses méthodes fonctionnant toutes à 80%, il a été plus difficile d'en choisir une seule et de l'approfondir pour la rendre totalement fonctionnelle. Sachant que toutes mes méthodes testées donneraient très probablement de bons résultats une fois approfondies, j'ai eu du mal à trouver une bonne raison supplémentaire d'en sélectionner une plutôt qu'une autre. J'ai sans doute commis l'erreur de passer trop de temps à approfondir encore chacune des méthodes plutôt que de me concentrer sur une seule.

J'ai douté de ma stratégie pour le choix des moteurs, c'est-à-dire conserver des moteurs tout juste assez puissants pour satisfaire le cahier des charges. Seule sur le projet, j'aurais investi sur des moteurs plus solides et puissants afin de ne pas avoir à perdre du temps par la suite à les réparer. J'ai finalement fait confiance à mes encadrants qui, ayant déjà travaillé sur des servomoteurs Dynamixel, m'ont dit que la maintenance autour de ceux-ci est simple et ne pose donc pas un véritable problème.

Je me suis aussi posé la question de l'impact réel sur la communauté scientifique des travaux utilisant mon banc de test. Même si j'y avais réfléchi au maximum, je ne savais pas à quel point mes choix de construction allaient apporter des biais expérimentaux. Je me suis par exemple posé la question d'utiliser des parois en plexiglas qui ne laisse pas passer les UVs, car ces derniers sont peut-être importants pour la navigation des abeilles. La validation de mes choix de conception par mes encadrants m'a rassuré et m'a permis de comprendre que l'éventuelle présence des biais expérimentaux auquel j'avais pensé n'empêcherait pas de publier de bons articles.

Il m'a été difficile de comprendre comment s'organise en détail un laboratoire de recherche, en particulier comment les projets de recherche sont initiés et financés. Mes encadrants m'ont expliqué tous ces mécanismes, mais étant uniquement stagiaire, je n'ai pas pu agir sur l'organisation globale de l'ISM. Cependant, j'ai eu la chance, dès le 2<sup>eme</sup> jour de mon stage, d'assister à une grande réunion dont l'objet était la restructuration totale de l'ISM. Ce jour-là, j'ai vu des personnes importantes telles que madame Martine PITHIOUX, la directrice de l'ISM. Elle en a présenté une vue globale (financier, humain, organisationnelle ...). J'ai pu, lors de cette journée, avoir un bon aperçu des projets de recherche de mon

équipe à travers des démonstrations concrètes. Parmi les projets qui ont retenu le plus mon attention se trouve celui de mon futur sujet de thèse.

La fin de mon stage a été récompensée par la satisfaction d'avoir un résultat concret qui va réellement servir à la communauté scientifique. Face à ma construction, j'ai compris que je suis capable de finaliser un projet de 6 mois. Ce constat a permis d'acquérir une certaine confiance en moi. Cette satisfaction est à mon sens plus importante que la réception de compliments non rationnels.

J'ai aussi été heureuse lorsque j'ai senti que j'orientais ma carrière vers un domaine qui semble vraiment me plaire. Avant ce stage, je ne pouvais pas vraiment dire comment je me vois dans 5 ans. Maintenant, je peux répondre à cette question et je trouve cela satisfaisant.

J'ai été vite intégrée humainement à l'équipe SBI, stagiaires et doctorants, mais aussi directeurs de recherche. Les échanges avec toutes ces personnes m'ont confirmé l'importance de se construire un réseau professionnel vaste et solide. Cela est d'autant plus vrai que je me trouve dans un milieu très spécialisé.

#### **7.0.5 Lien entre mon stage et mon projet professionnel**

Discuter avec plusieurs doctorants et chercheurs de mon équipe, assister à leur soutenance de thèse et être témoin de leur quotidien m'a donné envie de poursuivre le début de ma carrière dans la recherche. Mon goût pour la robotique bio-inspirée s'est confirmée au fil de mes missions. J'ai donc décidé de réaliser une thèse toujours au sein de l'équipe SBI avec des missions fréquentes au [Gipsa-Lab](#) de Grenoble. Mon directeur de thèse sera Dr. [Nicolas Marchand](#) (directeur du Gipsa-lab de Grenoble) et mon codirecteur sera Dr. [Franck Ruffier](#) (directeur de recherche au CNRS dans l'équipe SBI). Je vais optimiser la transition entre le vol plané et le vol battu / le vol battu et le vol plané d'un véhicule aérien à ailes battantes, inspiré des papillons et des oiseaux, pour améliorer son endurance, son agilité et sa vitesse de prise de décision. Ma thèse est cofinancée par la [direction générale de l'armement](#) (DGA). L'oiseau robotique biomimétique est fourni par l'entreprise [XTIM](#) à Marseille.

## **8 Conclusion**

En livrant une structure mécanique prête à l'emploi, et un protocole pour prendre les vidéos avec les abeilles, j'ai répondu aux principales attentes de mes encadrants. Mes résultats d'expérimentations de plusieurs méthodes d'identification et de suivi d'abeilles est une base de départ pour la construction d'un logiciel d'automatisation du traitement des données.

Les attentes que je me faisais de ce stage de six mois ont toutes été satisfaites. J'ai réalisé un projet passionnant avec des objectifs qui ont réellement du sens. Grâce à ce que j'ai appris techniquement et humainement, et par la construction d'un réseau professionnel solide, mon stage a été la porte d'entrée vers une carrière professionnelle en lien avec un grand nombre de mes divers centres d'intérêts.

## Références

- [1] James Jerome GIBSON. "The theory of affordances". In : *Hilldale, USA* 1.2 (1977).
- [2] Mark L WINSTON. *The biology of the honey bee*. Cambridge, MA, USA : Harvard University Press, 1987.
- [3] S ZHANG. "Visual tracking of moving targets by freely flying honeybees". In : *Visual neuroscience* 4(4) (1990), p. 379-386. DOI : <https://doi.org/10.1017/S0952523800004582>.
- [4] M SRINIVASAN. "How honeybees make grazing landings on flat surfaces". In : *Biological cybernetics* 83(3) (2000), p. 171-183. DOI : <http://dx.doi.org/10.1007/s004220000162>.
- [5] Erica FEUERBACHER et al. "Effects of load type (pollen or nectar) and load mass on hovering metabolic rate and mechanical power output in the honey bee *Apis mellifera*". In : *Journal of Experimental Biology* 206.11 (2003), p. 1855-1865. DOI : <https://doi.org/10.1242/jeb.00347>.
- [6] Brett R. FAJEN. "Calibration, information, and control strategies for braking to avoid a collision". eng. In : *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 31.3 (juin 2005), p. 480-501. ISSN : 0096-1523. DOI : <10.1037/0096-1523.31.3.480>.
- [7] Brett R. FAJEN. "Affordance-Based Control of Visually Guided Action". In : *Eco-logical Psychology* 19.4 (sept. 2007), p. 383-410. ISSN : 1040-7413. DOI : <10.1080/10407410701557877>. URL : <http://dx.doi.org/10.1080/10407410701557877>.
- [8] Numa BASILIO et al. "High- and Low-Order Overtaking-Ability Affordances : Drivers Rely on the Maximum Velocity and Acceleration of Their Cars to Perform Overtaking Maneuvers". en. In : *Human Factors : The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 57.5 (août 2015), p. 879-894. ISSN : 0018-7208, 1547-8181. DOI : <10.1177/0018720815583581>. URL : <http://hfs.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/0018720815583581>.
- [9] Geoffrey MARTI, Antoine H. P. MORICE et Gilles MONTAGNE. "Drivers' decision-making when attempting to cross an intersection results from choice between affordances". In : *Front. Hum. Neurosci.* 8 (jan. 2015). ISSN : 1662-5161. DOI : <10.3389/fnhum.2014.01026>. URL : <http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fnhum.2014.01026/abstract>.
- [10] Antoine H. P. MORICE et al. "An Affordance-Based Approach to Visually Guided Overtaking". en. In : *Ecological Psychology* 27.1 (jan. 2015), p. 1-25. ISSN : 1040-7413, 1532-6969. DOI : <10.1080/10407413.2015.991641>. URL : <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10407413.2015.991641>.
- [11] D CLARKE. "The bee, the flower, and the electric field : electric ecology and aerial electroreception". In : *Journal of Comparative Physiology A* 203(9) (2017), p. 737-748. DOI : <https://link.springer.com/article/10.1007/s00359-017-1176-6>.
- [12] J DUPEYROUX. "AntBot : A six-legged walking robot able to home like desert ants in outdoor environments". In : *Science Robotics* 4(27) (2019). DOI : <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aau0307>. URL : <https://amu.hal.science/hal-02075700>.

- [13] Scott T. STEINMETZ et al. “Affordance-based versus current-future accounts of choosing whether to pursue or abandon the chase of a moving target”. en. In : *Journal of Vision* 20.3 (mars 2020), p. 8. ISSN : 1534-7362. DOI : [10.1167/jov.20.3.8](https://doi.org/10.1167/jov.20.3.8). URL : <https://jov.arvojournals.org/article.aspx?articleid=2764056>.
- [14] Antoine HP MORICE et al. “Ecological design of augmentation improves helicopter ship landing maneuvers : An approach in augmented virtuality”. In : *PLoS one* 16.8 (2021), e0255779. DOI : <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0255779>.
- [15] Mathieu THOMAS et al. “Helicopter pilots synchronize their altitude with ship heave to minimize energy when landing on a ship’s deck”. In : *The International Journal of Aerospace Psychology* 31.2 (2021), p. 135-148. DOI : <https://doi.org/10.1080/24721840.2020.1862659>.
- [16] Aimie BERGER DAUXÈRE, Gilles MONTAGNE et Julien R SERRES. “An experimental setup for decoupling optical invariants in honeybees’ altitude control”. In : *Journal of Insect Physiology* 143 (2022), p. 104451. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.jinsphys.2022.104451>.
- [17] Damien RAMBEAU. *BeeDeckBot : a robotic platform to study the flower landing in honeybees*. Msc. thesis, Université de Montpellier, 2022.
- [18] Mathieu THOMAS et al. “Visual augmentation of deck-landing-ability improves helicopter ship landing decisions”. In : *Scientific Reports* 13.1 (2023), p. 5119. DOI : <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26770-2>.

## 9 Annexes

### 9.1 Diagramme de Gantt prévisionnel et réel.

|   | Février | Mars | Avril | Mai | Juin | Juillet |
|---|---------|------|-------|-----|------|---------|
| <i>Concevoir et fabriquer la chambre de vol.</i>  |         |      |       |     |      |         |
| <i>Choisir l'objectif de la caméra.</i>   |         |      |       |     |      |         |
| <i>Mettre en place le système de reconnaissance visuel des abeilles.</i>                      |         |      |       |     |      |         |
| <i>Concevoir et fabriquer la fleur robotique.</i>   |         |      |       |     |      |         |
| <i>Concevoir et fabriquer la structure métallique.</i>  |         |      |       |     |      |         |
| <i>Mettre en place le système de détections des abeilles à l'entrée de la chambre de vol.</i> |         |      |       |     |      |         |
| <i>Aprendre aux abeilles à se poser sur la cible.</i>   |         |      |       |     |      |         |

FIGURE 31 – Diagramme de Gantt prévisionnel.

|   | Février | Mars | Avril | Mai | Juin | Juillet |
|---|---------|------|-------|-----|------|---------|
| <i>Concevoir et fabriquer la chambre de vol.</i>  |         |      |       |     |      |         |
| <i>Choisir l'objectif de la caméra.</i>   |         |      |       |     |      |         |
| <i>Mettre en place le système de reconnaissance visuel des abeilles.</i>                      |         |      |       |     |      |         |
| <i>Concevoir et fabriquer la fleur robotique.</i>   |         |      |       |     |      |         |
| <i>Concevoir et fabriquer la structure métallique.</i>  |         |      |       |     |      |         |
| <i>Mettre en place le système de détections des abeilles à l'entrée de la chambre de vol.</i> |         |      |       |     |      |         |
| <i>Aprendre aux abeilles à se poser sur la cible.</i>   |         |      |       |     |      |         |

FIGURE 32 – Diagramme de Gantt réel.

## 9.2 Photos du banc de test

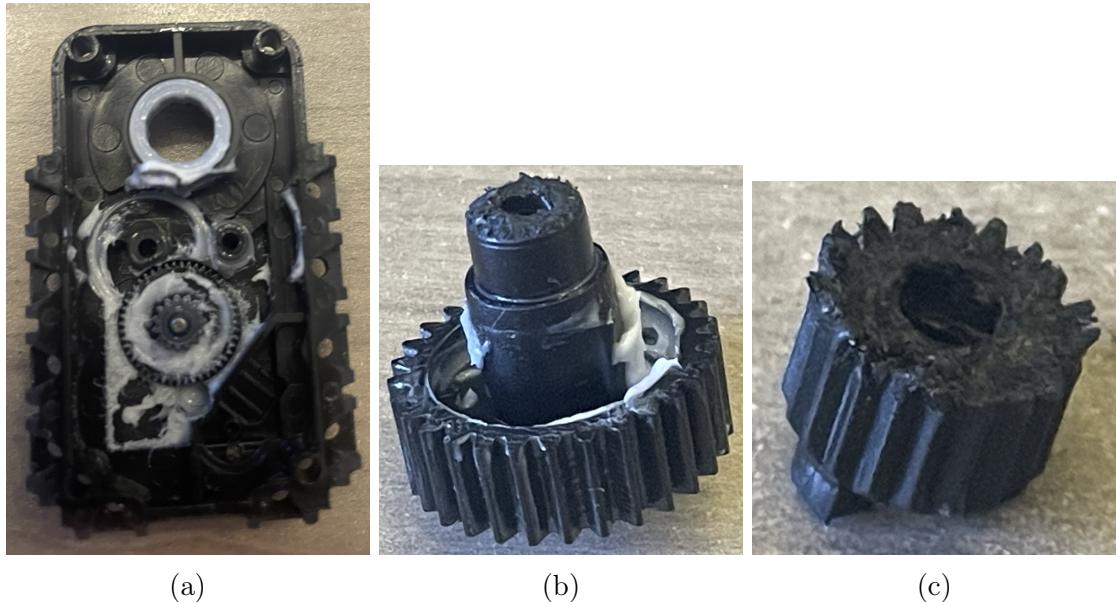
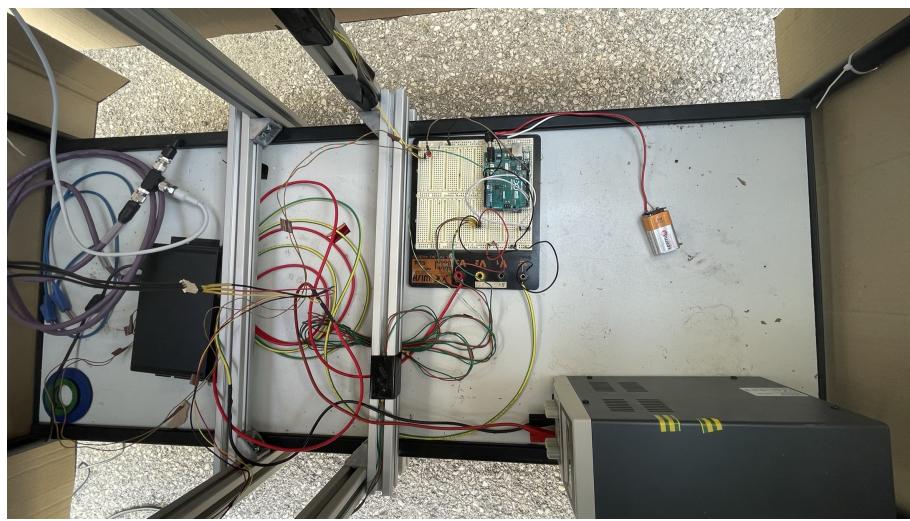
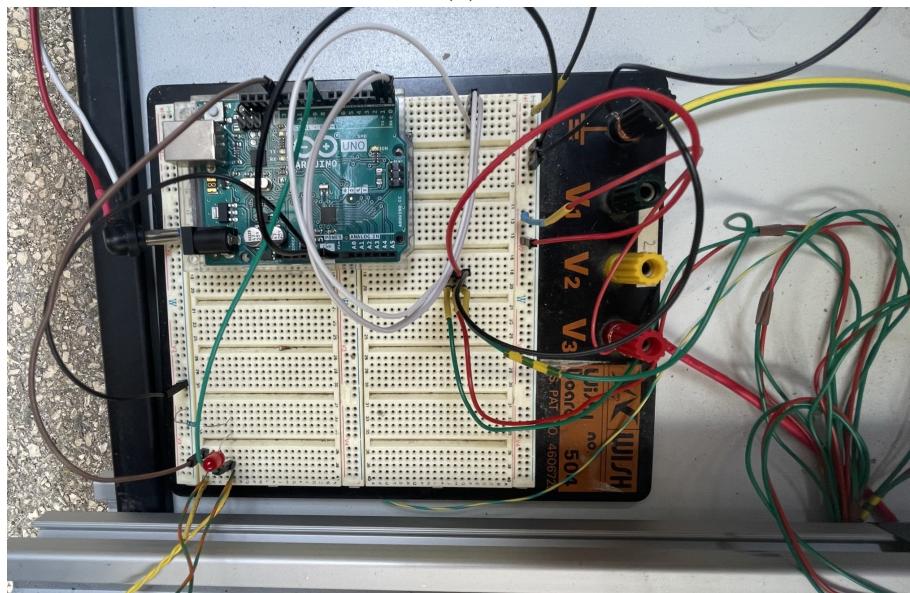


FIGURE 33 – Intérieur du moteur Dynamixel (a). Arbre du moteur cassé par des contraintes de torsions importantes (b et c).



(a)



(b)

FIGURE 34 – Câblage électronique réel du banc de test.

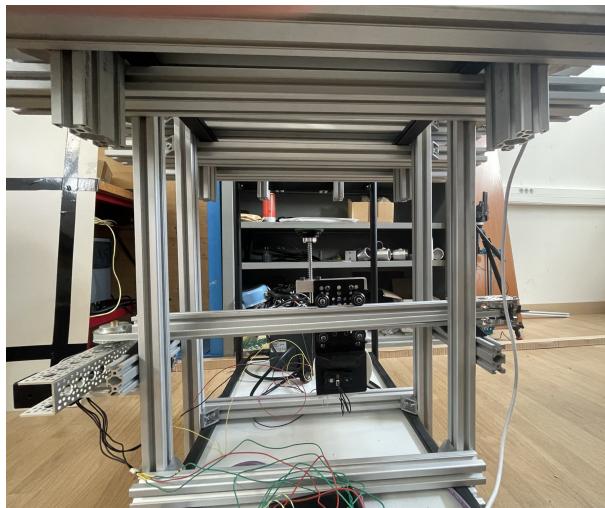


(a)

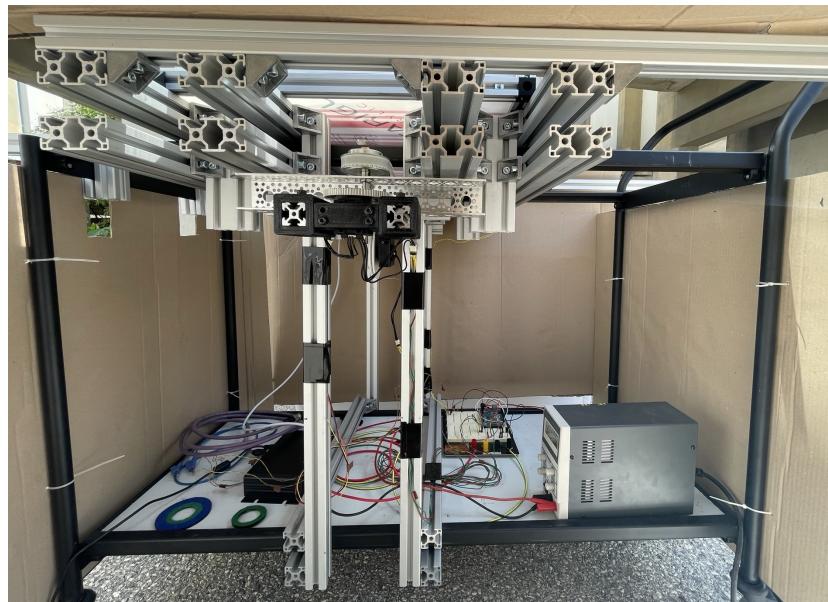


(b)

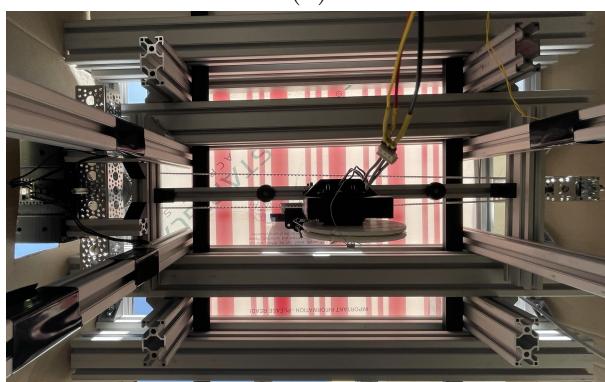
FIGURE 35 – Cible de différentes tailles (a). Filtre rouge de la caméra (b).



(a)

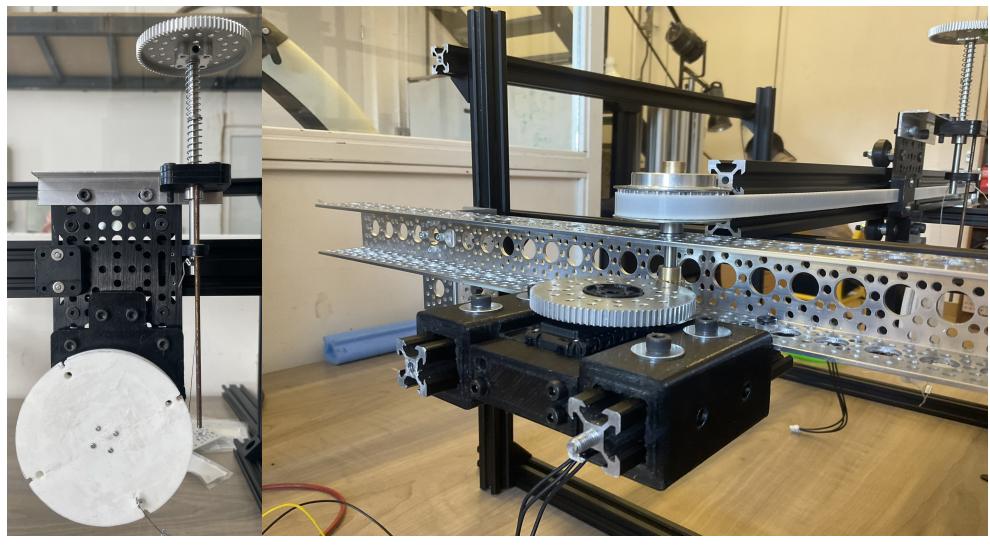


(b)



(c)

FIGURE 36 – Vue de l'intérieur du banc de test. (a) Vue de face. (b) Vue de côté. (c) Vue de dessous.



(a)

(b)

FIGURE 37 – Partie légère de la fleur robotique (a). Partie lourde de la fleur robotique (b).



FIGURE 38 – Chambre de vol vue de côté.

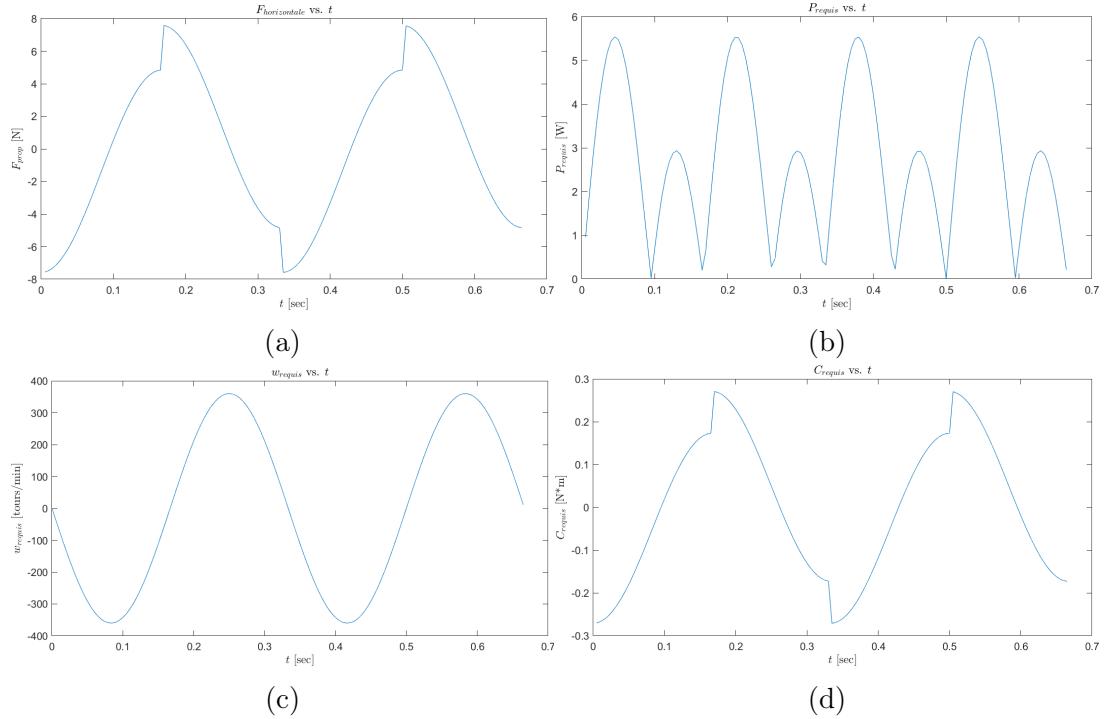


FIGURE 39 – Simulation de la force (a), puissance (b), vitesse de rotation (c) et couple (d) minimal(e) requis(e) au moteur de la partie légère de la fleur robotique sans le réducteur de couple pour  $f = 3$  Hz et  $A = 10$  cm.

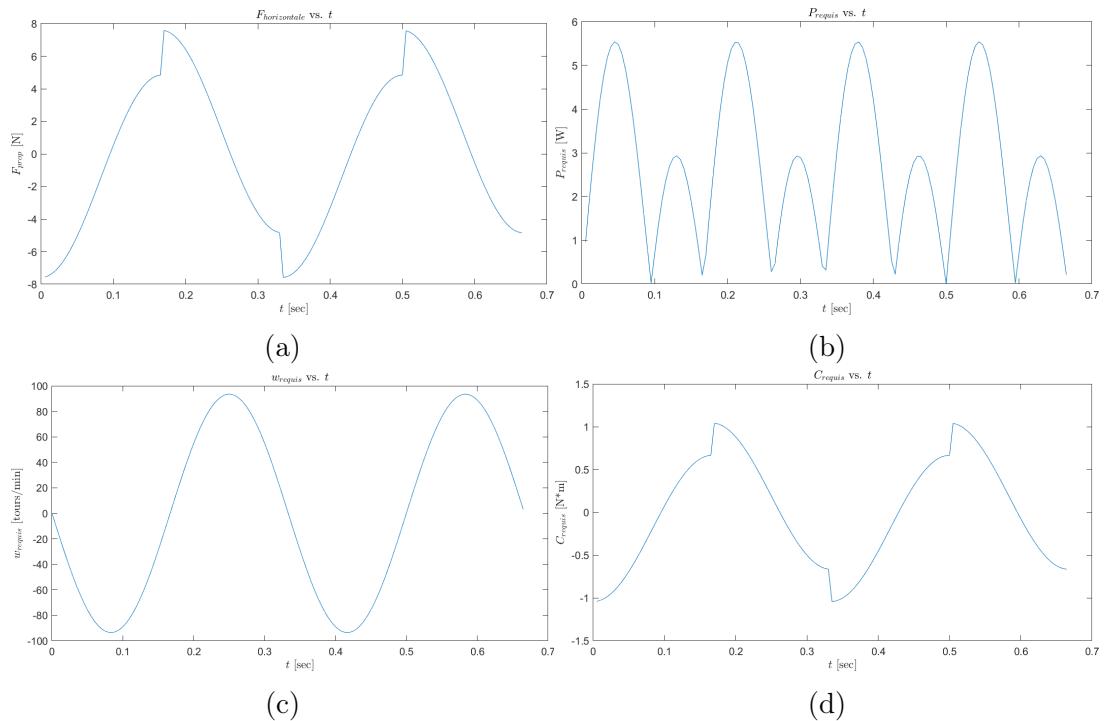


FIGURE 40 – Simulation de la force (a), puissance (b), vitesse de rotation (c) et couple (d) minimal(e) requis(e) au moteur de la partie légère de la fleur robotique avec le réducteur de couple pour  $f = 3$  Hz et  $A = 10$  cm.

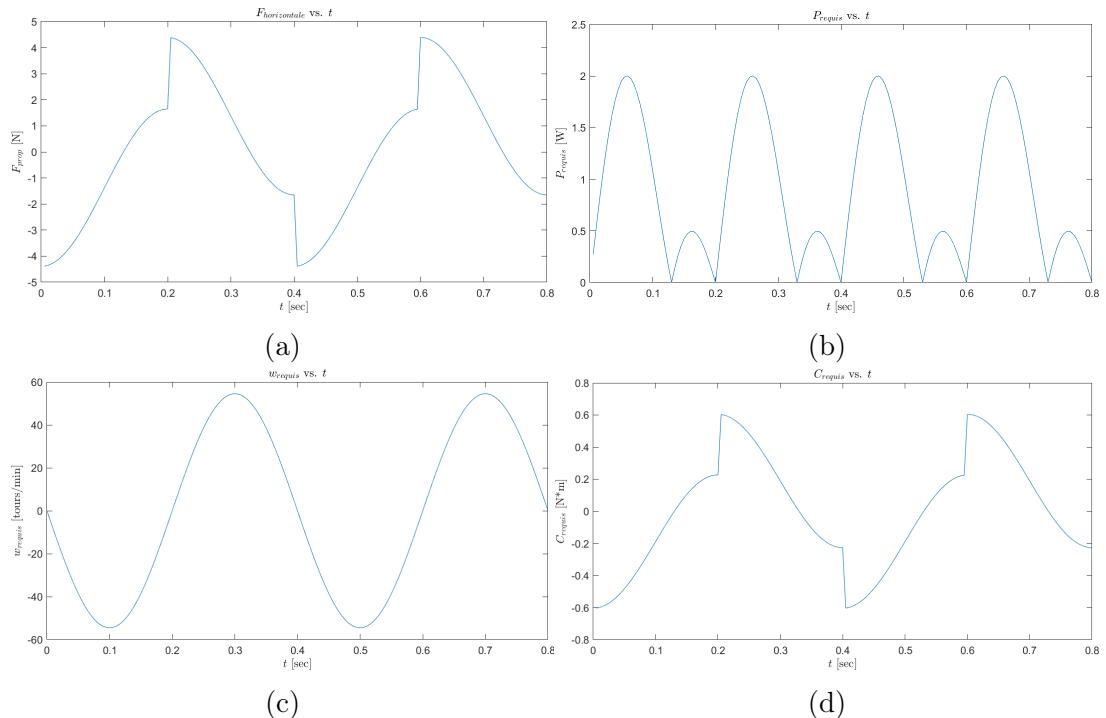


FIGURE 41 – Simulation de la force (a), puissance (b), vitesse de rotation (c) et couple (d) minimal(e) requis(e) au moteur de la partie légère de la fleur robotique avec le réducteur de couple pour  $f = 2.5$  Hz et  $A = 7$  cm.

**9.3 Devis pour les éléments de montage de la chambre de vol et de la structure métallique.**

**Adresse de livraison**

Institut des Sciences du Mouvement - ISM  
 Julien SERRES  
 163 avenue de Luminy  
 Bâtiment FSS  
 13009 Marseille  
 France Métropolitaine  
 0413945921  
 FR84130015332

**Adresse de facturation**

AMU ISM  
 3 place Victor Hugo  
 13003 Marseille  
 France Métropolitaine  
 0413945921  
 FR84130015332

| Numéro de facture | Date de facturation | Réf. de commande | Date de commande | Numéro de TVA |
|-------------------|---------------------|------------------|------------------|---------------|
| #FA025696         | 13/02/2023          | TVKQWZKBZ        | 10/02/2023       | FR84130015332 |

| Référence  | Produit  | Taux de taxe | Prix unitaire (HT) | Quantité | Total (HT) |
|--|--|--------------|--------------------|----------|------------|
| ECR-NYL-M5   | Ecrou frein M5   | 20 %         | 0,10 €             | 20       | 2,00 €     |
| ECR-P6-5-TPM   | Ecrous de fixation pour profilés à fente de 6 mm - Taraudage M5    | 20 %         | 0,36 €             | 30       | 10,80 €    |
| ENTR-AL-5-10-6   | Entretoise aluminium diamètre interieur 5 mm - Hauteur (mm) : 6 mm | 20 %         | 0,19 €             | 12       | 2,28 €     |
| ENTR-EXC-HEX10-6   | Entretoise excentrique Hex10 M5 x 6 mm                             | 20 %         | 0,39 €             | 12       | 4,68 €     |
| JOINT-L1-GRIS-6M   | Joint de calage épaisseur 1 mm - Gris                              | 20 %         | 28,80 €            | 3        | 86,40 €    |
| LOQT-CLS   | Loquet à coulisse  | 20 %         | 11,90 €            | 1        | 11,90 €    |
| GANTRY-PLATE-127-88  | Plateau Universel V-SLOT 127x88 mm                                 | 20 %         | 8,90 €             | 2        | 17,80 €    |
| GANTRY-PLATE-65-65   | Plateau V-SLOT 65x65mm   | 20 %         | 6,29 €             | 1        | 6,29 €     |
| 4-AS-6-2020-VSL OT   | Profilé aluminium V-SLOT 20x20 fente 6 mm                          | 20 %         | 11,14 €            | 2        | 22,29 €    |
| Personnalisation :   |  |              |                    |          | (2)        |
| <b>Longueur:</b> 700 mm<br><b>Ajouter un taraudage à gauche:</b> Oui<br><b>Ajouter un taraudage à droite:</b> Oui<br><b>Poids:</b> 0.3192 kg |  |              |                    |          |            |
| 4-AS-6-2020-VSL OT   | Profilé aluminium V-SLOT 20x20 fente 6 mm                          | 20 %         | 10,43 €            | 2        | 20,86 €    |
| Personnalisation :   |  |              |                    |          | (2)        |
| <b>Longueur:</b> 590 mm<br><b>Ajouter un taraudage à gauche:</b> Oui   |  |              |                    |          |            |



FACTURE  
13/02/2023  
#FA025696

Ajouter un taraudage à droite: Oui  
**Poids:** 0.26904 kg

4-AS-6-2020-VSL Profilé aluminium V-SLOT 20x20 fente 6 mm  
OT 20 % 9,85 € 4 39,38 €

Personnalisation : (4)

**Longueur:** 500 mm  
Ajouter un taraudage à gauche: Oui  
Ajouter un taraudage à droite: Oui  
**Poids:** 0.228 kg

4-AS-6-2020-VSL Profilé aluminium V-SLOT 20x20 fente 6 mm  
OT 20 % 10,17 € 3 30,51 €

Personnalisation : (3)

**Longueur:** 550 mm  
Ajouter un taraudage à gauche: Oui  
Ajouter un taraudage à droite: Oui  
**Poids:** 0.2508 kg

4-AS-6-2020-VSL Profilé aluminium V-SLOT 20x20 fente 6 mm  
OT 20 % 9,52 € 2 19,04 €

Personnalisation : (2)

**Longueur:** 450 mm  
Ajouter un taraudage à gauche: Oui  
Ajouter un taraudage à droite: Oui  
**Poids:** 0.2052 kg

4-AS-6-2020-VSL Profilé aluminium V-SLOT 20x20 fente 6 mm  
OT 20 % 12,90 € 2 25,79 €

Personnalisation : (2)

**Longueur:** 970 mm  
Ajouter un taraudage à gauche: Oui  
Ajouter un taraudage à droite: Oui  
**Poids:** 0.44232 kg

6-ASN-6-2040-VS Profilé aluminium V-SLOT 20x40 fente 6 mm -  
LOT Anodisé noir 20 % 11,90 € 2 23,80 €

Personnalisation : (2)

**Longueur:** 1000 mm  
**Poids:** 0.799 kg

RDL-8-5-1 Rondelles de précision 8x5x1 mm 20 % 0,10 € 30 3,00 €

WHL-VSLOT- DLRN Roue V-SLOT DELRIN 20 % 1,49 € 12 17,88 €



FACTURE  
13/02/2023  
#FA025696

|                       |  |      |        |      |         |
|-----------------------|--|------|--------|------|---------|
| MINI-WHL-VSLOT-DLRN   | Roue V-SLOT Mini DELRIN  | 20 % | 1,69 € | 4    | 6,76 €  |
| VIS-XP-CBM5-25        | Vis CHC tête basse M5x25   | 20 % | 0,19 € | 20   | 3,80 €  |
| VIS-XP-CBM5-30        | Vis CHC tête basse M5x30   | 20 % | 0,19 € | 10   | 1,90 €  |
| EQ-EXT-P6-2020-NOIR   | Equerre de fixation 20x20 pour profilés à fente de 6 mm - Noir       | 20 % | 3,25 € | 20   | 65,00 € |
| Personnalisation :    |  |      |        | (20) |         |
|                       | <b>Options:</b> Avec kit visserie (assemblage sur rainures)          |      |        |      |         |
| EQ-EXT-P6-2020-NOIR   | Equerre de fixation 20x20 pour profilés à fente de 6 mm - Noir       | 20 % | 2,65 € | 4    | 10,60 € |
| Personnalisation :    |  |      |        | (4)  |         |
|                       | <b>Options:</b> Avec kit visserie (assemblage en extrémité)          |      |        |      |         |
| RACC-CUB-P6-2020-NOIR | Raccord d'assemblage cubique pour profilés 20x20 mm - 3 voies - Noir | 20 % | 3,20 € | 6    | 19,20 € |
| Personnalisation :    |  |      |        | (6)  |         |
|                       | <b>Options:</b> Avec kit visserie                                    |      |        |      |         |
| CHAR-DC-AL-P6-20      | Charnière en aluminium pour profilé fente de 6 mm                    | 20 % | 2,95 € | 4    | 11,80 € |
| Personnalisation :    |  |      |        | (4)  |         |
|                       | <b>Options:</b> Avec kit visserie                                    |      |        |      |         |

| Détail des taxes | Taux de taxe | Prix de base | Taxe totale |
|------------------|--------------|--------------|-------------|
| Produits         | 20.000 %     | 463,75 €     | 92,76 €     |
| Livraison        | 20.000 %     | 14,66 €      | 2,93 €      |

|                    |                 |
|--------------------|-----------------|
| Total produits     | 463,75 €        |
| Frais de livraison | 14,66 €         |
| <b>Total (HT)</b>  | <b>478,41 €</b> |
| <b>Taxe totale</b> | <b>95,69 €</b>  |
| <b>Total</b>       | <b>574,10 €</b> |

|   |
|---|
| Commentaire   |
| Le service livraison est ouvert du lundi au vendredi uniquement le matin avant 13h. |

|                   |                                       |          |
|-------------------|---------------------------------------|----------|
| Moyen de paiement | Carte bancaire (BNP Paribas - Axepta) | 574,10 € |
| Transporteur      | GLS (Longueur max 1,2m)               |          |



FACTURE  
09/05/2023  
#FA027032

#### Adresse de livraison

Institut des Sciences du Mouvement - ISM  
Julien SERRES  
163 avenue de Luminy  
Bâtiment FSS  
13009 Marseille  
France Métropolitaine  
0413945921  
FR84130015332

#### Adresse de facturation

AMU ISM  
3 place Victor Hugo  
13003 Marseille  
France Métropolitaine  
0413945921  
FR84130015332

| Numéro de facture | Date de facturation | Réf. de commande | Date de commande | Numéro de TVA |
|-------------------|---------------------|------------------|------------------|---------------|
| #FA027032         | 09/05/2023          | ENIJAN3WZ        | 09/05/2023       | FR84130015332 |

| Référence   | Produit   | Taux de taxe | Prix unitaire (HT) | Quantité | Total (HT) |
|---|---|--------------|--------------------|----------|------------|
| ECR-P8-6-TPM  | Ecrous de fixation pour profilés à fente de 8 mm - Taraudage M6 | 20 %         | 0,35 €             | 30       | 10,50 €    |
| ECR-P8-8-TPM  | Ecrous de fixation pour profilés à fente de 8 mm - Taraudage M8 | 20 %         | 0,39 €             | 10       | 3,90 €     |
| ECR-MA-P6-5   | Ecrous marteau M5 - fente de 6 mm                               | 20 %         | 0,19 €             | 10       | 1,90 €     |
| BT-CTC-D25  | Pied/Butée caoutchouc   | 20 %         | 1,09 €             | 4        | 4,36 €     |
| 4-AS-8-3030-SA                                      | Profilé aluminium 30x30 fente 8 mm                              | 20 %         | 19,80 €            | 4        | 79,20 €    |
| Personnalisation :                                  |   |              |                    |          | (4)        |
| <b>Longueur:</b> 2000 mm<br><b>Poids:</b> 1.68 kg   |   |              |                    |          |            |
| 4-AS-8-3030-SA                                      | Profilé aluminium 30x30 fente 8 mm                              | 20 %         | 4,70 €             | 4        | 18,81 €    |
| Personnalisation :                                  |   |              |                    |          | (4)        |
| <b>Longueur:</b> 475 mm<br><b>Poids:</b> 0.399 kg   |   |              |                    |          |            |
| 4-AS-8-3030-SA                                      | Profilé aluminium 30x30 fente 8 mm                              | 20 %         | 6,49 €             | 4        | 25,98 €    |
| Personnalisation :                                  |   |              |                    |          | (4)        |
| <b>Longueur:</b> 656 mm<br><b>Poids:</b> 0.55104 kg |   |              |                    |          |            |
| 4-AS-8-3030-SA                                      | Profilé aluminium 30x30 fente 8 mm                              | 20 %         | 3,49 €             | 4        | 13,96 €    |
| Personnalisation :                                  |   |              |                    |          | (4)        |
| <b>Longueur:</b> 100 mm<br><b>Poids:</b> 0.084 kg   |   |              |                    |          |            |



FACTURE  
09/05/2023  
#FA027032

|                    |   |      |         |     |          |
|--------------------|---|------|---------|-----|----------|
| 4-AS-8-3030-SA     | Profilé aluminium 30x30 fente 8 mm        | 20 % | 3,96 €  | 2   | 7,92 €   |
| Personnalisation : |   |      |         | (2) |          |
|                    | <b>Longueur:</b> 400 mm                   |      |         |     |          |
|                    | <b>Poids:</b> 0.336 kg                    |      |         |     |          |
| 4-AS-8-3030-SA     | Profilé aluminium 30x30 fente 8 mm        | 20 % | 8,52 €  | 1   | 8,52 €   |
| Personnalisation : |   |      |         | (1) |          |
|                    | <b>Longueur:</b> 861 mm                   |      |         |     |          |
|                    | <b>Poids:</b> 0.72324 kg                  |      |         |     |          |
| 4-AS-8-3030-SA     | Profilé aluminium 30x30 fente 8 mm        | 20 % | 6,44 €  | 1   | 6,44 €   |
| Personnalisation : |   |      |         | (1) |          |
|                    | <b>Longueur:</b> 650 mm                   |      |         |     |          |
|                    | <b>Poids:</b> 0.546 kg                    |      |         |     |          |
| 4-AS-8-3030-SA     | Profilé aluminium 30x30 fente 8 mm        | 20 % | 7,43 €  | 1   | 7,43 €   |
| Personnalisation : |   |      |         | (1) |          |
|                    | <b>Longueur:</b> 750 mm                   |      |         |     |          |
|                    | <b>Poids:</b> 0.63 kg                     |      |         |     |          |
| 6-AS-8-3060-SA     | Profilé aluminium 30x60 fente 8 mm        | 20 % | 13,43 € | 8   | 107,40 € |
| Personnalisation : |   |      |         | (8) |          |
|                    | <b>Longueur:</b> 750 mm                   |      |         |     |          |
|                    | <b>Poids:</b> 1.1475 kg                   |      |         |     |          |
| 6-AS-8-3060-SA     | Profilé aluminium 30x60 fente 8 mm        | 20 % | 5,96 €  | 4   | 23,84 €  |
| Personnalisation : |   |      |         | (4) |          |
|                    | <b>Longueur:</b> 150 mm                   |      |         |     |          |
|                    | <b>Poids:</b> 0.2295 kg                   |      |         |     |          |
| 6-AS-8-3060-SA     | Profilé aluminium 30x60 fente 8 mm        | 20 % | 5,96 €  | 1   | 5,96 €   |
| Personnalisation : |   |      |         | (1) |          |
|                    | <b>Longueur:</b> 300 mm                   |      |         |     |          |
|                    | <b>Poids:</b> 0.459 kg                    |      |         |     |          |
| 4-AS-6-2020-VSL    | Profilé aluminium V-SLOT 20x20 fente 6 mm | 20 % | 1,96 €  | 2   | 3,92 €   |
| OT                 |   |      |         |     |          |
| Personnalisation : |   |      |         | (2) |          |
|                    | <b>Longueur:</b> 160 mm                   |      |         |     |          |

SYSTEAL - 17 rue des campanules - 77185 LOGNES - France Métropolitaine

Pour toute assistance, merci de nous contacter :

Tél. : 09 86 79 59 12 Fax : 09 81 40 34 26

Systéal est une marque de la Société Distilib Technologies SARL au capital de 63400€ RCS 525009478 MEAUX - SIRET 525 009 478 00054 N° TVA intracommunautaire FR64525009478 Code APE 4649Z Siège social : 17 rue des campanules 77185 LOGNES Email : commercial@systeal.com Coordonnées bancaires : IBAN : FR76 3000 4009 6400 0100 7102 644 BIC : BNPAFRPPXXX RIB : 30004 00964 00010071026 44 Conditions générales de vente : <https://www.systeal.com/fr/content/3-conditions-generales>

|   |  |      |        |    |          |
|---|--|------|--------|----|----------|
| <b>Poids:</b> 0.07296 kg                                    |  |      |        |    |          |
| 4-AS-6-2020-VSL OT  | Profilé aluminium V-SLOT 20x20 fente 6 mm                      | 20 % | 3,57 € | 1  | 3,57 €   |
| Personnalisation :  |  |      |        |    | (1)      |
| <b>Longueur:</b> 550 mm<br><b>Poids:</b> 0.2508 kg          |  |      |        |    |          |
| 6-AS-6-2040-VSL OT  | Profilé aluminium V-SLOT 20x40 fente 6 mm                      | 20 % | 3,63 € | 2  | 7,26 €   |
| Personnalisation :  |  |      |        |    | (2)      |
| <b>Longueur:</b> 230 mm<br><b>Poids:</b> 0.18377 kg         |  |      |        |    |          |
| 6-AS-6-2040-VSL OT  | Profilé aluminium V-SLOT 20x40 fente 6 mm                      | 20 % | 6,27 € | 1  | 6,27 €   |
| Personnalisation :  |  |      |        |    | (1)      |
| <b>Longueur:</b> 575 mm<br><b>Poids:</b> 0.459425 kg        |  |      |        |    |          |
| RDL-M8x18x1,5   | Rondelle plate M8x18x1,5                                       | 20 % | 0,10 € | 10 | 1,00 €   |
| VIS-XP-CBM5-8   | Vis CHC tête basse M5x8  | 20 % | 0,15 € | 10 | 1,50 €   |
| VIS-CBM6-10   | Vis de fixation - Filetage M6x10 - Tête à six pans creux       | 20 % | 0,26 € | 30 | 7,80 €   |
| EQ-EXT-P8-2727  | Equerre de fixation 27x27 pour profilés à rainure de 8 mm      | 20 % | 2,79 € | 70 | 195,30 € |
| Personnalisation :  |  |      |        |    | (70)     |
| <b>Options:</b> Avec kit visserie                           |  |      |        |    |          |
| EQ-EXT-P6-2020-NOIR   | Equerre de fixation 20x20 pour profilés à fente de 6 mm - Noir | 20 % | 3,25 € | 30 | 97,50 €  |
| Personnalisation :  |  |      |        |    | (30)     |
| <b>Options:</b> Avec kit visserie (assemblage sur rainures) |  |      |        |    |          |
| ML-ANG-90   | Connecteur d'angle 90° Makerlink                               | 20 % | 1,20 € | 4  | 4,80 €   |
| Personnalisation :  |  |      |        |    | (4)      |
| <b>Options:</b> Avec kit visserie                           |  |      |        |    |          |

| Détail des | Taux de taxe | Prix de base | Taxe totale | Total produits | 655,03 € |
|------------|--------------|--------------|-------------|----------------|----------|
|------------|--------------|--------------|-------------|----------------|----------|



FACTURE  
09/05/2023  
#FA027032

| taxes     |          |          |          |
|-----------|----------|----------|----------|
| Produits  | 20.000 % | 655,03 € | 131,00 € |
| Livraison | 20.000 % | 35,78 €  | 7,16 €   |

|                    |                 |
|--------------------|-----------------|
| Frais de livraison | 35,78 €         |
| <b>Total (HT)</b>  | <b>690,81 €</b> |
| <b>Taxe totale</b> | <b>138,16 €</b> |
| <b>Total</b>       | <b>828,97 €</b> |

| Commentaire                            |
|--|
| Livraison possible le matin, avant 13h |

|                   |                                       |          |
|-------------------|---------------------------------------|----------|
| Moyen de paiement | Carte bancaire (BNP Paribas - Axepta) | 828,97 € |
| Transporteur      | GLS (Longueur max 2m)                 |          |