

Rapport de projet industriel d'ingénierie

MODÉLISATION DE LA MAQUETTE NUMÉRIQUE DE LA CABINE DU



Tony BUI
Paul GALLET
Hugo JONNERY
Hugo TY
Thomas VIZET

Xavier DUTERTRE
www.mini-bee.com

ESTACA SQY • 3^e année
2022-2023

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre gratitude envers toutes les personnes et les organisations qui ont contribué à la réalisation de ce projet ambitieux de conception d'un VTOL innovant : le Mini-Bee de Technoplane.

Tout d'abord, nous remercions Xavier DUTERTRE, le Président et fondateur de Technoplane, pour son encadrement, ses conseils et son soutien tout au long de l'année.

Nous remercions également notre école d'ingénieur, l'ESTACA pour nous avoir donné l'opportunité de participer à ce projet stimulant et passionnant.

Nous tenons également à remercier les écoles d'ingénieurs partenaires durant cette année 2022-2023 pour leur collaboration au projet : Centrale Lille, CY Tech et ESIGELEC, ainsi que le campus d'ESTACA Bordeaux.

Nous sommes également reconnaissants envers toutes les personnes qui ont contribué à ce projet, permettant de créer, ensemble, un aéronef donnant la possibilité de transporter des médecins vers des zones difficiles d'accès.

Nous sommes fiers du travail accompli et espérons que notre modélisation de la maquette numérique du Mini-Bee sera utile pour les futurs projets de conception de VTOL.

Écoles partenaires en 2022-2023



Revue de faisabilité
technologique



Maquette du FCU à partir
des composants STM



Test des rotors de la
motorisation hybride



3SQY : • **Maquette numérique**
• Propulsion hybride

3BDX : • Chaîne de propulsion
• Maquette structure

4SQY : FCU et commandes de vol

Table des matières

Introduction	1
1 Réflexions sur la cabine	2
1.1 Cahier des charges spécifique	2
1.2 Différents aménagements et vues 2D	3
1.3 Comparaison avec le Robinson R22	4
2 Modélisation 3D de la structure	5
2.1 Évolution de la cabine et vues 3D	5
2.2 Renforts	6
2.3 Portière	8
3 Éléments internes à la cabine	9
3.1 Motorisation	9
3.1.1 Cahier des charges spécifique	9
3.1.2 Évolution de la modélisation de l'ensemble moteur	9
3.1.3 Accroche du moteur	10
3.1.4 Intercooler	12
3.1.5 Accessoires du moteur	12
3.1.6 Bilan	13
3.2 Aménagement intérieur	13
3.2.1 Tableau de bord et commandes de vol	13
3.2.2 Sièges et vérins	15
4 Éléments périphériques	17
4.1 Composants extérieurs	17
4.1.1 Système de trains d'atterrissage	17
4.1.2 Structure supérieure	18
4.1.3 Parachute	19
4.2 Transport en conteneur LD3	20
4.2.1 Réflexion sur l'ouverture du conteneur LD3	21
4.2.2 Réflexion sur le chargement du Mini-Bee	21
4.2.3 Solution retenue : conteneur LD3 démontable	22
5 Performances	23
5.1 Consommation	23
5.2 Matériaux et bilan des masses	25
Conclusion	28
Annexes	29

Table des illustrations

Figure 1 : Évolution de la maquette numérique entre 2017 et 2022	2
Figure 2 : Cahier des charges spécifique du Mini-Bee	2
Figure 3 : Tableau récapitulatif des différents aménagements	3
Figure 4 : Représentation du Robinson R22.....	4
Figure 5 : Cabine du Mini-Bee	4
Figure 6 : Tableau comparatif des dimensions du R22 et du Mini-Bee	4
Figure 7 : Évolution de la modélisation numérique du Mini-Bee	5
Figure 8 : Dimensions de la section droite d'un renfort	6
Figure 9 : Les 3 points les plus solides du plafonnier	6
Figure 10 : Maquette physique à taille réelle en tubes PVC (Avril 2023)	7
Figure 11 : Évolution de la portière.....	8
Figure 12 : Évolution de la modélisation de l'ensemble moteur	10
Figure 13 : Berceau de l'accroche (5 Janvier 2023).....	10
Figure 14 : Accroche en X des Emrax (5 Janvier 2023).....	10
Figure 15 : Accroche du moteur en structure tubulaire (21 Février 2023).....	11
Figure 16 : Ensemble moteur final avec son nouveau boîtier de liaison (9 Mai 2023).....	11
Figure 17 : Rangement de la cabine avec intercooler dans un conteneur LD3	12
Figure 18 : Matrice de cotation pour le tableau de bord.....	13
Figure 19 : Modélisation du siège sur-mesure.....	15
Figure 20 : Modifications sur la configuration des sièges.....	15
Figure 21 : Matrice de cotation pour la hauteur du seuil sous les sièges.....	16
Figure 22 : Matrice de cotation pour le choix du type de trains.....	17
Figure 23 : Diagramme en pieuvre du trépied à roue.....	17
Figure 24 : Schéma cinématique du trépied à roue	17
Figure 25 : Modèle 3D de la structure supérieure développé par Centrale Lille.....	19
Figure 26 : Représentations schématiques de l'intégration de la structure supérieure	19
Figure 27 : Propositions pour l'emplacement du parachute	20
Figure 28 : Conteneur LD3 à ouverture latérale	21
Figure 29 : Conteneur LD3 à ouverture de face	21
Figure 30 : Conteneur LD3 démontable	22
Figure 31 : Matrice de cotation pour l'ouverture du conteneur LD3	22
Figure 32 : Conso totale pour parcourir 600 km selon différents scénarios	23
Figure 33 : Conso totale en fonction du % de la manette des gaz pour parcourir 600 km	24
Figure 34 : Récapitulatif des caractéristiques des composants principaux de la cabine.....	25
Figure 35 : Répartition d'aluminium et de toile dans la structure n°2	25
Figure 36 : Bilans des masses des structures n°1 et n°2 ainsi que des renforts	26
Figure 37 : Bilan des masses global selon la structure sélectionnée	27

Table des annexes

Organisation du travail	29
Annexe 1 : Work Breakdown Structure (WBS).....	29
Annexe 2 : Diagramme de Gantt.....	29
Autres tableaux	30
Annexe 3 : Fiche technique du parachute GRS 6 800-990.....	30
Annexe 4 : Tableaux de la puissance moteur et de la conso horaire	31
Câbles électriques.....	31
Annexe 5 : Représentation schématique du circuit électrique présent dans le Mini-Bee	31
Annexe 6 : Représentation schématique de l'emplacement des câbles électriques	33
Vues finales	34
Annexe 7 : Vue d'ensemble du Mini-Bee avec ses 60 rotors.....	34
Annexe 8 : Vues transparentes de la cabine avec les renforts en surbrillance	34
Annexe 9 : Vue en perspective de la cabine	35
Annexe 10 : Vue de profil de la cabine.....	35
Annexe 11 : Vue de face de la cabine	35
Annexe 12 : Vue arrière de la cabine	35
Annexe 13 : Vue du dessus de la cabine	35
Annexe 14 : Vue du dessous de la cabine	35
Annexe 15 : Mise en plan de la cabine.....	36

Introduction

Le développement des VTOL, aéronefs à décollage et atterrissage verticaux, représente une nouvelle ère de mobilité aérienne. Dans cette optique d'innovation, la société Technoplane a lancé en 2015 le projet collaboratif Mini-Bee qui propose une solution modulaire pour le transport de personnes sur de courtes distances.

Technoplane, fondée en 2013 par Xavier DUTERTRE, est une entreprise spécialisée dans la fourniture de solutions de données et de services techniques pour l'industrie aéronautique. Elle coordonne divers projets collaboratifs tels que le Bee-Plane et le Mini-Bee pour explorer des solutions pratiques et innovantes.

Le projet Mini-Bee a pour objectif de concevoir une ambulance volante, hybride et modulaire, destinée aux opérations de sauvetage dans les zones difficiles d'accès ou dangereuses. La solution doit permettre un déploiement rapide et un transport facile dans un conteneur LD3. Cette initiative implique plusieurs partenaires académiques et industriels qui partagent leurs ressources sous une licence open source dédiée. Cette collaboration permet de capitaliser les compétences et les connaissances dans différents domaines pour explorer des solutions innovantes et identifier rapidement les problèmes potentiels.

Notre équipe a été chargée de la modélisation de la maquette numérique de la cabine du Mini-Bee dans le cadre du projet. Cette maquette numérique 3D sous SolidWorks est un élément clé du projet collaboratif, car elle permet d'anticiper les dimensions et les interactions des différents éléments de la cabine, ainsi que de détecter les problèmes et les contraintes qui ne sont pas évidents à première vue. Elle offre ainsi une approche précise et efficace de la conception. De plus, elle sert de lien visuel avec les autres parties du projet, améliorant la compréhension des problèmes rencontrés et des solutions envisagées. Notre collaboration étroite avec le groupe du campus d'ESTACA Bordeaux, responsable de la maquette physique à taille réelle, a enrichi notre expérience et permis des échanges réguliers et productifs.

Dans ce projet de modélisation de la cabine du Mini-Bee, nous examinerons les réflexions menées pour définir le cahier des charges spécifique et les vues 2D de la cabine, ainsi qu'une comparaison avec le Robinson R22. Ensuite, nous aborderons la modélisation 3D de la structure de la cabine, y compris les éléments internes tels que la motorisation et l'aménagement intérieur. Nous examinerons également les éléments périphériques, tels que le système de trains d'atterrissage et la structure supérieure, ainsi que le transport de la cabine du Mini-Bee dans un conteneur LD3. Enfin, nous évaluerons les performances de la cabine, notamment en termes de consommation, de matériaux et de bilan des masses.

1 Réflexions sur la cabine

1.1 Cahier des charges spécifique

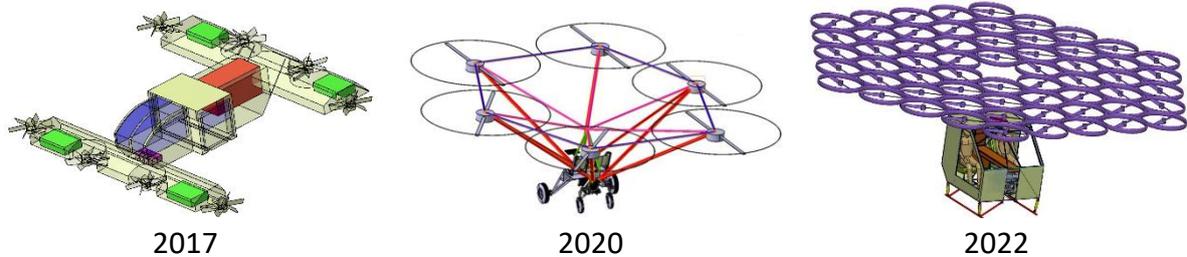


Figure 1 : Évolution de la maquette numérique entre 2017 et 2022

La maquette numérique du Mini-Bee ayant beaucoup évolué depuis son lancement (Figure 1), cela nous a amené à redéfinir le cahier des charges spécifique (Figure 2) à l'aide d'un travail de documentation sur le VTOL afin de répondre aux nouvelles exigences suivantes :

- La cabine du Mini-Bee doit être transportable dans un conteneur LD3.
- L'aménagement de la cabine doit laisser assez d'espace pour les jambes des passagers.
- Le moteur doit être facilement démontable de la cabine, notamment pour son entretien.

Critères	Contraintes limites
Nombre de passagers	2 passagers (pilote inclus)
Vitesse de croisière	170 km/h
Vitesse verticale	4 m/s
Accélération maximale	5 g
Distance franchissable	600 km
Maximum take-off weight (MTOW)	700 kg
Nombre de rotors	60 rotors
Norme hélicoptère	CS27 et TSO
Coût total	< 300 000 €

Figure 2 : Cahier des charges spécifique du Mini-Bee

L'étude de l'aménagement de la cabine durant une grande partie du 1^{er} semestre nous a permis de mieux appréhender la modélisation de la cabine. L'objectif était pour nous de répondre à nos questions sur l'état de l'art du projet à travers la proposition de différentes configurations, tout en respectant le cahier des charges spécifique.

1.2 Différents aménagements et vues 2D

Nous avons imaginé 5 configurations différentes dans l'optique d'améliorer la configuration initiale du Mini-Bee. En premier lieu, nous avons considéré la forme initiale de la cabine (Forme A) et une nouvelle forme de cabine (Forme B) afin de définir laquelle pourrait le mieux s'adapter à la forme du conteneur LD3.

Puis nous avons placé les composants à l'intérieur de la cabine afin de trouver l'aménagement le plus optimal tout en respectant le cahier des charges.

L'intégralité des configurations qui ont été établies sont répertoriées dans le tableau suivant :

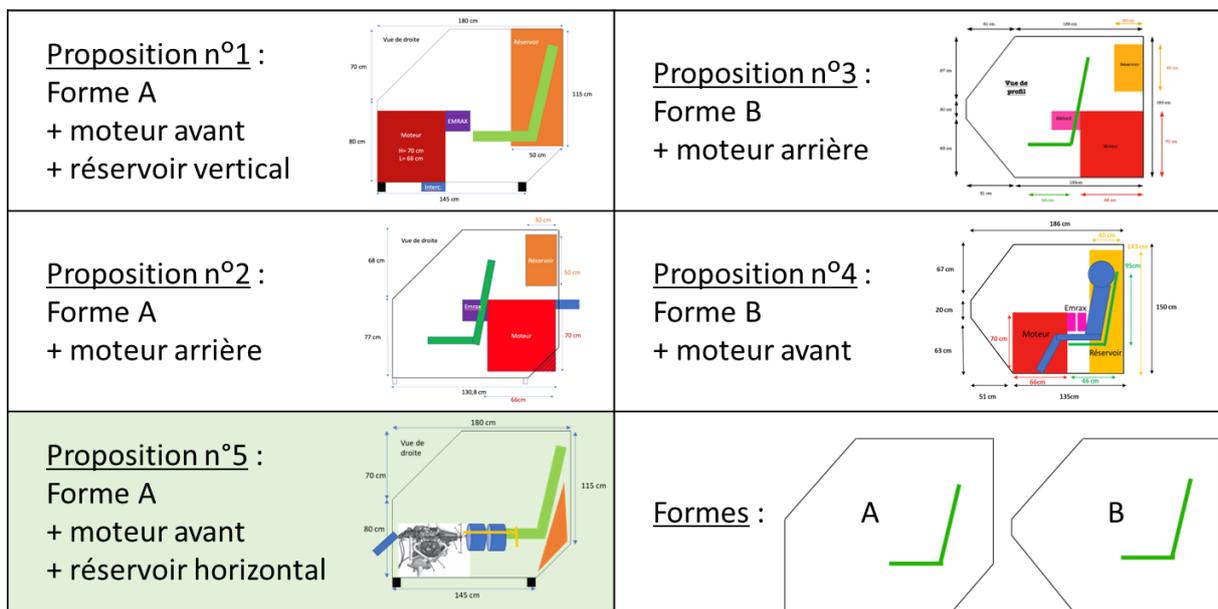


Figure 3 : Tableau récapitulatif des différents aménagements

Voici une liste résumant les raisons qui nous ont guidé vers le choix de la proposition n°5 :

- La proposition n°1 est la configuration initiale, le réservoir vertical crée un déséquilibre.
- La proposition n°2 a été jugée non réalisable car l'espace pour les jambes n'est pas suffisant si l'on avance le moteur. Celui-ci dépasse de la cabine dans le visuel.
- La proposition n°3 a été jugée non réalisable car l'espace pour les jambes n'est pas suffisant à cause de l'angle entre le plancher et la face avant de la cabine.
- La proposition n°4 n'a pas été retenue car le moteur réduit l'espace pour les jambes.
- La proposition n°5 est la configuration retenue et approuvée. Elle permet d'avoir suffisamment de place pour les jambes des passagers tout en optimisant l'espace intérieur et le rangement de la cabine dans un conteneur LD3.

1.3 Comparaison avec le Robinson R22

Dans tout projet d'ingénierie, il est important de faire un état de l'art ou du moins de comparer son travail à des projets existants. C'est ce que nous allons faire succinctement ici en confrontant le Robinson R22 au Mini-Bee (Figures 4 à 6). Cette comparaison nous a été utile pour se rendre compte de la taille du Mini-Bee et de son habitacle, tout en considérant que le Robinson R22, contrairement à notre appareil, a le moteur à l'extérieur de la cabine.

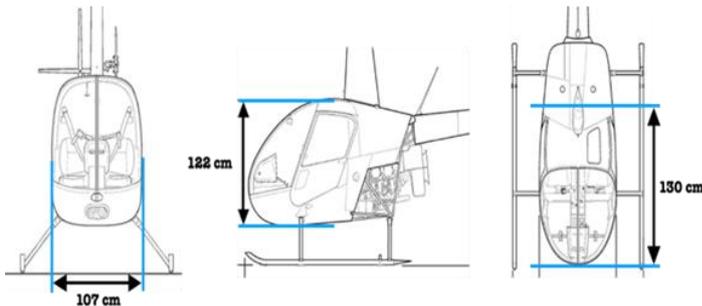


Figure 4 : Représentation du Robinson R22

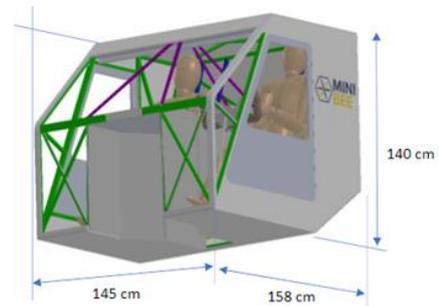


Figure 5 : Cabine du Mini-Bee

	Hauteur	Largeur	Profondeur
R22 (cabine seule)	1,22 m	1,07 m	~ 1,3 m
R22 (cabine + moteur)	1,22 m	1,07 m	~ 1,8 m
Mini-Bee	1,4 m	1,45 m	1,58 m

Figure 6 : Tableau comparatif des dimensions du R22 et du Mini-Bee

Cette comparaison nous servira ultérieurement pour le dimensionnement et la validation des vérins utilisés sur les sièges passagers afin d'amortir le choc en cas de crash.

Maintenant que le modèle 2D a été choisi et que les comparaisons utiles ont été faites, nous pouvons entrer dans le vif du sujet, à savoir la modélisation 3D de la maquette numérique du Mini-Bee, sous le logiciel de conception assistée par ordinateur SOLIDWORKS.

2 Modélisation 3D de la structure

2.1 Évolution de la cabine et vues 3D

Dans cette partie, vous découvrirez l'évolution de la cabine du Mini-Bee dans sa globalité, à savoir les choix architecturaux effectués pour le squelette du multicoptère, les choix des renforts, et la modélisation numérique de la structure en 3D sur SOLIDWORKS.

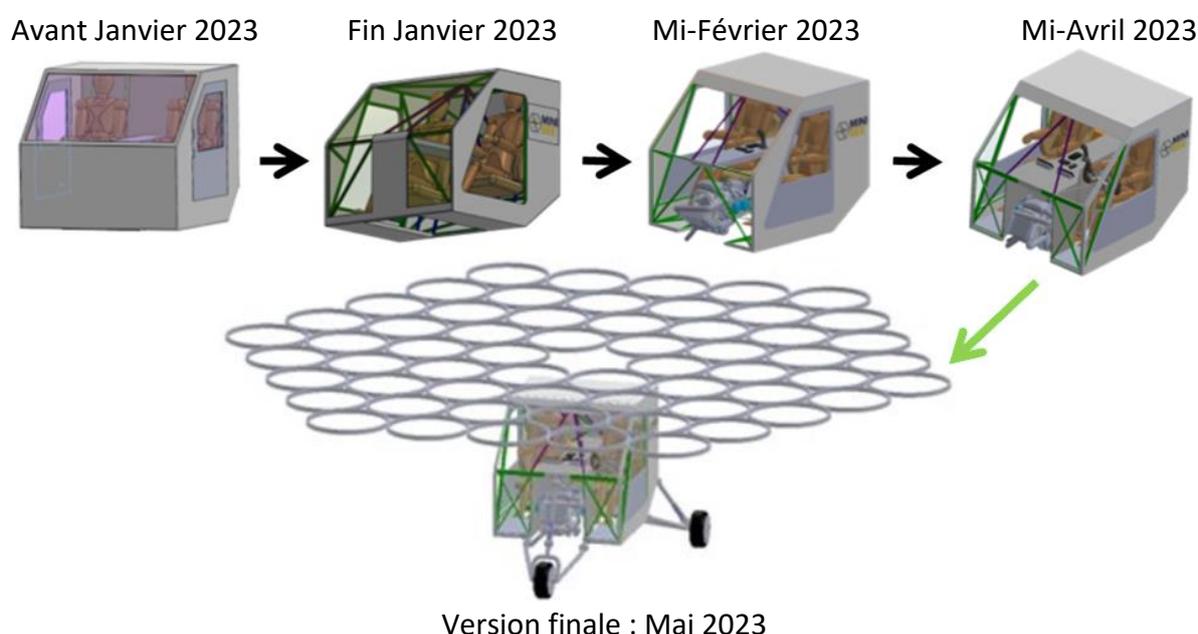


Figure 7 : Évolution de la modélisation numérique du Mini-Bee

Après le choix de la forme globale de la structure, évoqué dans la partie précédente, la structure 3D a subi des changements drastiques pour arriver à la version finale en Mai 2023.

Pour arriver à cette maquette finale, nous sommes passés par plusieurs étapes intermédiaires notables. Tout d'abord, nous avons entièrement remodelisé la structure sous SOLIDWORKS en se basant sur le travail du groupe de l'ESTACA Laval 2021-2022, en y ajoutant des éléments de diverses présentations disponibles sur la plateforme open source, et de nouvelles idées.

Notre première version de maquette était rudimentaire, mais la base de notre projet était désormais réalisée, prête à être modifiée et améliorée. La verrière a beaucoup évolué au cours du projet. Sur les premières versions, le Mini-Bee ne disposait que d'un simple pare-brise. Nous avons alors agrandi la verrière en insérant du plexiglas sur les portières, entre les portières et à l'avant pour plus de visibilité. Enfin, nous avons rendu l'avant du multicoptère complètement transparent pour une optimisation du champ de vision des 2 passagers.

Une autre modification majeure a été de « trouser » le plancher du Mini-Bee à la forme de l'ensemble moteur { Rotax 915 iS + 2 * Emrax 228 } pour simplifier sa maintenance. Dans la continuité, nous avons évidé l'espace entre le moteur et la paroi avant, pour pouvoir d'une part continuer à faciliter la maintenance, et d'autre part permettre un refroidissement efficace du moteur grâce à l'écoulement de l'air autour du moteur pendant le vol.

2.2 Renforts

Le Mini-Bee se doit d'avoir une structure robuste pour pouvoir accéder aux terrains accidentés et résister aux efforts, tout en ayant une certaine légèreté pour assurer son transport. L'étude et le choix des renforts ont donc été de la plus haute importance tout au long de ce projet.

Nous avons décidé d'utiliser des renforts à section carrée avec un évidement pour gagner en masse sans trop perdre en résistance. Cette section carrée est donc de $2 * 2 \text{ cm}$ avec un évidement de $1,4 * 1,4 \text{ cm}$ pour une section totale d'environ 2 cm^2 (Figure 8).

Vous retrouverez en *Annexe 8* une représentation détaillée des renforts sous différents angles de vue. Nous avons triangularisé les efforts au maximum et les avons concentré en certains points stratégiques, notamment les 3 points d'accroche représentés ci-après (Figure 9).

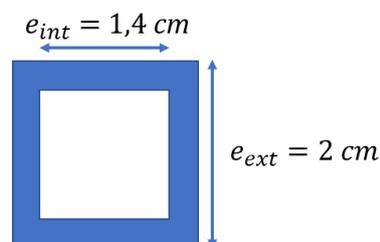


Figure 8 : Dimensions de la section droite d'un renfort

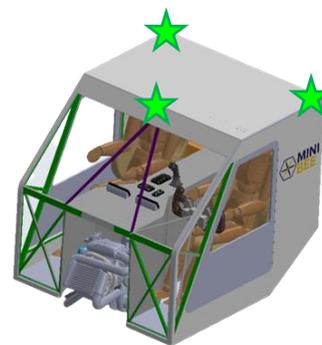


Figure 9 : Les 3 points les plus solides du plafonnier

Les reprises d'efforts du plafonnier se font en les 3 points représentés en Figure 9. C'est aussi en ces points que viendra se fixer la structure supérieure, siège de la création de portance de l'aéronef. La position des renforts, inspirée du groupe de l'ESTACA Laval 2021-2022, a été source de questionnements tout au long du projet et a été approuvée dans l'ensemble. Sur les faces arrière du multicoptère, les renforts en X n'ont pas changé. Pour ce qui est du plancher, des renforts sont positionnés en X sur la longueur sous chaque siège. On remarquera par ailleurs l'ajout de plaques métalliques au niveau des pieds des passagers pour une meilleure robustesse, leur évitant de passer à travers le plancher.

Des changements et des réflexions ont été menés concernant les renforts sur les côtés et la face avant du Mini-Bee. Sur la face avant, derrière le plexiglas se trouve une série de renforts. De prime abord, ces renforts furent supprimés, puis réintégrés sous la forme d'une barre oblique simple, reliant la poutre centrale aux coins avant gauche et droit du Mini-Bee.

C'est sur cette version intermédiaire que le groupe de l'ESTACA Bordeaux de cette année s'est basé pour réaliser la maquette physique à taille réelle en tubes PVC (*Figure 10*).

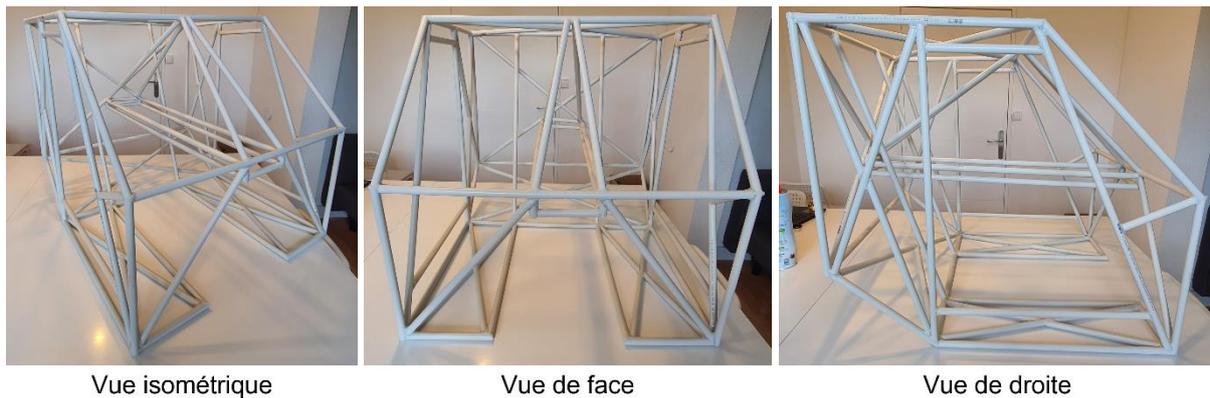


Figure 10 : Maquette physique à taille réelle en tubes PVC (Avril 2023)

Cependant, après la réalisation de cette maquette physique, notre maquette numérique a continué d'évoluer. Nous avons finalement recréé des renforts en X sur la face avant, afin de pouvoir supporter les efforts du train avant, qui n'avait pas encore été modélisé auparavant.

Un des éléments phares du squelette de renforts est la poutre centrale. Cet élément, de section rectangulaire, était initialement une poutre droite reliant la verrière avant à l'arrière de l'aéronef (vue isométrique de la *Figure 10*). Elle a désormais une forme évasée à l'avant (*Figure 9*), permettant de recouvrir parfaitement la forme du moteur, tout en laissant suffisamment d'espace aux passagers pour leurs jambes et pour l'ergonomie de conduite avec le volant. En outre, les objectifs principaux de la poutre centrale sont :

- Intégrer les commandes de vols et les systèmes de navigation
- Permettre le passage des câbles
- Fixer la paroi entre le moteur et l'habitacle
- Reprendre les efforts du plancher et du train avant

La poutre est aussi le point de départ des renforts qui se rejoignent sur le plafonnier à l'avant de l'appareil (renforts violets sur la *Figure 9*). Ceux-ci sont indispensables à la triangulation des efforts, rigidifiant la structure et solidifiant le point d'accroche de la structure supérieure.

2.3 Portière

L'intégration des portières à la structure devait également se faire en adéquation avec le placement des renforts. Au départ, la portière avait des bords droits, parallèles, verticaux avec des charnières proches l'une de l'autre, induisant un fort bras de levier et donc des efforts élevés. De plus, l'encadrement de la porte n'était pas optimal. Nous avons donc reconçu la forme de la porte et le positionnement des charnières (points bleus sur la *Figure 11*) pour une meilleure reprise d'effort et un meilleur positionnement des renforts.

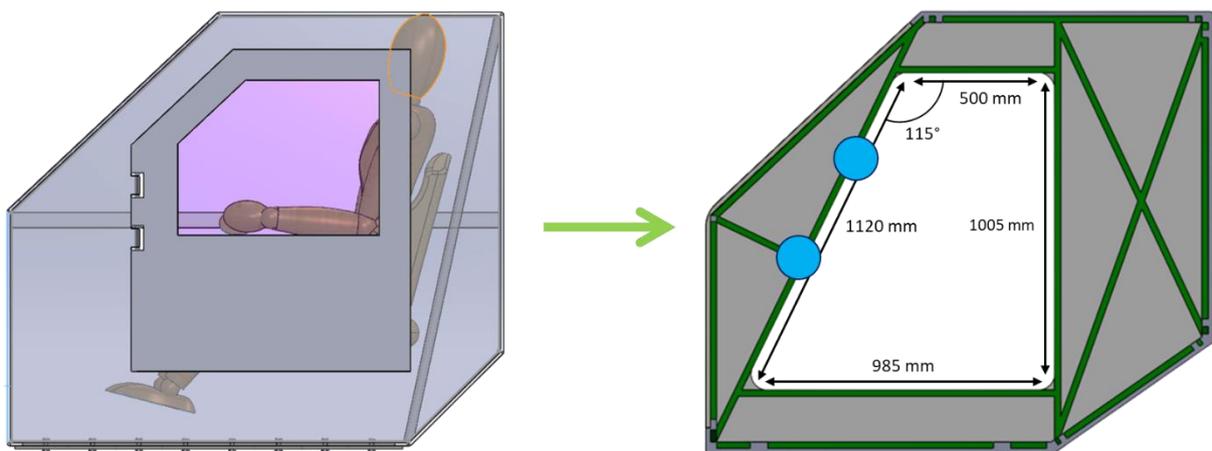


Figure 11 : Évolution de la portière

Désormais, la portière ne dispose plus de bords parallèles verticaux, car l'encadrement de la porte suit les renforts imposés par la géométrie de la cabine. Elle est alors plus solide et offre une plus grande place pour monter à bord du Mini-Bee. De plus, les charnières prennent désormais beaucoup moins de bras de levier et ont donc un moment réduit. La charnière du bas est placée sur un point de triangulation ce qui renforce davantage la structure.

Maintenant que les bases de la structure sont solides et claires, nous pouvons nous pencher sur les éléments internes à la cabine, notamment la pièce centrale de l'aéronef : le moteur.

3 Éléments internes à la cabine

3.1 Motorisation

La motorisation du Mini-Bee est assurée par un moteur thermique Rotax 915 iS, couplé avec 2 moteurs électriques Emrax 228 pour assurer le fonctionnement des 60 rotors de la structure supérieure. Les étapes de développement du moteur durant l'année vont être présentées dans cette partie.

Dans un premier temps nous définirons le cahier des charges spécifique lié à cette partie. Puis nous visualiserons les étapes d'évolution de la modélisation. Enfin, nous terminerons par l'accroche moteur, ainsi que les accessoires modélisés.

3.1.1 Cahier des charges spécifique

Par « ensemble moteur », nous désignerons l'ensemble { Rotax 915 iS + 2 * Emrax 228 }.

La modélisation de l'ensemble moteur a pour but d'établir un modèle le plus réaliste possible du moteur utilisé. Elle inclut la modélisation du moteur Rotax 915 iS mais également des deux Emrax 228. D'autre part, nous devons également prendre en compte et définir des systèmes d'accrochage pour notre ensemble moteur.

Comme nous avons pu le voir précédemment, le cabine ayant des dimensions très restreintes, l'ensemble moteur doit respecter certains critères, afin d'assurer son bon fonctionnement :

- Le Rotax 915 iS ne doit pas empiéter sur l'espace dédié aux jambes des passagers.
- Le Rotax 915 iS doit être relié aux Emrax 228 et accroché à la cabine au niveau de la poutre.
- L'ensemble moteur doit être facilement démontable.
- L'intercooler doit se situer dans le flux d'air, tout en permettant à la cabine de se ranger à l'intérieur d'un conteneur LD3, sans devoir le démonter.

3.1.2 Évolution de la modélisation de l'ensemble moteur

La modélisation de l'ensemble moteur a considérablement évolué durant le projet. Dans la genèse des projets liés à la modélisation de la cabine, le moteur était systématiquement représenté par un « cube ». La modélisation de l'ensemble moteur s'est alors poursuivie en essayant de modéliser, étape par étape, les composants indispensables.

Nous pouvons visualiser ci-après son évolution au fil de l'avancée du projet (*Figure 12*).

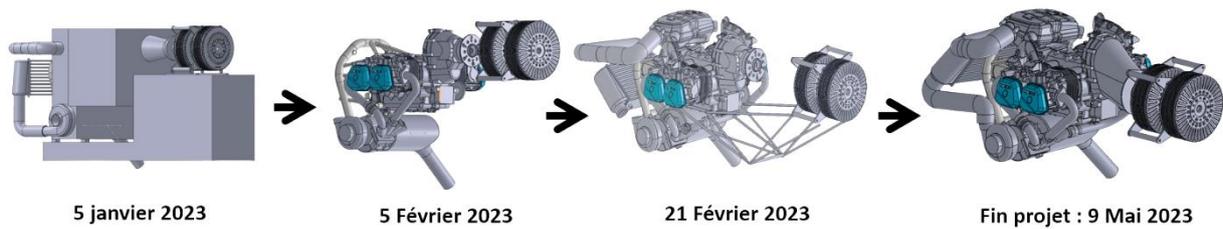


Figure 12 : Évolution de la modélisation de l'ensemble moteur

Au départ, les composants modélisés étaient le berceau utilisé pour l'accroche, le pot d'échappement, l'intercooler, la Gearbox et les Emrax. Puis à l'aide des modélisations de moteurs Rotax antérieures à la version 915 iS (tels que le Rotax 914 ou 912) présentes en open source sur une banque de modèles 3D, nous avons modifié la modélisation de certains composants ayant changé entre la version 915 iS et ses anciennes versions. Cela a permis d'établir une version détaillée de chacun des composants de l'ensemble moteur, afin d'être plus réaliste et plus précis dans nos problématiques d'accrochage moteur.

3.1.3 Accroche du moteur

L'accroche du moteur a été un réel enjeu : elle doit assurer le lien entre le Rotax et les Emrax, ainsi que son maintien en position dans la cabine. Il était important d'avoir une modélisation du moteur la plus précise possible pour comprendre les réelles contraintes rencontrées.

Pour commencer, nous nous sommes intéressés à l'accrochage de l'ensemble moteur au niveau de la cabine, puisque nous disposons du berceau et des Emrax 228.

La première idée était d'accrocher le moteur à notre réservoir au niveau des Emrax et du berceau. Nous avons imaginé des systèmes d'accroche avec des équerres de fixation au niveau du berceau et avons utilisé le système d'accroche en X présent au niveau des Emrax. Dans cette configuration, une partie du réservoir se situait sous le moteur.

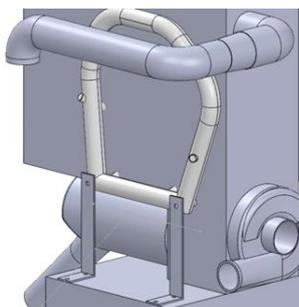


Figure 13 : Berceau de l'accroche (5 Janvier 2023)

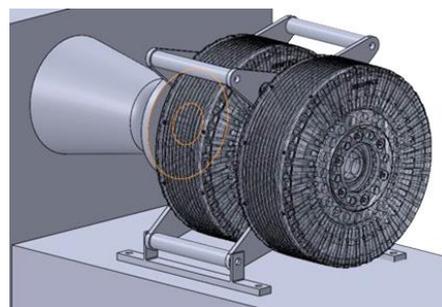


Figure 14 : Accroche en X des Emrax (5 Janvier 2023)

Dans un deuxième temps, avec l'évolution de la modélisation, nous avons délaissé l'accrochage à la cabine pour se concentrer sur celui entre le Rotax et les Emrax. Nous avons changé l'aménagement cabine en déplaçant le réservoir à l'arrière, ce qui nous a laissé la place pour créer une accroche entre le Rotax et les Emrax. La solution mise en place est une structure tubulaire composée de tiges en acier joignant le système d'accroche en X des Emrax aux nouveaux points d'accroches modélisés sur les côtés du Rotax.



Figure 15 : Accroche du moteur en structure tubulaire (21 Février 2023)

Finalement, la solution retenue consiste à retirer la Gearbox pour placer les Emrax directement en sortie du Rotax. Cela permet d'avoir des axes de transmission colinéaires, contrairement à la configuration précédente où l'utilisation de la Gearbox déplaçait l'axe de transmission du moteur vers le haut. Cette nouvelle configuration permet de transmettre la puissance directement, sans avoir recours à la Gearbox, ce qui permettrait de réduire la vitesse de rotation du moteur, augmentant ainsi sa durée de vie et réduisant sa consommation. De plus, cette configuration réduirait la masse et l'encombrement de l'ensemble moteur. L'ensemble est alors relié à l'aide d'un nouveau boîtier de liaison qui vient se fixer au niveau de l'accroche en X des Emrax.

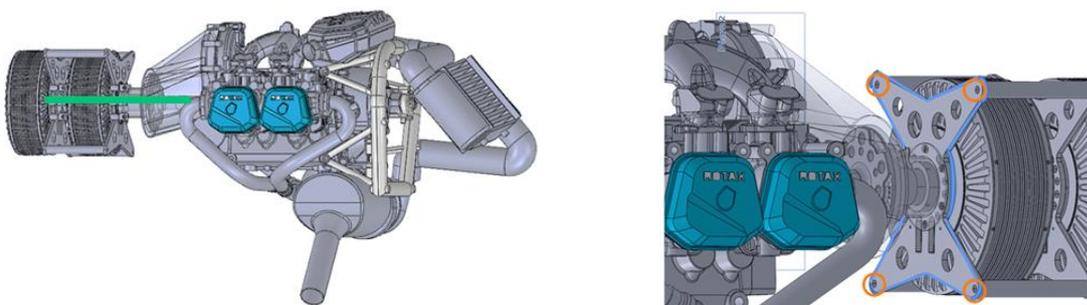


Figure 16 : Ensemble moteur final avec son nouveau boîtier de liaison (9 Mai 2023)

3.1.4 Intercooler

L'intercooler est un composant essentiel du moteur Rotax 915 iS qui assure le refroidissement de l'air circulant dans le moteur. Dans le contexte de la conception du Mini-Bee, il était primordial de déterminer avec précision la position idéale de l'intercooler sur la cabine pour assurer un refroidissement optimal du moteur.

Dans un premier temps, nous avons examiné sa position sur le moteur afin de savoir comment le placer sur notre cabine. En effet, il doit se situer dans le flux d'air pour refroidir au mieux notre moteur. Il faut savoir que le flux d'air principal est généré par les hélices de la structure supérieure. Cela nous contraint donc à positionner l'intercooler devant le moteur.

Cependant, étant donné que le flux d'air arrive par en haut, une position verticale de l'intercooler n'est pas optimale. Nous avons donc décidé d'incliner l'intercooler à environ 45° pour qu'il reçoive un maximum de l'écoulement de l'air provenant de la structure supérieure, tout en limitant son encombrement. Cette solution nous permet d'optimiser la circulation de l'air pour assurer un refroidissement efficace du moteur, ainsi que de pouvoir ranger la cabine du Mini-Bee dans un conteneur LD3 avec l'ensemble moteur et son intercooler.

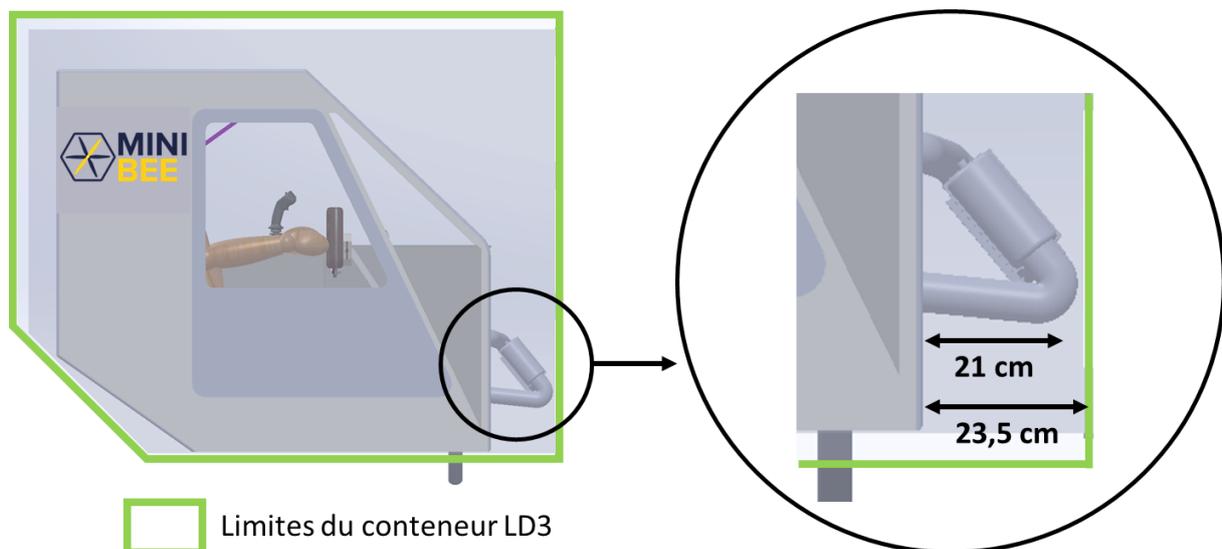


Figure 17 : Rangement de la cabine avec intercooler dans un conteneur LD3

3.1.5 Accessoires du moteur

Durant la phase finale du projet, nous avons commencé à modéliser les composants annexes aux moteurs comme le réservoir d'huile ou la Fusebox qui sont liés au moteur, mais dont l'emplacement reste à définir. Le prochain jalon serait de poursuivre la modélisation de ces éléments pour leur trouver une place adéquate dans la cabine.

3.1.6 Bilan

La modélisation de l'ensemble moteur a permis de grandes avancées pour répondre à certaines problématiques et d'établir un visuel précis du moteur dans la cabine.

Pour la suite du projet, il serait judicieux de se concentrer sur l'accroche du moteur à la cabine et étudier la faisabilité des fixations en effectuant leur étude de résistance. D'autre part, une modélisation encore plus détaillée des accessoires du moteur, du câblage et de la chaîne de puissance pourrait finaliser le travail de modélisation de la partie motorisation.

3.2 Aménagement intérieur

3.2.1 Tableau de bord et commandes de vol

À ce stade, le squelette général de la cabine est robuste et le moteur est intégré à la structure. Pour pouvoir commander la chaîne de puissance correctement, il faut alors prévoir des instruments, des capteurs, des interrupteurs et des commandes de vol, qui doivent être :

- Visibles par le pilote
- Ergonomiques (certains éléments doivent être accessibles par les 2 passagers)
- Résistants

Pour ce qui est du tableau de bord, nous avons proposé plusieurs solutions, qui sont représentées dans la matrice de cotation ci-après (Figure 18) :

- Configuration n°1 : Respect de la règle du « T »
- Configuration n°2 : Tableau de bord en ligne sur le plafonnier
- Configuration n°3 : En deux parties, sur le plafond et au-dessus de la verrière

	Respect du « T » 	Sur le plafonnier 	En deux parties 
Espace libéré	2	3	4
Champ de vision	1	2	4
Accessibilité	3	3	3
Conformité	4	3	3
TOTAL	10	11	14

Figure 18 : Matrice de cotation pour le tableau de bord

Dans la configuration n°1, nous nous sommes basés sur la disposition classique des instruments de vol dans un aéronef léger, en respectant la règle du « T » pour l'horizon artificiel, l'altimètre, l'anémomètre et le directionnel. Nous avons ensuite placé les instruments relatifs au vol sur la gauche et ceux relatifs au moteur sur la droite. Cette disposition a le mérite de respecter les conventions, mais prend beaucoup trop de place au vu de la géométrie de la cabine. Elle réduit considérablement le champ de vision des passagers et il reste de l'espace inutilisé en face du pilote.

Dans la configuration n°2, les instruments et interrupteurs sont placés cette fois-ci en ligne sur le plafonnier, augmentant le champ de vision par rapport à la proposition précédente. Cependant, le placement des radios en hauteur derrière les renforts (en violet sur la *Figure 9*) empêche d'avoir un accès simple et ergonomique aux radios depuis le poste de pilotage.

Nous arrivons enfin à la configuration n°3 dans laquelle les interrupteurs sont disposés directement au plafond, tandis que les instruments restent au-dessus de la verrière. Cette fois-ci, les radios sont placées sur un socle incliné, directement sur la poutre centrale, permettant aux 2 passagers d'avoir un accès simple et efficace aux radios.

Voici la liste des instruments de vol utilisés, de la marque Kanardia :

- Horizon artificiel
- Altimètre
- Anémomètre
- Directionnel
- Variomètre
- Combo
- Interrupteurs (lumière, batteries, etc.)

Pour ce qui est des commandes de vol, tout se passera sur la poutre centrale et avec le volant. En effet, le Mini-Bee se pilote grâce à la combinaison d'un volant et d'un joystick permettant de gérer les gaz. Cependant, le volant n'a pas de degré de liberté dans la profondeur comme dans un avion léger classique. Pour gérer l'altitude, un simple bouton sur le volant suffit. Ainsi, pour faciliter leur accès par le pilote, on retrouve sur la poutre le joystick et les instruments « à écran » : radios, autopilote, instruments « Digi » et « Emsis » de la marque Kanardia.

Enfin, l'intégration du volant n'a pas été chose facile. En effet, lorsque le pilote va s'asseoir ou sortir de l'appareil, il va se hisser grâce au volant ou s'appuyer dessus par réflexe. Il a donc fallu créer des renforts spéciaux permettant de gérer ces 2 cas de sollicitations complètement différents d'un point de vue des contraintes. Il a aussi fallu revoir plusieurs fois la forme et la taille de la poutre afin de pouvoir accéder au volant sans aucune difficulté et sans que le pilote ne frotte sa main droite sur la poutre en tournant le volant.

3.2.2 Sièges et vérins

Concernant les sièges présents à l'intérieur de la cabine du Mini-Bee, nous avons décidé de les modéliser nous-même afin d'avoir des dimensions adaptées à la place disponible dans l'habitacle. Les dimensions sont basées sur les tailles de sièges « standard » pour ce type d'engin volant.



Figure 19 : Modélisation du siège sur-mesure

Cependant, nous avons rencontré une difficulté lorsque nous avons installé les mannequins représentant les passagers à l'intérieur de l'aéronef. En effet, un problème avec l'espace entre la tête du mannequin et le plafonnier du Mini-Bee est apparu. De plus, nous avons remarqué qu'il y avait un espace perdu au niveau des jambes. Nous alors pensé à 2 solutions :

- 1) Augmenter l'angle entre les vérins et la face arrière du Mini-Bee
- 2) Abaisser le seuil sous les sièges de 40 cm à 30 cm

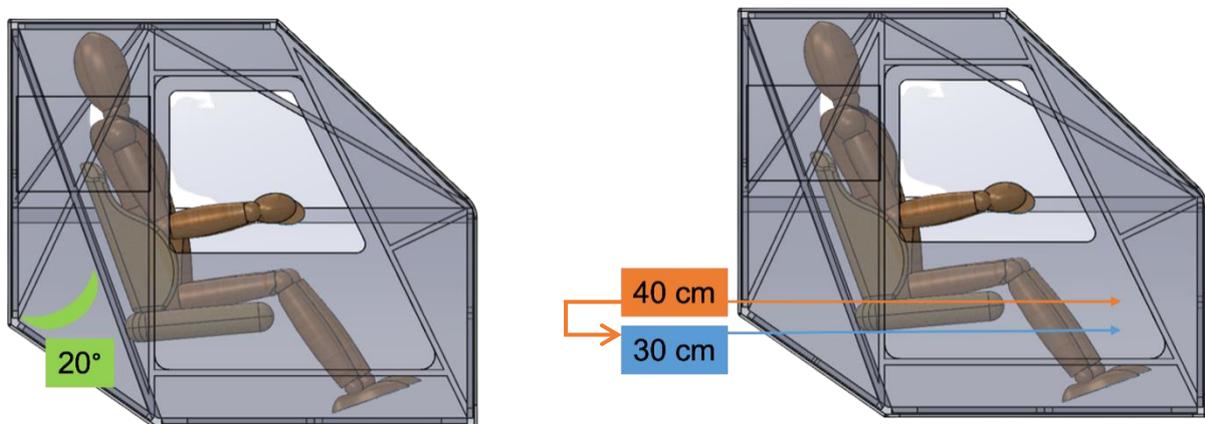


Figure 20 : Modifications sur la configuration des sièges

En comparant nos dimensions avec celles du Robinson R22, nous avons remarqué qu'il était effectivement possible d'augmenter l'angle d'inclinaison des sièges. Nous avons donc augmenté cet angle jusqu'à 20°, ce qui est raisonnable en comparaison des 24° du R22.

De plus, une place conséquente était perdue au niveau des jambes des mannequins. Nous avons donc proposé d'abaisser le seuil sous les sièges de 40 à 30 cm. Cette diminution de la hauteur sous les sièges devra donc être compensée avec les vérins qui absorberont un choc à l'atterrissage encore plus important.

Concernant les vérins, nous avons décidé d'utiliser des vérins à gaz, car ils disposent du meilleur rapport qualité-prix sur le marché. De plus, les dimensions sont relativement variables, afin que ceux-ci s'adaptent au mieux à nos exigences du cahier des charges.

Grâce à des calculs simplifiés, présentés ci-dessous, nous avons donc déterminé la force qui était nécessaire pour amortir efficacement les passagers de l'appareil.

Nombre de vérins par siège : $n = 2$

Masse utilisateur : $m = 100 \text{ kg}$

Coefficient de déccélaration maximal : $D = 5 * g \approx 50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Force par vérin : $f = D * m = 5000 \text{ N}$

Force par siège : $F = f * n = 10\,000 \text{ N}$

Nous avons donc réalisé une matrice de cotation (*Figure 21*) afin de déterminer si abaisser la hauteur des sièges était la meilleure solution à envisager. Que ce soit au niveau de l'espace des passagers, de l'accès aux différents appareils ou encore de la vue, la solution où la hauteur des sièges est de 30 cm s'est avérée être la meilleure des propositions. De plus, l'amortissement reste tout aussi bon pour une hauteur abaissée que pour la hauteur originale, puisque pour une force donnée la longueur des vérins est adaptable à notre besoin.

	30 cm	40 cm
Espace des passagers	4	2
Amortissement	4	4
Champ de vision	4	3
Accès aux instruments	3	2
TOTAL	15	7

Figure 21 : Matrice de cotation pour la hauteur du seuil sous les sièges

4 Éléments périphériques

4.1 Composants extérieurs

4.1.1 Système de trains d'atterrissage

Plusieurs systèmes de trains d'atterrissages ont été précédemment étudiés par les écoles partenaires : barres d'hélicoptère, trépieds à patins et trépieds à roue.

C'est finalement cette dernière solution qui a été retenue pour ses différents avantages : démontage, amortissement et mobilité de la cabine au sol (Figure 22).

	Barres d'hélicoptère	Trépieds à patins	Trépieds à roue
Démontage	2	3	3
Amortissement	2	4	3
Mobilité	2	2	4
TOTAL	6	9	10

Figure 22 : Matrice de cotation pour le choix du type de trains

Les trépieds à roue doivent répondre à des fonctions principales et des contraintes (Figure 23).

Ils doivent tout d'abord pouvoir amortir la cabine à l'atterrissage (FP1) et se poser sur toute surface (FP2). Ensuite, ils doivent assurer l'intégrité des passagers (FC1) et de la cabine (FC2). Enfin, ils doivent se démonter en moins de 10 minutes (FC3) et peser moins de 30 kg (FC4).

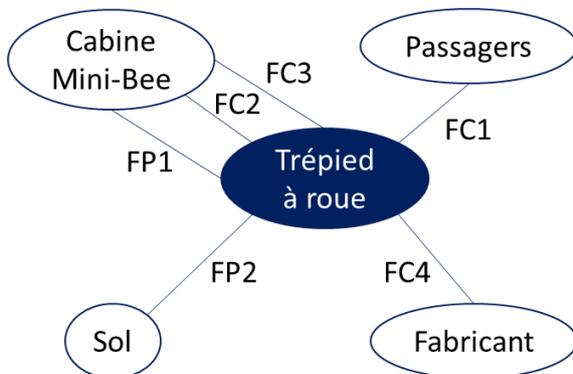


Figure 23 : Diagramme en pieuvre du trépied à roue

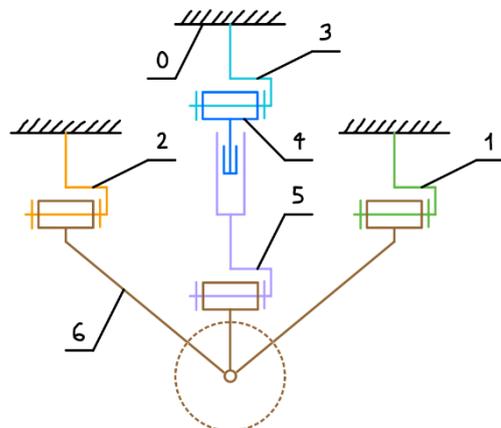


Figure 24 : Schéma cinématique du trépied à roue

Nous avons alors réfléchi à une architecture de trépied pouvant répondre aux critères précédemment cités. Avec les conseils de notre encadrant Xavier DUTERTRE, nous avons proposé une architecture avec 4 pivots et un amortisseur central (*Figure 24*).

Puis, nous nous sommes assurés que cette architecture était bien hyperstatique en calculant ci-dessous le degré d'hyperstaticité pour un trépied à roue.

$$\begin{aligned}
 Ms &= 6 * p - Ns = 6 * 6 - (3 * 6 + 4 * 5 + 4) = -6 \\
 M &= Mu + Mi = 1 + 0 = 1 \\
 H &= M - Ms = 7 \rightarrow \text{hyperstatique}
 \end{aligned}$$

Après validation de cette architecture, nous avons réfléchi à l'intégration de ces trépieds sur la cabine. Nous avons conclu que l'utilisation de 3 trépieds (un à l'avant et 2 à l'arrière) était la meilleure solution. En effet, cette configuration assure une bonne stabilité au sol, tout en limitant le temps de démontage et en respectant le critère masse.

Le trépied avant est fixé au centre de la poutre centrale et sur l'extrémité basse des renforts verticaux de la face avant. Tandis que les trépieds arrière sont chacun fixés sur les extrémités du renfort oblique de la face latérale, ainsi que sur les renforts centraux du plancher.

Le choix des points de fixation s'est suivi de la modélisation complète des 3 trépieds en 3D sur SOLIDWORKS (visibles sur les vues finales de la cabine en *Annexe page 35*). Cependant, les modèles des vérins amortisseurs et des fixations des trépieds à la cabine n'ayant pas encore été choisis, le modèle 3D effectué n'est pas définitif. Il permet cependant d'avoir une idée globale de l'intégration des trains sur le Mini-Bee.

4.1.2 Structure supérieure

Bien que la structure supérieure ne fasse pas partie de notre projet initialement, nous avons tout de même réfléchi à son intégration sur la cabine du Mini-Bee.

Celle-ci sera composée de 2 étages hexagonaux. Le premier étage sera sur le même plan que le toit de la cabine et assurera la connexion avec le deuxième étage sur lequel seront fixés 60 rotors d'environ 87 cm de diamètre. Outre sa solidité, la structure supérieure devra être facilement démontable pour pouvoir être transportée.

Pour l'intégration de la structure supérieure, nous nous sommes appuyés sur le modèle 3D développé par nos collègues de Centrale Lille (*Figure 25*). Nous avons imaginé 7 points de fixation dont 6 sur les extrémités de l'hexagone du premier étage et un au centre de celui du deuxième étage. Ces points de fixation seront reliés à la cabine, à la fois par des renforts en aluminium, et des câbles pour garantir un maximum de stabilité pendant les phases de vol.

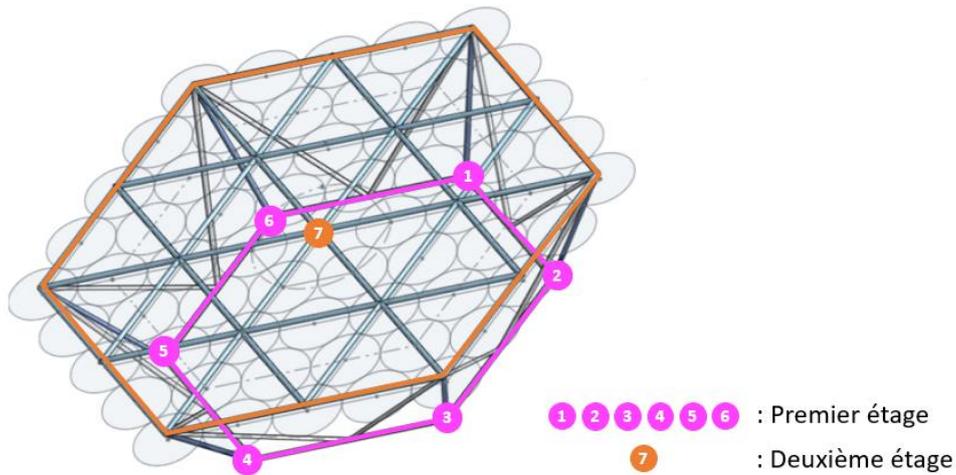


Figure 25 : Modèle 3D de la structure supérieure développé par Centrale Lille

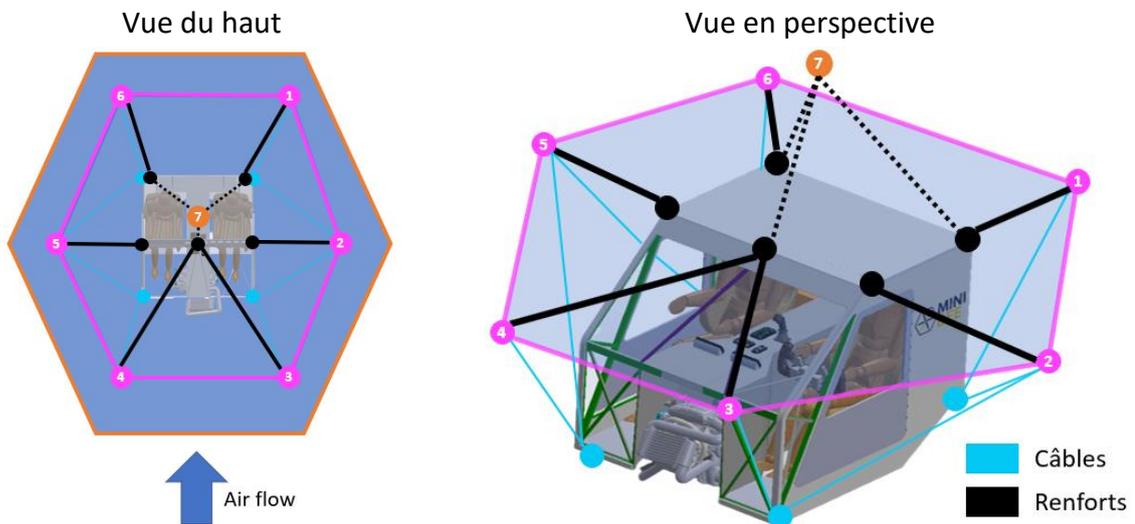


Figure 26 : Représentations schématiques de l'intégration de la structure supérieure

4.1.3 Parachute

Le parachute est l'un des dispositifs nécessaires pour assurer la sécurité à bord du Mini-Bee. En effet, en cas de crash, celui-ci permet de ralentir considérablement la vitesse de chute et d'augmenter drastiquement les chances de survie des personnes à bord.

Le modèle de parachute retenu est le GRS 6 800-990. En somme, ce parachute regroupe toutes les caractéristiques nécessaires (*Annexe 3*) pour respecter le cahier des charges.

Par ailleurs, nous nous sommes posé la question de comment et où accrocher ce parachute au Mini-Bee. Nous avons alors identifié 2 alternatives pour l'accroche :

- 1) Sur la structure supérieure
- 2) Sur le toit de la cabine

Dans un premier temps, nous nous sommes demandé si l'accrocher tout simplement sur la structure supérieure n'était pas la meilleure alternative. En effet, au milieu de la structure supérieure se trouve un point de triangulation très solide qui peut donc encaisser de grands efforts notamment lors de l'ouverture du parachute.

La deuxième proposition consistait à créer un espace vide au milieu de la structure supérieure, afin que le parachute, accroché au toit de la cabine, puisse s'ouvrir en passant à travers la structure. Cependant, cette idée fût vite abandonnée. En effet, il aurait été nécessaire d'ajouter un système d'éjection plus performant, afin que le parachute puisse se déployer au-dessus de la structure supérieure, sans se mêler aux rotors.

C'est donc la première option qui a été approuvée pour l'accroche du parachute.

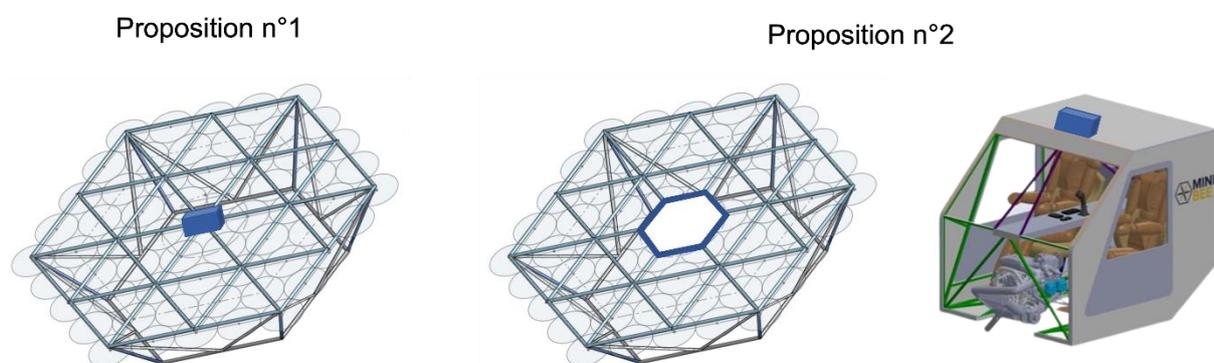


Figure 27 : Propositions pour l'emplacement du parachute

4.2 Transport en conteneur LD3

Une des caractéristiques principales de notre cahier des charges est que le Mini-Bee doit pouvoir être transporté dans un conteneur de type LD3.

En effet, ces conteneurs sont devenus une norme dans l'industrie de l'aviation commerciale depuis leur introduction par la compagnie aérienne américaine Delta Air Lines en 1972. Ils sont compatibles avec la plupart des avions de ligne couramment utilisés aujourd'hui.

Les conteneurs LD3 peuvent être empilés les uns sur les autres pour maximiser l'espace de chargement de l'avion, permettant ainsi aux compagnies aériennes de transporter plus de fret et de bagages en soute à chaque vol. Les conteneurs LD3 sont également équipés de systèmes de verrouillage pour assurer la sécurité de la cargaison pendant le vol.

En plus, d'être utilisés pour le transport de marchandises commerciales, les entreprises peuvent également transporter leurs produits dans des conteneurs LD3 à travers le monde en utilisant des vols commerciaux. Cela permet un transport rapide et efficace de la marchandise, tout en réduisant les coûts de transport et augmentant la satisfaction des clients en termes de délais de livraison. Les conteneurs LD3 sont également réutilisables, ce qui en fait une option écologique pour le transport de fret aérien.

Nous nous sommes alors demandé quelles seraient les meilleures options pour l'ouverture du conteneur ainsi que pour le déchargement du Mini-Bee.

4.2.1 Réflexion sur l'ouverture du conteneur LD3

Dans un premier temps, 2 options sont apparues à nos yeux pour l'ouverture du conteneur.

En effet, nous avons imaginé une ouverture se faisant soit sur la face latérale, soit sur la face avant du conteneur. Grâce à une matrice de cotation (*Figure 31*), nous avons déterminé quelle proposition était la meilleure pour transporter le Mini-Bee, en prenant en compte certains critères comme la facilité de conception du conteneur ou la praticité d'ouverture de la porte.

Notre premier choix a d'abord été de privilégier une ouverture de face.

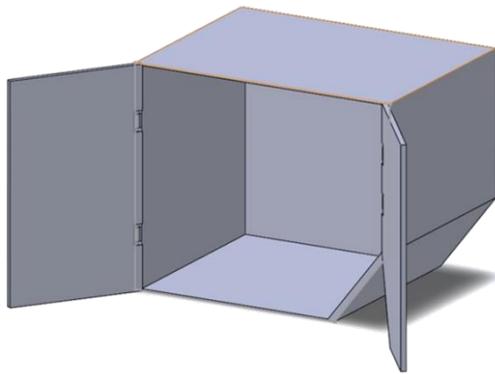


Figure 28 : Conteneur LD3 à ouverture latérale

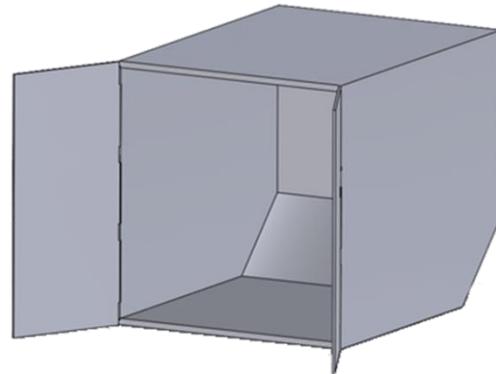


Figure 29 : Conteneur LD3 à ouverture de face

4.2.2 Réflexion sur le chargement du Mini-Bee

Bien que nous ayons réfléchi à comment ouvrir le conteneur LD3, nous n'avons, dans un premier temps, pas pensé au chargement et déchargement du Mini-Bee. Nous avons alors cherché les options qui étaient envisageables. Nous avons trouvé plusieurs solutions comme un simple transpalette, un convoyeur à rouleaux ou encore une solution Skate & Track.

Cependant, la praticité de toutes ces solutions ne permettait pas d'assurer le but premier du Mini-Bee : sa capacité à être déployé rapidement dans des zones sinistrées.

4.2.3 Solution retenue : conteneur LD3 démontable

Finalement, la proposition qui a été retenue est celle de rendre le conteneur LD3 entièrement démontable. En effet, le rendre démontable permettrait de réduire le temps de déploiement sur la partie du déchargement du Mini-Bee mais aussi de rendre l'ouverture du conteneur beaucoup plus facile et pratique. Cette proposition permet alors de répondre aux contraintes liées au rangement du Mini-Bee dans le conteneur.

Ainsi, en complétant la matrice de cotation précédemment établie (Figure 31), nous avons validé cette proposition comme étant la meilleure pour ranger le Mini-Bee dans un LD3.

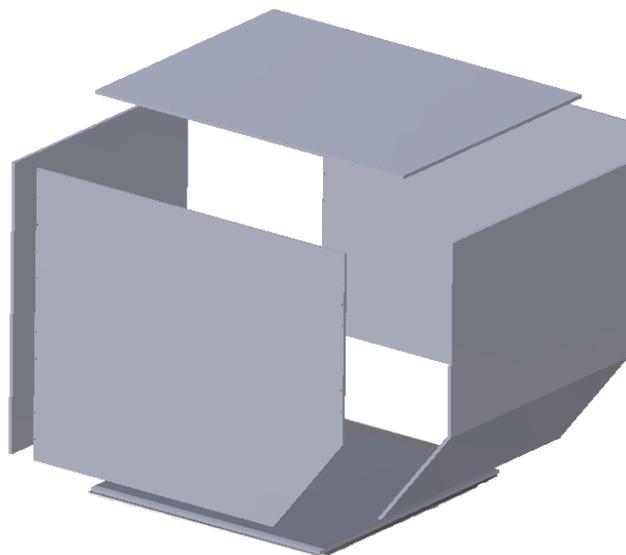


Figure 30 : Conteneur LD3 démontable

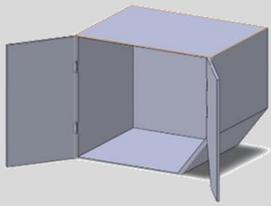
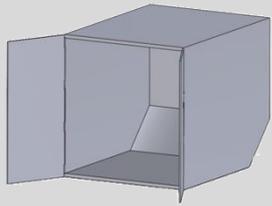
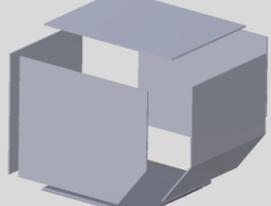
	Ouverture latérale	Ouverture de face	LD3 démontable
			
Rangement du MB	4	4	4
Facilité conception	2	3	4
Charnière robuste	2	3	4
Facilité chargement	2	2	4
TOTAL	10	12	16

Figure 31 : Matrice de cotation pour l'ouverture du conteneur LD3

5 Performances

Dans cette partie, nous allons nous intéresser aux performances du Mini-Bee afin de respecter les objectifs fixés dans le cahier des charges, notamment en termes de distance franchissable. Pour cela, nous allons d’abord étudier la consommation de notre appareil, puis examiner les différents matériaux qui le composent afin de dresser un bilan des masses.

5.1 Consommation

Les calculs de consommation ont pour objectif de dimensionner le réservoir de carburant afin de respecter la distance franchissable de 600 km visée dans le cahier des charges. Pour réaliser les calculs, nous nous sommes appuyés sur le manuel d’utilisation du fabricant du moteur Rotax 915 iS. À partir de celui-ci, nous avons pu construire les tableaux de la puissance moteur et de la consommation horaire, en fonction du pourcentage de la manette des gaz et du nombre de tours par minute (*Annexe 4*).

Selon nos collègues du groupe dont le sujet principal traite de la propulsion, le vol horizontal s’effectue avec une manette des gaz comprise entre 70 et 100 % et un nombre de tours par minute compris entre 3000 et 5500. De plus, le nombre de tours par minute maximal (5800) est réservé pour les phases de décollage.

Toutes ces données nous ont permis de construire différents scénarios en fonction du pourcentage de la manette des gaz, en faisant des hypothèses sur le nombre de tours par minute correspondant, ainsi que sur la vitesse du Mini-Bee. Nous avons également fait l’hypothèse que la consommation de carburant nécessaire pour le décollage et l’atterrissage était d’environ 5 L. Nous avons ensuite calculé le temps nécessaire pour parcourir 600 km avec les hypothèses de vitesse précédentes, ce qui nous a permis de déterminer la consommation de carburant totale en additionnant celle du vol horizontal, du décollage et de l’atterrissage.

L’ensemble des données est résumé dans le tableau suivant :

	Scénario n°1	Scénario n°2	Scénario n°3	Scénario n°4	Scénario n°5	Scénario n°6	Scénario n°7	Scénario n°8
Pourcentage de la manette des gaz	70,0%	75,0%	80,0%	85,0%	90,0%	95,0%	97,5%	100,0%
Nombre de tour par minute (RPM)	4 000	4 000	4 500	4 500	5 000	5 000	5 500	5 500
Vitesse (km/h)	70	100	125	150	170	180	185	190
Temps pour parcourir 600 km	08:34:17	06:00:00	04:48:00	04:00:00	03:31:46	03:20:00	03:14:36	03:09:28
Puissance moteur (kW)	29,0	33,0	37,5	43,0	55,0	65,0	87,0	99,0
Consommation horaire (L/h)	12,0	14,5	17,0	19,5	23,5	28,0	36,0	44,5
Consommation de carburant totale (L)	107,9	92,0	86,6	83,0	87,9	98,3	121,8	145,5

Consommation de carburant pour l'atterrissage et le décollage (L)	5
---	---

Figure 32 : Conso totale pour parcourir 600 km selon différents scénarios

Pour satisfaire le cahier des charges, c'est-à-dire parcourir une distance de 600 km avec une vitesse de croisière de 170 km/h (scénario n°5), nous pouvons déduire que 100 L de carburant devraient suffire. Cette quantité comprend une marge de sécurité d'environ 12 L.

Le graphique présenté dans ci-dessous (*Figure 33*) indique la consommation de carburant en fonction du pourcentage de la manette des gaz pour parcourir 600 km. Celui-ci nous permet de constater que la consommation de carburant la plus faible est obtenue pour un pourcentage de manette des gaz à 85 % correspondant à une vitesse de 150 km/h.

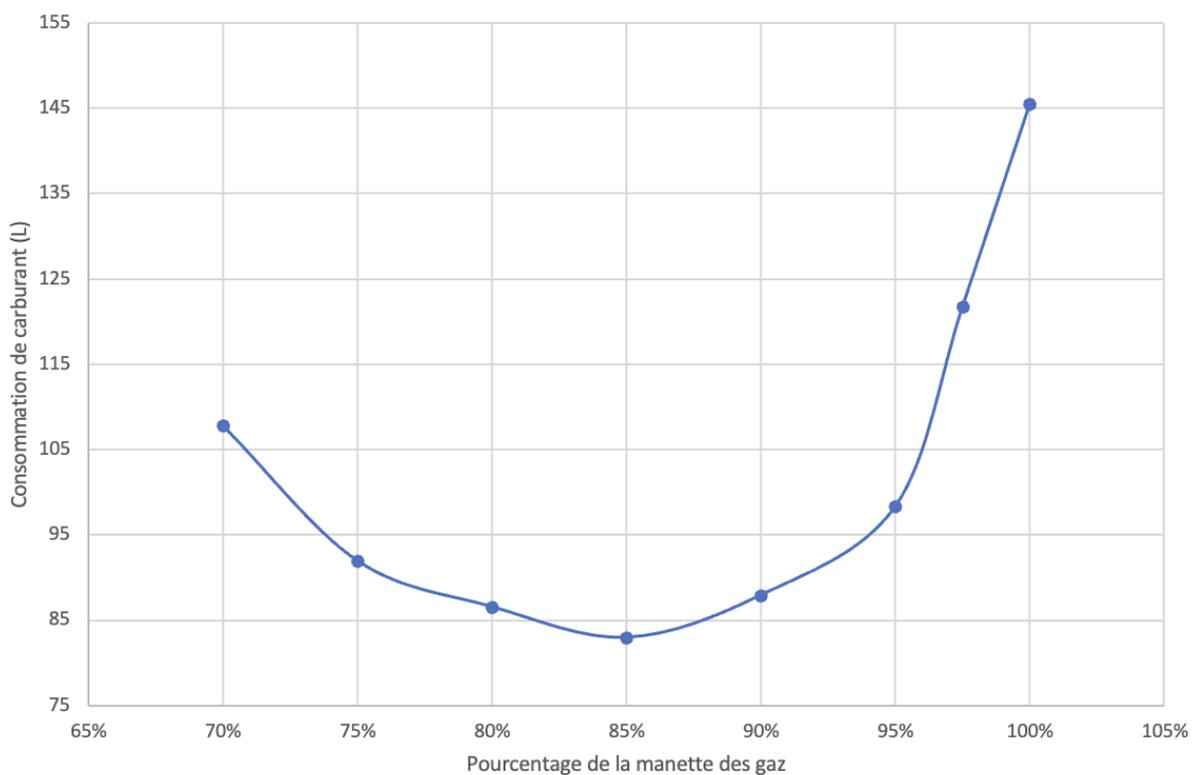


Figure 33 : Conso totale en fonction du % de la manette des gaz pour parcourir 600 km

Il est important de noter que les calculs de consommation ne tiennent pas compte de facteurs tels que la masse et la force de traînée. Par conséquent, les consommations réelles seront donc plus élevées que celles indiquées.

5.2 Matériaux et bilan des masses

Les matériaux constituant la structure ont un impact direct sur le bilan des masses et donc sur les performances. Tout d’abord, nous commencerons par donner les caractéristiques des matériaux utilisés, puis, nous présenterons les 2 structures étudiées avant de dresser le bilan des masses global. La structure du Mini Bee est principalement constituée de 5 composants dont les caractéristiques sont données dans le tableau ci-dessous :

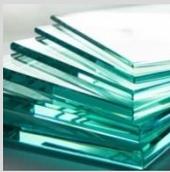
	Paroi en alu	Plexiglass	Toile	Renfort	Câble
					
Matériau	Alu 2024	Plexiglass	Dacron	Alu 2024	Cuivre
Masse volumique	2,77 g/cm ³	1,90 g/cm ³	1,40 g/cm ³	2,77 g/cm ³	8,96 g/cm ³
Épaisseur des plaques	2,50 mm	2,00 mm	1,00 mm	/	
Masse surfacique ou linéique	6,93 kg/m ²	3,80 kg/m ²	1,40 kg/m ²	0,57 kg/m	Annexe page 31

Figure 34 : Récapitulatif des caractéristiques des composants principaux de la cabine

Nous avons ensuite étudié 2 structures présentant une répartition de matériaux différente :

- La structure n°1 est entièrement composée de plaques d’aluminium, ce qui lui confère une grande résistance et rigidité, mais présente un inconvénient en termes de masse.
- La structure n°2 est une combinaison de plaques d’aluminium et de toile, ce qui permet de réduire la masse, mais au détriment de la résistance et de la rigidité (Figure 35)

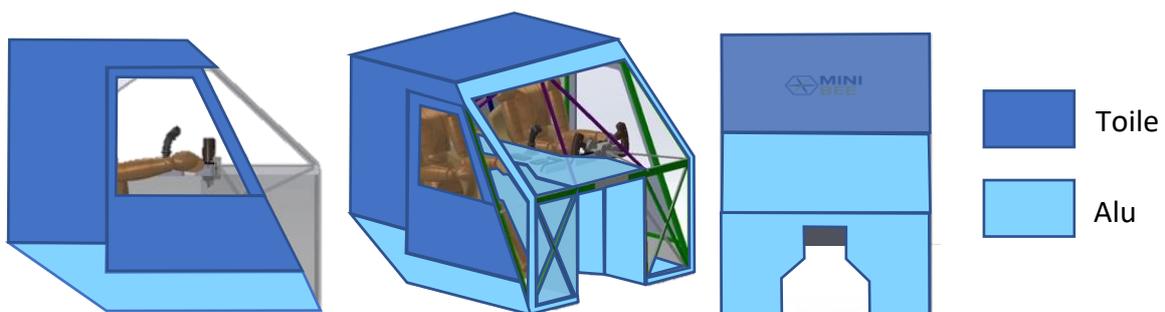


Figure 35 : Répartition d’aluminium et de toile dans la structure n°2

Les bilans des masses de ces 2 structures ainsi que des renforts (Figure 36) ont été réalisés à partir du modèle 3D. En effet, SOLIDWORKS possède un outil de mesure qui permet d'obtenir des informations telles que les longueurs, les surfaces et le volume.

Bilan des masses structure n°1	Surface (m2)	Masse (kg)
Plafond (aluminium)	1,30	9,00
Plancher (aluminium)	1,64	11,36
Paroi arrière verticale (aluminium)	1,48	10,25
Paroi arrière inclinée (aluminium)	0,86	5,96
Console centrale + parois moteur (aluminium)	2,42	16,76
Contour pare-brises (aluminium)	0,33	2,29
Parois latérales (x2) (aluminium)	1,86	12,88
Portes (x2) (aluminium)	0,88	6,09
Vitres portes (x2) (plexiglass)	0,66	2,51
Vitres parois latérales (x2) (plexiglass)	0,39	1,48
Pare-brise principal (plexiglass)	1,10	4,18
Pare-brises secondaires (x2) (plexiglass)	0,53	2,01
Masse totale (kg)		84,77

Bilan des masses structure n°2	Surface (m2)	Masse (kg)
Plafond (toile)	1,30	1,82
Paroi arrière verticale (toile)	1,48	2,07
Portes (x2) (toile)	0,88	1,23
Parois latérales supérieures (x2) (toile)	1,30	1,82
Parois latérales inférieures (x2) (aluminium)	0,56	3,86
Plancher (aluminium)	1,64	11,36
Paroi arrière inclinée (aluminium)	0,86	5,96
Console centrale + parois moteur (aluminium)	2,42	16,76
Contour pare-brises (aluminium)	0,33	2,29
Vitres portes (x2) (plexiglass)	0,66	2,51
Vitres parois latérales (x2) (plexiglass)	0,39	1,48
Pare-brise principal (plexiglass)	1,10	4,18
Pare-brises secondaires (x2) (plexiglass)	0,53	2,01
Masse totale (kg)		57,35

Bilan des masses renforts	Longueur (m)	Masse (kg)
Renforts cabine	57,69	32,59

Figure 36 : Bilans des masses des structures n°1 et n°2 ainsi que des renforts

Les résultats issus de ces 2 bilans des masses révèlent un gain de masse d'environ 30 kg pour la structure n°2 par rapport à la structure n°1. Connaissant la masse de ces 2 structures, nous pouvons désormais déterminer le bilan des masses global (Figure 37) comprenant l'ensemble des éléments du Mini-Bee.

Bilan des masses global		Quantité	Masse (kg)
Structure	Structure n°1 (aluminium)	N/A	84,77
	Structure n°2 (aluminium + toile)	N/A	57,35
	Structure supérieure	N/A	80,00
	Renforts	N/A	32,59
Propulsion	Rotax 915 iS + intercooler + fixations	N/A	100,00
	EMRAX 228	2	24,60
	Redresseurs	4	0,88
	Supercondensateurs	666	14,19
	Contrôleurs de puissance	10	5,00
	Moteurs U12 II KV120	60	46,68
	Hélices G34*11,5	60	7,80
	Commandes de vol	N/A	15,00
	Câbles électriques	N/A	16,00
	Kérosène	100	80,00
Autre	Système d'atterrissage	N/A	30,00
	Sièges	2	10,00
	Amortisseurs sièges	2	15,00
	Parachute	1	22,00
	Passagers	2	170,00
Masse totale avec la structure n°1 (aluminium) (kg) :			754,51
Masse totale avec la structure n°2 (aluminium + toile) (kg) :			727,09

Masse d'un EMRAX 228 (kg) :	12,30
Masse d'un redresseur (kg) :	0,22
Masse d'un supercondensateur (kg) :	0,02
Masse d'un contrôleur de puissance (kg) :	0,50
Masse d'un moteur U12 II KV120 (kg) :	0,78
Masse d'une hélice G34*11,5 (kg) :	0,13
Masse d'un litre de kérosène (kg) :	0,80
Masse d'un siège (kg) :	5,00
Masse d'un amortisseur de siège (kg) :	7,50
Masse d'un passager (kg) :	85,00
Estimation	

Figure 37 : Bilan des masses global selon la structure sélectionnée

La masse totale du Mini-Bee avec la structure n°1, exclusivement composée de plaques d'aluminium est de 754,51 kg tandis qu'elle est de 727,09 kg avec la structure n°2 qui combine plaques d'aluminium et toile. Ces 2 résultats dépassent néanmoins la masse maximale imposée par le cahier des charges qui est pour rappel de 700 kg.

Afin de répondre aux objectifs pour les années à venir, il sera nécessaire de travailler sur l'optimisation de la structure en termes de bilan des masses. Des solutions devront être envisagées pour alléger la structure sans compromettre sa résistance et la sécurité à bord.

Conclusion

Après de nombreux problèmes solutionnés et réflexions pour respecter le cahier des charges, nous sommes fiers d'avoir créé une maquette réaliste pour le Mini-Bee qui servira sans doute à la confection de la première maquette physique complète à taille réelle.

Le fruit de notre travail a d'ores et déjà des conséquences sur le projet Mini-Bee dans sa globalité. Nos visuels finaux se retrouveront bientôt sur le Wiki du multicoptère, les autres groupes reprennent peu à peu nos vues 3D et le groupe de l'ESTACA Bordeaux 2022-2023 a commencé à créer le squelette de notre maquette en tubes PVC. Nous nous sommes alors rendu compte de la portée de notre travail au sein du projet. Le Mini-Bee est un excellent exemple des avantages de la collaboration dans le domaine de l'ingénierie. La diversité des points de vue et l'expertise de l'équipe de projet permet d'améliorer la prise de décision et d'accroître la qualité globale et la réussite du projet.

La forme globale du Mini-Bee, la maquette numérique et les visualisations ont beaucoup évolué depuis la genèse du projet et arrivent aujourd'hui à un niveau de précision satisfaisant.

Cependant, il reste tout de même des détails à régler pour assurer une fabrication sans accroc. Les futurs groupes qui auront l'opportunité de travailler sur ce projet collaboratif pourront évoluer dans plusieurs domaines au sein de la maquette numérique. Tout d'abord, il reste à modéliser et fixer les accessoires pour le moteur Rotax, les fixations des trains, ainsi que le lien entre structure supérieure et plafonnier de la cabine. Il faudra ensuite réfléchir au câblage entre les moteurs et les rotors, ainsi que celui qui relie les instruments. Enfin, il sera nécessaire d'optimiser la structure afin de respecter les critères de masse.

Le Mini-Bee aura sous peu droit à sa première version tangible, mais le projet ne va pas s'arrêter là. Bientôt, le Mini-Bee sera fonctionnel et pourra être présenté au Salon du Bourget. Peut-être même qu'un jour, des groupes d'étudiants travailleront à le rendre autonome pour faciliter l'emport de matériel, voire de blessés.

Nous serions honorés de continuer à travailler sur ce projet, mais il est temps pour nous de passer le flambeau. En outre, bien que notre contribution, pour le moment, s'arrête ici, ce projet a de l'avenir et n'aura de cesse d'évoluer en accord avec son temps.

Autres tableaux

TYPES		800	900	1050
Coefficient de sécurité du parachute par ASTM F2316-12		Test ASTM 1,5		
Poids maximum autorisé MTOW	Kg	800	900	1050
Vitesse maximum autorisée VNE	Km/h	380	350	315
Contrainte de choc maximum à l'ouverture à VNE et MTOW	kN/G	46,0/5,9	45,5/5,2	47,4/4,9
Testé temps total de la canopée à plein temps en VNE et MTOW	sec.	5,7		
Temps moyen de pleine ouverture du parachute pour une vitesse de 95 km/hod. à MTOW	sec.	6,0		
Taux de chute enregistré au 1000m/AMSL Min. Max MTOW m/s Taux de chute enregistré au 1500m/AMSL	m/s	7,1-7,9 7,3-8,1		
Maximum la résistance du couvert à la vitesse 250 km/h	Kg	1000		
Ouverture maximale de fonctionnement pour un impact dynamique 250 Km/h	kN	48,7		
Hauteur minimum de sécurité à l'ouverture une vitesse horizontale à la vitesse 95 km/hod.	m.	140		
Méthode éjection		court manche		
Parachute				
Surface	m ²	175		
Nombre de suspentes et panneaux		40		
Diametre nominal	m	13,1		
la quantité des fentes/Slider*		160*		
Dispositif balistique		Moteur-fusée MK4		
Système de mise a feu		Dual primer		
Puissance de la roquette au démarrage		670 N/sec. 68Kg		
Puissance de la roquette a son maximum		930 N/sec. 94Kg		
Poids du système balistique		2.62Kg		
Durée de la flamme (-40°C - +60°C)		1 sec. ± 0,2 sec.		
Cycle Exchange 6 ans				
Dimensions				
Soft pack B1-LxWxD	cm	48x34x23		
B2-LxWxD	cm	48x38x21		
Unité de poids - GRS				
Sangle principale longueur	m.	3x 4		
poids	Kg	0,9		
Poids total ±4% GRS Soft B GRS Soft B2	Kg	--- 21,7		

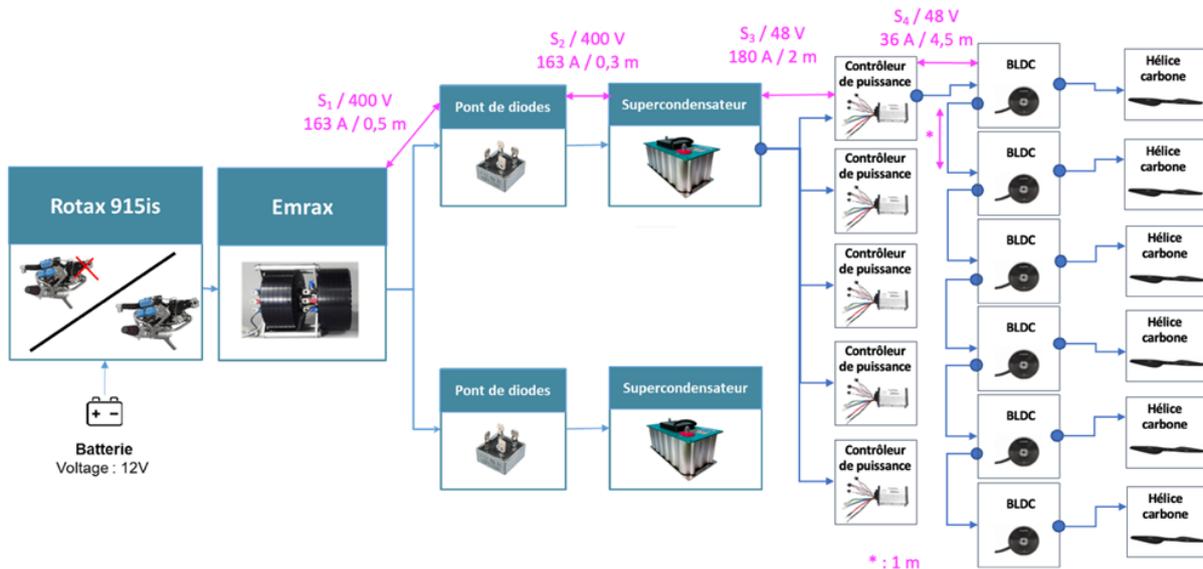
Annexe 3 : Fiche technique du parachute GRS 6 800-990

		Puissance moteur (kW)							
		Manette des gaz							
		70,0%	75,0%	80,0%	85,0%	90,0%	95,0%	97,5%	100,0%
Nombre de tour par minute	4 000 RPM	29,0	33,0	36,5	40,5	45,0	52,0	58,0	62,0
	4 500 RPM	28,0	32,5	37,5	43,0	50,0	59,0	69,0	77,0
	5 000 RPM	27,0	32,0	39,0	45,0	55,0	65,0	79,0	89,0
	5 500 RPM	25,0	31,0	37,5	44,5	57,0	71,0	87,0	99,0
	5 800 RPM	24,0	30,0	36,5	43,5	58,0	74,0	92,0	104,0

		Consommation horaire (L/h)							
		Manette des gaz							
		70,0%	75,0%	80,0%	85,0%	90,0%	95,0%	97,5%	100,0%
Nombre de tour par minute	4 000 RPM	12,0	14,5	15,5	17,5	19,0	21,0	23,5	26,0
	4 500 RPM	12,3	15,0	17,0	19,5	22,0	24,5	27,0	32,5
	5 000 RPM	12,5	15,5	17,5	20,0	23,5	28,0	32,5	38,0
	5 500 RPM	13,0	16,0	18,0	20,5	25,0	30,0	36,0	44,5
	5 800 RPM	13,5	16,5	18,5	21,0	27,0	32,5	39,0	47,0

Annexe 4 : Tableaux de la puissance moteur et de la conso horaire

Câbles électriques



Annexe 5 : Représentation schématique du circuit électrique présent dans le Mini-Bee

Les valeurs du circuit électrique dans la représentation ci-dessus nous ont été transmises par nos collègues du groupe chargé de la chaîne de propulsion. Grâce à ces valeurs, nous avons pu calculer la section des câbles à l'aide de la formule suivante :

$$S = \frac{\rho * 2 L * P}{\Delta max U * U}$$

Avec :

- S : la section du câble en mm^2
- $\rho = 0,0179 \Omega \cdot mm^2/m$: la résistivité du cuivre
- L : la longueur d'un câble en m
- $P = U * I$: la puissance maximale en W
- $\Delta_{max}U$: la perte maximale de tension admissible en V (2% est suffisant)
- U : la tension nominale d'alimentation en V

Les applications numériques nous donnent :

$$S_1 = \frac{0,0179 * (2 * 0,5) * (400 * 163)}{(0,02 * 400) * 400} \approx 1,5 \text{ mm}^2$$

$$S_2 = \frac{0,0179 * (2 * 0,3) * (400 * 163)}{(0,02 * 400) * 400} \approx 1,5 \text{ mm}^2$$

$$S_3 = \frac{0,0179 * (2 * 2) * (48 * 180)}{(0,02 * 48) * 48} \approx 16 \text{ mm}^2$$

$$S_4 = \frac{0,0179 * (2 * 4,5) * (48 * 36)}{(0,02 * 48) * 48} \approx 10 \text{ mm}^2$$

Il est important de noter que les résultats des applications numériques précédentes ont été arrondies à la valeur de section normalisée supérieure. Nous pouvons désormais déterminer la masse linéique des câbles sans isolant, en utilisant la formule suivante :

$$M = S * L * \rho$$

Avec :

- M : la masse d'un mètre de câble sans isolant en kg
- S : la section d'un câble en m^2
- L : la longueur d'un câble en m (pour déterminer la masse linéique, $L = 1$)
- $\rho = 8900 \text{ kg}/m^3$: la masse volumique du cuivre

Les applications numériques nous donnent :

$$M_1 = M_2 = (1,5 * 10^{-6}) * 1 * 8900 = 13,35 \text{ g}$$

$$M_3 = (1,6 * 10^{-5}) * 1 * 8900 = 142,4 \text{ g}$$

$$M_4 = (1 * 10^{-5}) * 1 * 8900 = 89 \text{ g}$$

Afin de déterminer la masse totale des câbles électriques, il suffit désormais de multiplier les différentes masses linéiques obtenues par le nombre de câbles et les longueurs correspondantes, puis d'ajouter la masse de l'isolant. En moyenne, celle-ci représente environ un tiers de la masse du câble à nu.

$$M_{tot} = 2 * (0,5 * M_1) * 2 * (0,3 * M_2) * 10 * (2 * M_3) + 10 * (4,5 * M_4) + 50 * (1 * M_4) + 4000$$

$$M_{tot} = 13,35 + 8,01 + 2848 + 4005 + 4450 + 4000 \approx \boxed{16 \text{ kg}}$$

Câbles entre les BLDC
Estimation masse isolant (en g)

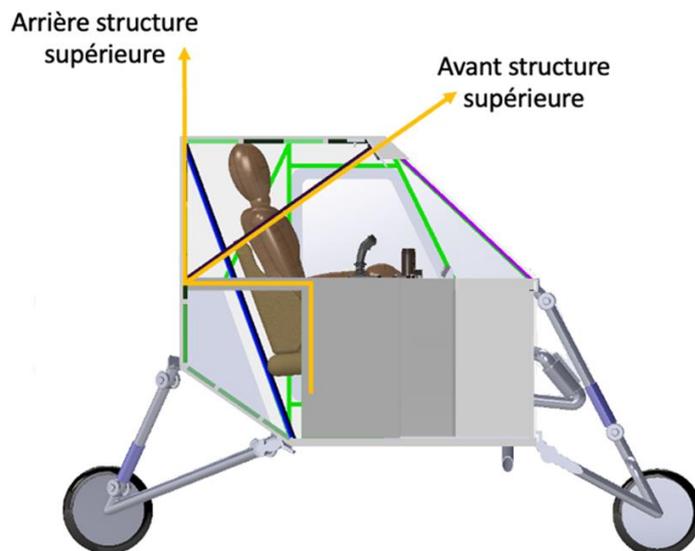
Finalement, nous obtenons une masse totale d'environ 16 kg pour les câbles électriques.

Ce résultat nous semble relativement faible compte tenu de la longueur, du nombre et des valeurs des grandeurs électriques impliquées.

Concernant l'emplacement des câbles, une solution envisageable consisterait à les faire passer dans la poutre centrale, puis à les séparer en 2 groupes pour les diriger :

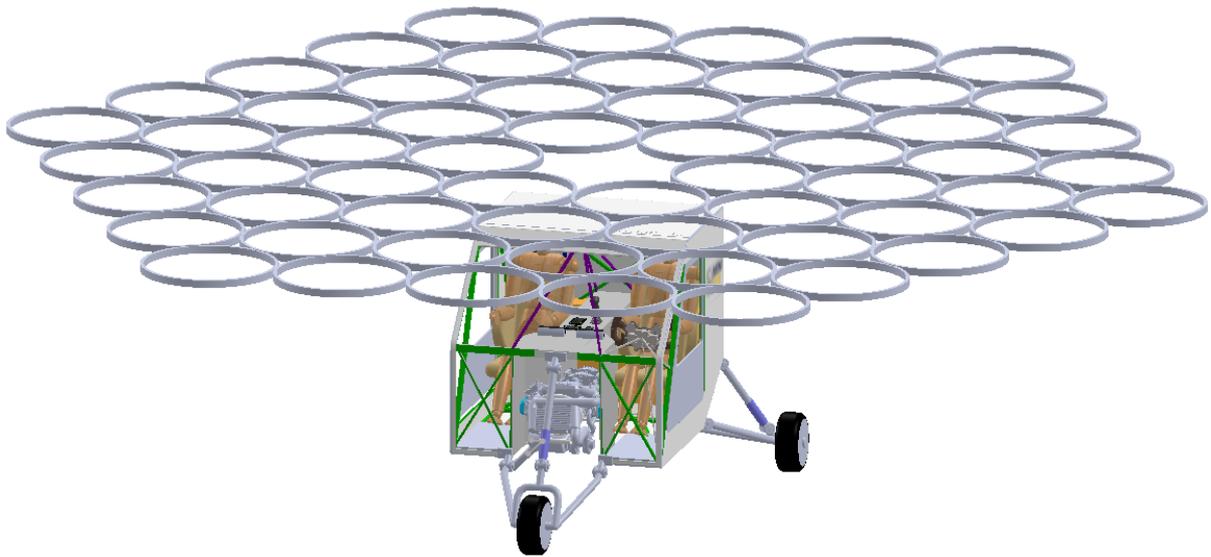
- Vers l'avant de la structure supérieure en longeant le renfort
- Vers l'arrière en longeant la paroi arrière verticale

Cette solution est présentée sur l'image ci-dessous où les câbles sont représentés en orange :

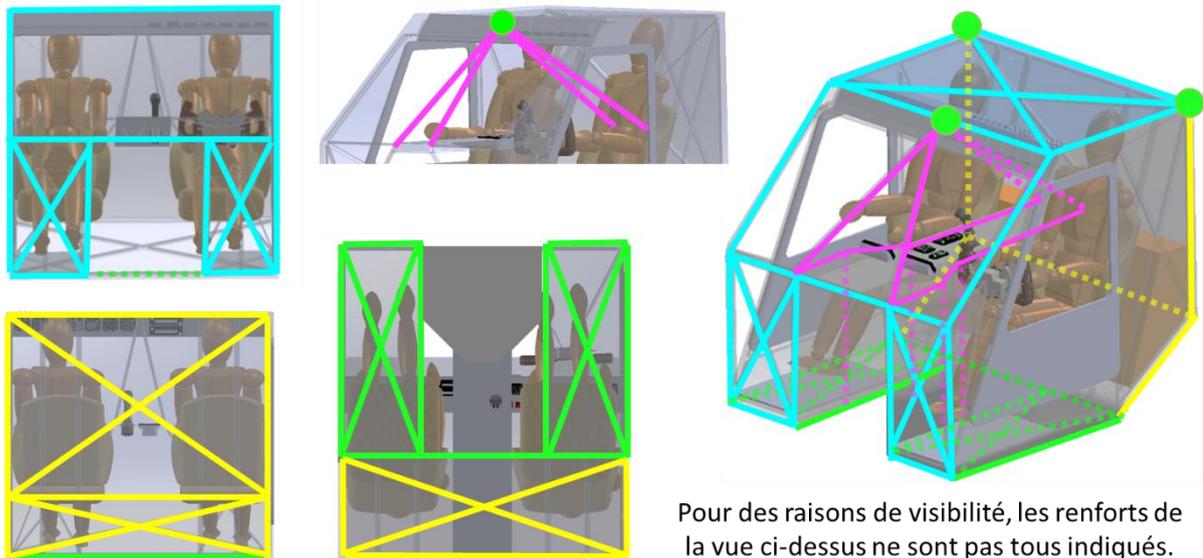


Annexe 6 : Représentation schématique de l'emplacement des câbles électriques

Vues finales

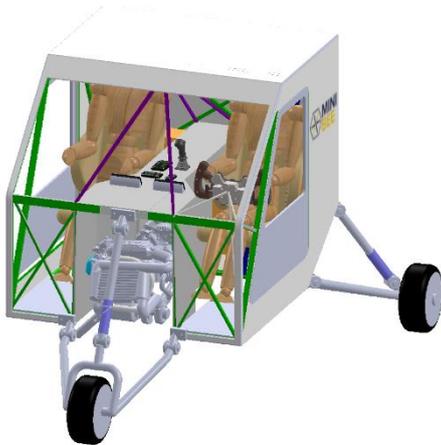


Annexe 7 : Vue d'ensemble du Mini-Bee avec ses 60 rotors

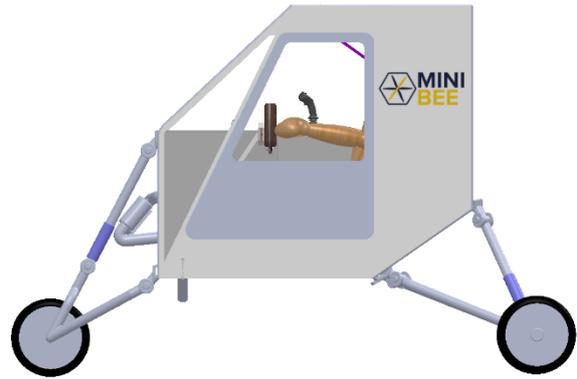


Pour des raisons de visibilité, les renforts de la vue ci-dessus ne sont pas tous indiqués.

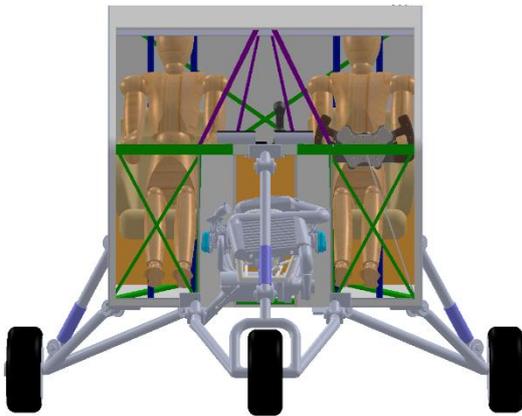
Annexe 8 : Vues transparentes de la cabine avec les renforts en surbrillance



Annexe 9 : Vue en perspective de la cabine



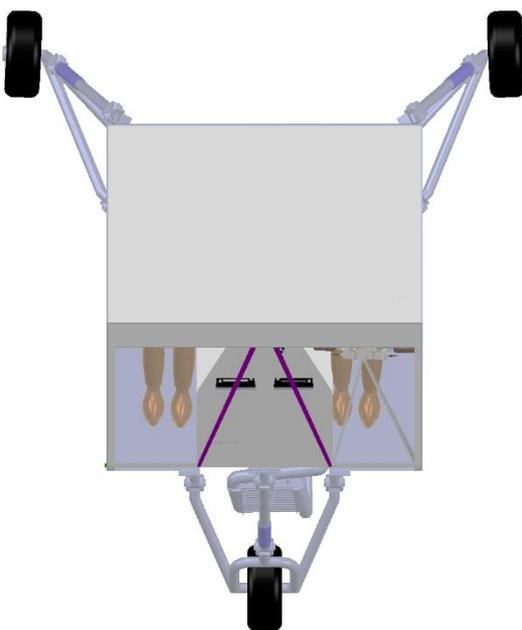
Annexe 10 : Vue de profil de la cabine



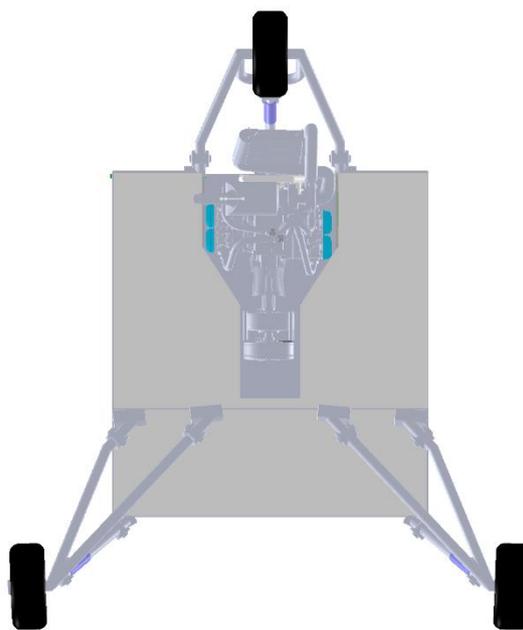
Annexe 11 : Vue de face de la cabine



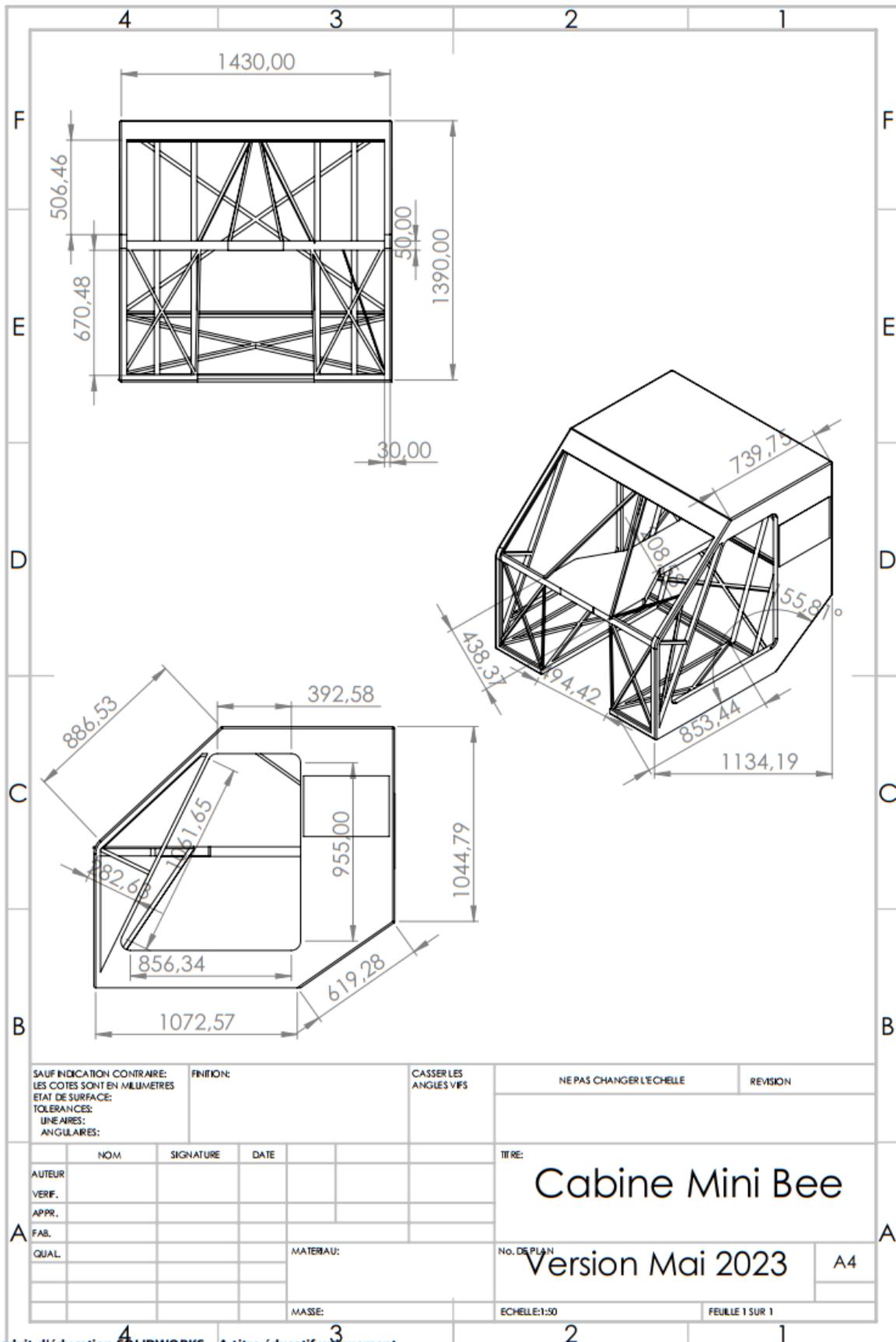
Annexe 12 : Vue arrière de la cabine



Annexe 13 : Vue du dessus de la cabine



Annexe 14 : Vue du dessous de la cabine



Produit d'éducation SOLIDWORKS – A titre éducatif uniquement.

Annexe 15 : Mise en plan de la cabine