

Projet de quatrième année :  
**CERTIFICATION  
DU MINIBEE**

ANTOINE DUPRÉ, ARTHUR FOL,  
MAXIME JANSSEN, CLÉMENT ROBERT ET  
LUCAS SANTER

## REMERCIEMENTS

Nous tenions à remercier l'ensemble des personnes qui ont contribué à notre avancée dans le projet.

Nous voudrions dans un premier temps remercier tout particulièrement le responsable du projet Mini-Bee, notre tuteur M. Xavier DUTERTRE qui nous a encadré, aidé et orienté. Les conseils et les critiques qu'il nous a apporté nous ont guidé tout au long de l'année dans nos réflexions sur le projet.

Nous remercions également l'ensemble des autres équipes travaillant sur le projet, qui ont su répondre à nos questions, et qui ont su nous donner les éléments techniques nécessaires à la certification.

# SOMMAIRE

## Table des matières

<b>I.</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>3</b>
	<b>Présentation du projet .....</b>	<b>3</b>
	<b>Etat de l'art des VTOL .....</b>	<b>4</b>
	Single Person VTOL : .....	4
	Air-Taxi : .....	4
	Cargo VTOL : .....	4
	Jobby Aviation la première licorne dans le monde des VTOL.....	5
	Conclusion : .....	5
<b>II.</b>	<b>Structure du mini-Bee .....</b>	<b>6</b>
	<b>Version R2H10A4P3/SC-VTOL (ambulance) .....</b>	<b>6</b>
	Quel type de mission ?.....	6
	Caractéristiques techniques de l'appareil .....	6
	Une structure modulaire et facilement transportable.....	7
	Aménagement des modules et profil de la structure .....	8
	Les trains d'atterrissage .....	10
	<b>Version R1H6A0P2/ULM.....</b>	<b>11</b>
	Quel intérêt d'une plus petite version ? .....	11
	Quelles différences avec la version R2H6A4 ? .....	11
	Une structure modulaire et facilement transportable.....	11
<b>III.</b>	<b>Définition de la certification.....</b>	<b>13</b>
	<b>Présentation des certifications.....</b>	<b>13</b>
	La CS-23 .....	13
	La CS-27 .....	13
	La CS-VLR.....	13
	La catégorie ULM.....	13
	La SC-VTOL.....	14
	<b>Certification du R2 : .....</b>	<b>15</b>
	<b>Certification du R1 : .....</b>	<b>17</b>
	<b>Validation des choix .....</b>	<b>18</b>
	Une simplification drastique des exigences de sécurité et de performances. ....	18
	L'ULM est un produit plus accessible. ....	18
	En contrepartie, l'ULM perd en opérabilité : .....	18
	<b>Pour résumer : .....</b>	<b>21</b>
<b>IV.</b>	<b>Commandes de vol .....</b>	<b>22</b>
	<b>Rappel de la certification concernant les systèmes de commande de vol :.....</b>	<b>22</b>
	<b>Les fonctions du volant.....</b>	<b>22</b>
	<b>Les différentes versions de volants .....</b>	<b>23</b>
	Première version : .....	23
	Volant avec joystick : .....	23
	Volant avec automanette des gaz : .....	24
	<b>Inconvénients du volant .....</b>	<b>24</b>

Solution du joystick .....	24
Récapitulatif des solutions.....	25
<b>V. Étude des cas de panne du groupe motopropulseur.....</b>	<b>26</b>
<b>Le groupe motopropulseur et ses pannes .....</b>	<b>26</b>
<b>Lien avec la SC-VTOL.....</b>	<b>26</b>
<b>Analyse des différents éléments .....</b>	<b>27</b>
Méthode de cotation pour la gravité et la fréquence .....	27
Les Rotax.....	28
Liaison Mécanique .....	28
Les Emrax.....	28
Liaison Electrique.....	29
Rotor .....	29
Hélice .....	29
<b>Différents modes de défaillance.....</b>	<b>30</b>
Défaillances liées aux Rotax.....	30
Défaillances liées aux Emrax.....	30
Défaillances liées au circuit de transmission mécanique .....	31
Défaillances liées au circuit de transmission électrique .....	31
Défaillances liées aux rotors .....	31
Défaillances liées aux hélices .....	32
<b>Arbre de défaillances.....</b>	<b>33</b>
Conséquences Catastrophiques .....	33
Conséquences Dangereuses.....	33
Conséquences Majeures .....	35
Conséquences Mineures.....	35
<b>Diagramme récapitulatif.....</b>	<b>35</b>
<b>VI. Étude des systèmes anti-crash .....</b>	<b>36</b>
<b>Le parachute .....</b>	<b>36</b>
L'histoire du parachute .....	36
Mais pourquoi pas équiper l'avion d'un parachute ?.....	36
Le parachute sur le Mini-Bee .....	37
<b>Cas de panne en dessous du seuil d'action du parachute .....</b>	<b>38</b>
Siège amorti : .....	38
Amortisseur .....	38
Réglementation : .....	38
<b>Calcul des taux de survie du pilote .....</b>	<b>39</b>
Choc encaissable par un humain.....	39
Calcul des hauteurs de chute .....	40
Ce que dit la réglementation.....	41
<b>VII. Certification du Cockpit .....</b>	<b>42</b>
Étude de L'ENSAM .....	42
Ce que dit la certification .....	43
<b>VIII. Conclusion.....</b>	<b>44</b>
Le futur de la certification .....	44
Introspection de l'équipe .....	45
<b>Annexe 1_ Tableau récapitulatif cas de pannes du groupe Motopropulseur.....</b>	<b>46</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>47</b>

# I. Introduction

## Présentation du projet

Au cours de notre quatrième année à l'ESTACA, nous avons été amenés à effectuer un projet technique. Notre sujet était : la certification du MiniBee.

Nous avons donc rejoint ce projet en début d'année scolaire afin de définir la certification à laquelle le MiniBee est sujet, redéfinir une vue d'ensemble du projet, et effectuer un état de l'art des VTOL existants.

Le projet MiniBee est un projet de Vertical Take Off and Landing aircraft (VTOL) lancé en janvier 2015 par Xavier Dutertre. Ce projet est collaboratif et mobilise de nombreuses écoles pour son développement. Le MiniBee est à la base un VTOL hybride permettant de transporter un brancard, il a ainsi pour principal objectif d'intervenir sur différents théâtres d'opérations, notamment lors de catastrophes naturelles pour venir au secours de personnes en danger. Afin d'effectuer ce type de mission, quatre fonctions principales ainsi qu'un objectif de développement ont été retenus :

- Pouvoir intervenir au plus vite
- Pouvoir se projeter sur les lieux d'une catastrophe
- Pouvoir transporter du matériel médical
- Pouvoir transporter d'éventuels blessés
- Être deux fois moins cher qu'un hélicoptère

Afin de remplir au mieux ces différentes fonctions et objectifs, les équipes se sont concentrées sur la transportabilité de l'appareil. Cet aspect est très important pour assurer une déployabilité optimale de l'appareil.

Au cours du projet, une version plus petite a commencé à être développée, suite au souhait de notre tuteur. La structure et les équipements étant similaires, le but est de développer cette version plus rapidement, afin d'éprouver la structure et les systèmes avant d'entamer la construction de la plus grande version.

Dans ce rapport nous vous présenterons donc les deux versions du MiniBee, les certifications associées, l'état de l'art des VTOL ainsi que le choix sur les commandes de vol et l'analyse des cas de pannes de l'appareil.

## Etat de l'art des VTOL

Depuis le début du XXIème siècle, plusieurs ingénieurs et scientifiques pensent que l'avenir s'oriente vers la « voiture volante ». En effet, avec la densification de la circulation dans les zones urbaines, certains cherchent des solutions alternatives en se tournant naturellement vers les airs.

Mais c'est à partir de 2016 avec l'étude d'Uber Elevate que les choses s'accroissent et que le nombre d'entreprises et de Start-up augmente de façon exponentielle. Depuis, elles se comptent en centaines et toutes ne sont pas au même niveau d'avancement mais la plupart se tournent vers des technologies issues des drones pour créer un véhicule aussi pratique qu'un hélicoptère mais aux performances se rapprochant plus d'un avion.

Finalement, on distingue majoritairement 3 types de VTOL :

- Le single person VTOL
- Le « Air-taxi »
- Le Cargo VTOL (Pour le transport de fret)

### Single Person VTOL :

Lancé par l'étude Uber Elevate et boosté par le concours GoFly où celui qui, en premier, mettra au point un véhicule capable de transporter une personne dans les airs dans des conditions sûres remporte 2m de dollars.

Voici donc les projets les plus avancés :



ElectraFlight, USA



ElectricJetAircraft, USA



SureFly, USA



EHang, China

### Air-Taxi :

Très prometteur aux vues des nombreuses levées de fond et des sommes astronomiques en jeu, le Air-Taxi s'annonce comme la prochaine innovation majeure dans le monde des transports. Dans cette course contre la montre, les petites start-ups luttent contre les géants de l'industrie qui n'hésitent pas à investir d'énormes moyens. Voici donc les projets les plus prometteurs dont certains volent déjà.



A3, USA



Moller, USA



AirCar, USA

### Cargo VTOL :

On connaissait le projet de livraison par drones d'Amazon et certaines Start-up travaillent donc logiquement sur le transport de fret par des VTOLs. Néanmoins, la plupart des projets présentés n'utilisent pas de pilotes, il s'agit donc bien de drones au sens propre du terme.

Voici donc les 2 projets les plus audacieux :



ElroyAir, USA



EAM, USA

Jobby Aviation la première licorne dans le monde des VTOL

Le monde des VTOL est en pleine expansion mais deux Start up sortent déjà du lot avec des projets solides et des investissements délirants :

-Lillium Jet : La start up Allemande dont le prototype vole déjà avec ses 36 moteurs depuis 2019.

-Jobby Aviation : Première licorne (start up dépassant le milliard de dollars d'investissement) dans ce secteur que nous avons choisi de vous présenter ici.

Présenté au VFM 2020 pour la première fois au public son prototype a su séduire les investisseurs. En effet, cette start-up lancée début en 2009 et dirigée par JoeBen Bevirt à Santa Cruz a levé \$590M en série C avec \$390M venant du fond d'investissement de Toyota pour un total de \$790M. Maintenant en partenariat avec Uber, le projet a déjà bien avancé et on observe les caractéristiques suivantes :

- Validation de la CS 23
- Unified flight control
- All-electric conventional or vertical takeoff and landing (eCTOL and eVTOL)
- 480 km/h en croisière
- Autonomie : 240 km
- 100 fois plus silencieux qu'un hélicoptère



Conclusion :

On observe de nombreux projets prometteurs, néanmoins, la plupart en sont encore aux prototypes et très peu volent déjà. En revanche quasiment tous s'orientent vers l'avenir en choisissant l'électrique.

## II. Structure du mini-Bee

Version R2H10A4P3/SC-VTOL (ambulance)



Quel type de mission ?

La version R2A4H10P3 a pour principale mission le sauvetage de personne en danger. Le VTOL a tout de suite été envisagé pour effectuer ce type de mission, en effet elle requiert la possibilité de décoller et d'atterrir sur des terrains restreints. Cette version peut donc transporter un pilote ainsi que trois passagers ou un passager avec une personne sur un brancard. Un transport de matériel médical/kit de survie est également possible grâce à la présence de rangements à l'intérieur de l'appareil.

Caractéristiques techniques de l'appareil

VTOL hybride piloté

Mission type: HEMS (Helicopter Emergency Medical Services)

Nombre de personnes à bord : pilote + 1 passager + 1 personne sur le brancard

MTOW : **1200 kg**

Distance franchissable : **800 km**

Vitesse de croisière : **200 km/h**

Altitude de croisière : **2000 m**

Motorisation : 2 moteurs thermiques (Rotax 915) et 10 moteurs électriques (Emrax 208)

Pour les déplacements et la sustentation de l'appareil :

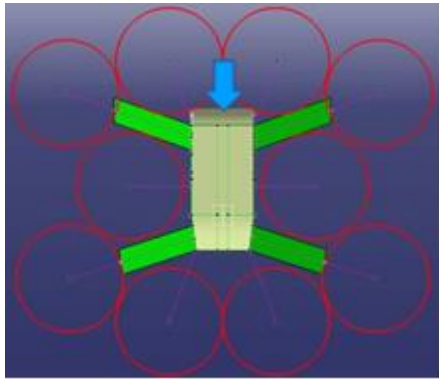
Nombre d'hélices : 10 pour la sustentation, 2 en traction et 2 en propulsion pour les déplacements horizontaux

Diamètre hélice : **3,6m**

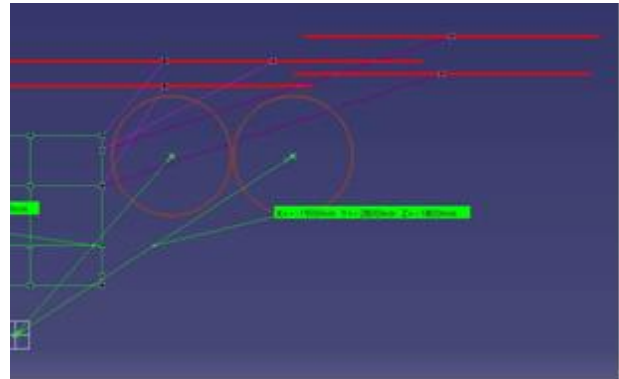
Poussée par hélice : **95 kg**

Surface : **10\*10m<sup>2</sup>**





Hélices pour les déplacements verticaux



Hélices pour les déplacements horizontaux

Une structure modulaire et facilement transportable

Afin de pouvoir intervenir au plus vite après une catastrophe naturelle, il a fallu dessiner un appareil facilement transportable. Il a donc été décidé que sa structure serait sous forme modulaire, avec :

- **Un module « passager »** où l'on retrouve l'habitacle avec l'ensemble des commandes de vol du cockpit
- **Un module « générateur »** où l'on retrouve les deux moteurs Rotax 915 ainsi que le réservoir

Module passager

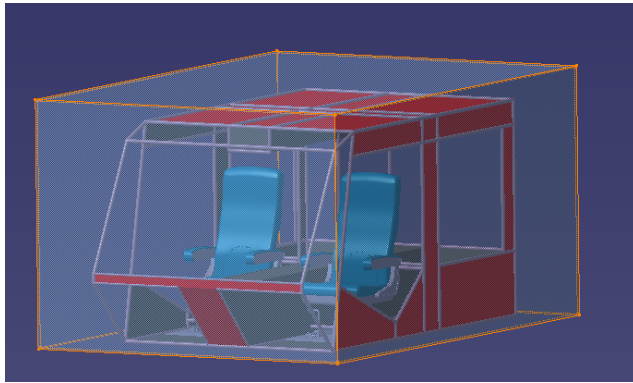


Module générateur

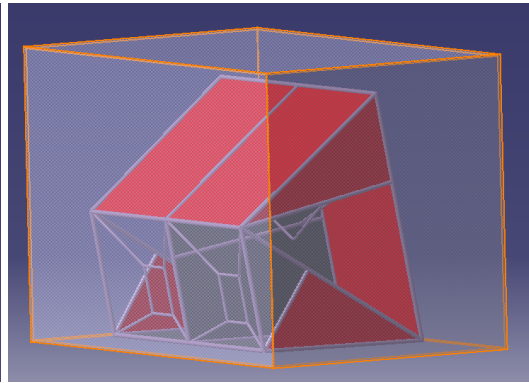
À ces deux modules, on y ajoute les ailes, les hélices, ainsi que les bras des hélices qui sont aussi démontables.

Pour faciliter le plus possible le transport du Mini Bee, les containers choisis, sont des containers standard pouvant être transportés par des avions de ligne long courrier (B777, B777F, B747, B747F)

- **Un container LD-9** (3,175m x 2,235m x 1,626m) pour le module passager (2,97m x 1,75m x 1,5m)
- **Un container LD-4** (2,438m x 1,534m x 1,626m) pour le module générateur (1m x 1,75m x 1,5m)
- **Un container LD-9** (3,175m x 2,235m x 1,626m) pour les 4 ailes (2 x 2,4m & 2 x 2,3m) les bras des ailes (2 x 2,53m & 4 x 1,6m & 4 x 2m)



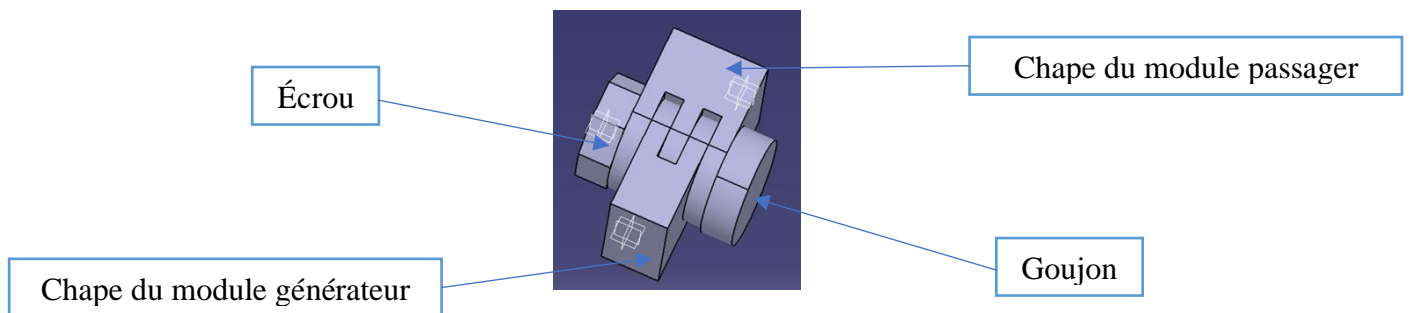
Module passager dans un container LD9



Module générateur dans un container LD4

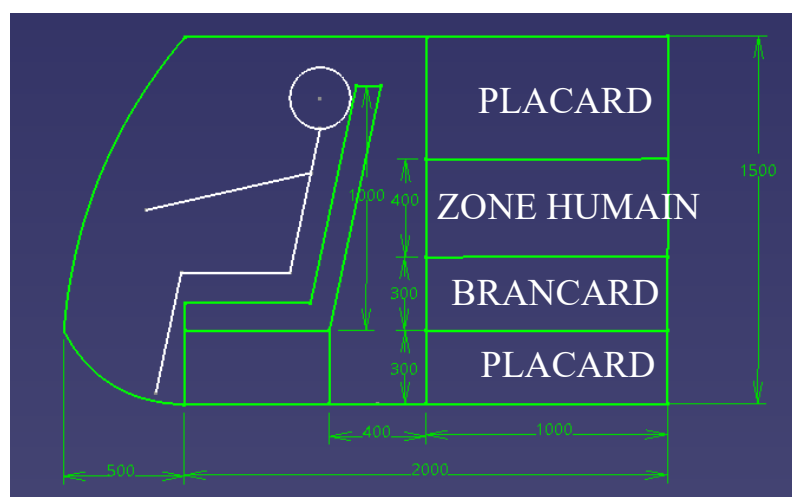
Afin de faciliter le démontage/montage du MiniBee un système de chape a été choisi. Celui-ci présente plusieurs avantages :

- Nombre d'outils nécessaires restreints
- Temps nécessaire pour le montage/démontage diminué (quelques minutes)

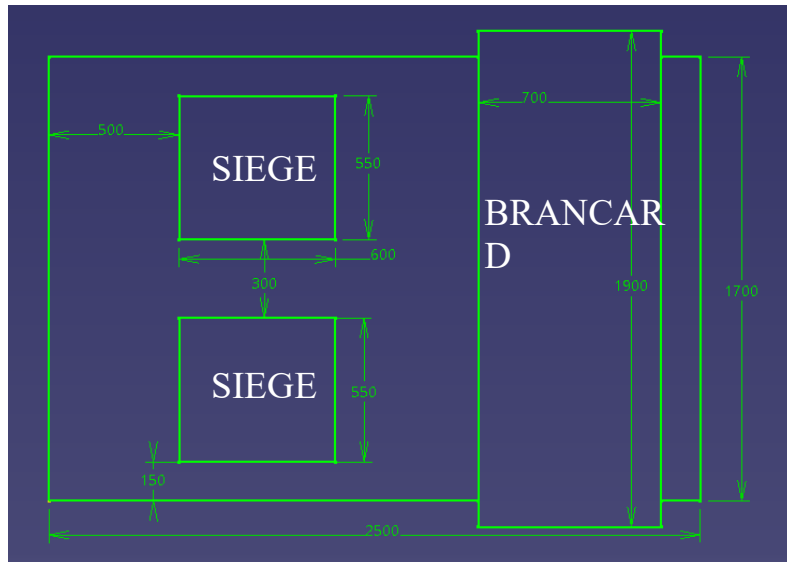


Aménagement des modules et profil de la structure

Pour le module passager, la fonction principale de l'appareil de pouvoir emporter une personne sur un brancard est un élément contraignant dans le dimensionnement de la structure.



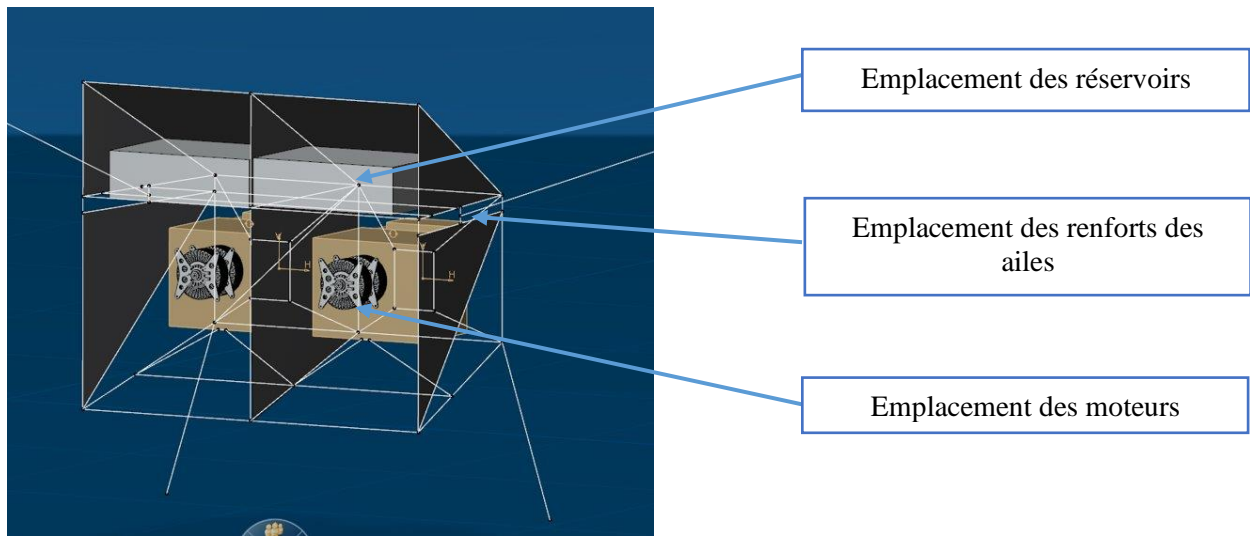
Aménagement vu de profil



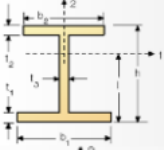
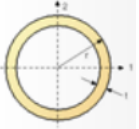
Aménagement vu du haut

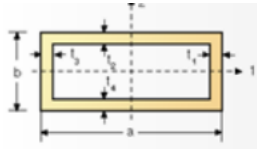
Le placard du haut est situé uniquement au niveau des pieds de la personne sur le brancard, en effet, l'accès est dégagé dans le cas où un massage cardiaque serait nécessaire.

Pour le module générateur, on retrouve les moteurs, le réservoir, ainsi qu'un renfort pour les ailes.



Pour la composition de la structure une analyse des différents types de profils a été effectuée. Pour rappel, les différents types étudiés sont :

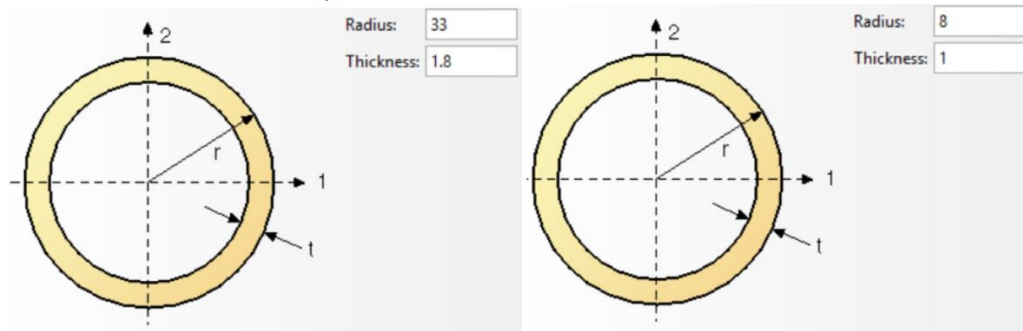
- Profil en I 
- Profil circulaire 



- Profil carré

Après analyse, l'architecture la plus résistante semblait être le profil en I, seulement celui-ci étant plus difficile à se procurer il a été retiré de l'étude. Pour les deux autres profils, à masses équivalentes les efforts structuraux étaient plus faibles dans le profil circulaire.

Le profil circulaire a donc été choisi pour la suite de l'étude :



Une grande partie de la structure est constituée de poutre à profil circulaire, mais on y retrouve également des profils en L et en T.

### Les trains d'atterrissage

Pour les trains d'atterrissage une analyse a été effectuée par un groupe de l'ESTACA Laval. Au cours de cette analyse, trois types de trains ont été étudiés :

- Trains escamotables
- Trains fixes
- Patins

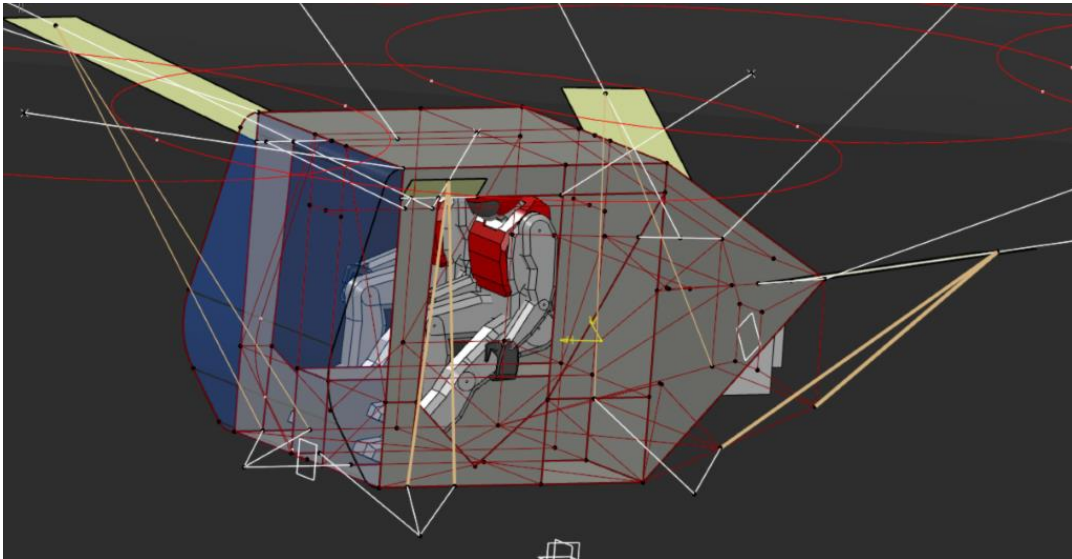
Le troisième type de train a été directement éliminé car celui-ci ne permet pas de rouler.

Le premier type de train présente un aspect aérodynamique non négligeable, en effet en vol celui-ci est rentré et n'induit donc pas de la traînée. En revanche, ces trains sont plus lourds à cause de la présence d'un mécanisme permettant de rentrer les trains. De plus un éventuel montage/démontage de cette partie pour le transport n'est pas envisageable étant donnée la complexité du système.

Enfin les trains fixes, permettent eux de rouler, mais ne sont pas aérodynamiques. Cependant, le système d'attache au MiniBee est relativement simple et ne nécessite que quelques minutes pour son montage/démontage contrairement au train escamotable qui nécessite plusieurs heures de travail. Le gain de poids est également significatif entre les deux modèles. Il a donc été décidé de se tourner vers ce type de train.

## Version R1H6A0P2/ULM

Dans cette seconde partie est développée la version **R1H6A0P2/ULM**, version plus petite que la précédente :



Quel intérêt d'une plus petite version ?

La version R1H6A0 permettrait un transport de personne et n'aurait plus la fonction « ambulance » de la plus grande version. Cette version du MiniBee se placerait d'avantage sur le marché du Taxi volant. Une version plus petite permettrait également un développement plus rapide et donc une première vision sur la structure qui serait semblable à celle de la version supérieure.

Quelles différences avec la version R2H6A4 ?

Comme son nom l'indique, cette version du MiniBee a pour principales différences de ne contenir qu'un seul Rotax 915, 6 hélices, et d'être sans ailes. Sa masse est donc fortement réduite. Le module passager étant plus petit peut transporter un pilote ainsi qu'un passager.

Distance franchissable : **600km**

Vitesse de croisière : **148km/h**

Altitude de croisière : **2000m**

Nombre de place : **2**

Poids : **550kg**

Poussée par hélice : **91kg**

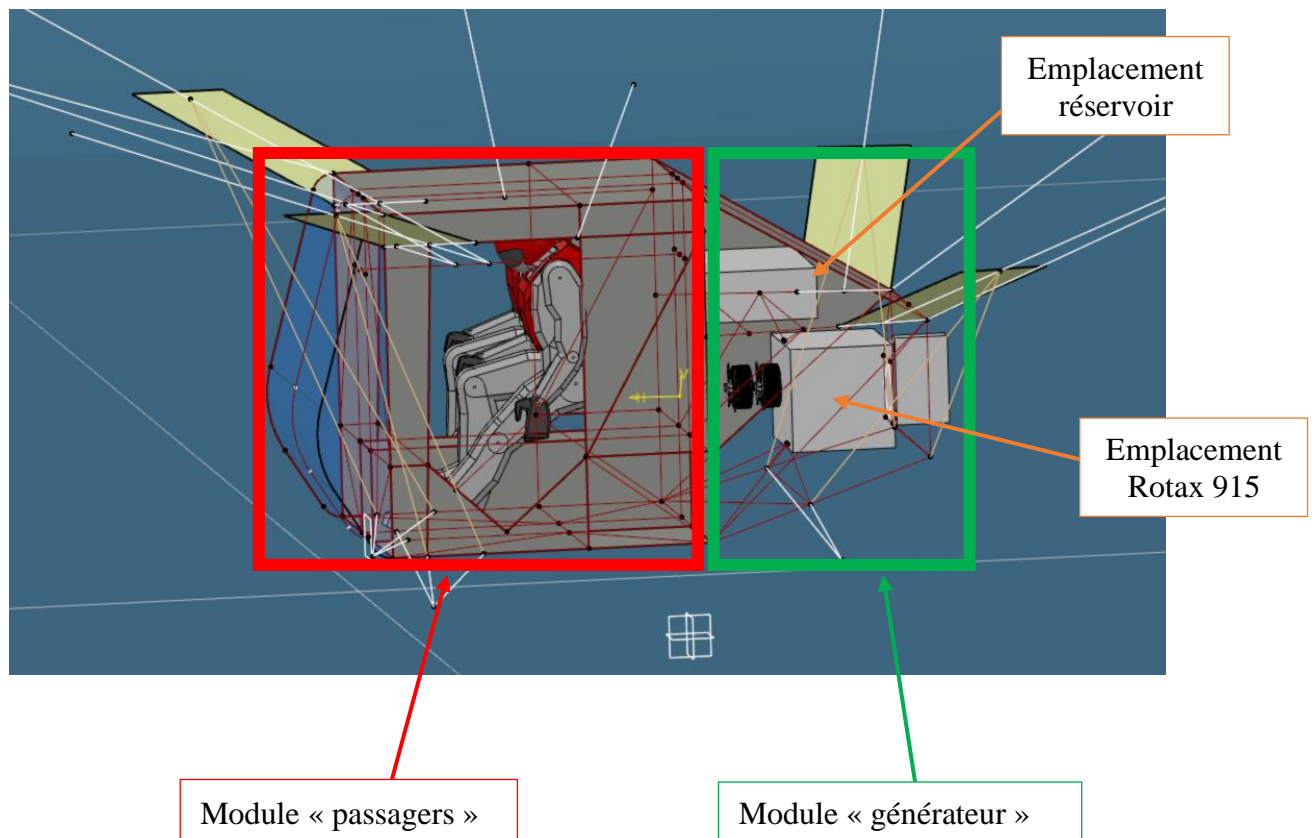
Surface : **7\*7m<sup>2</sup>**

Une structure modulaire et facilement transportable

Le Mini Bee R1H6A0 est ainsi composé de 2 modules :

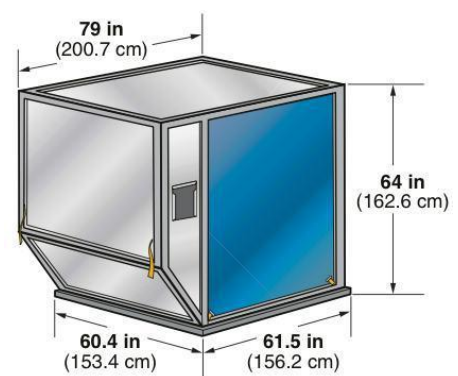
- **Un module « passagers »** où l'on retrouve l'habitacle avec l'ensemble des commandes de vol du cockpit ainsi que deux places (pilote + passager/copilote)
- **Un module « générateur »** où l'on retrouve le moteur Rotax 915 ainsi que le réservoir

À ces deux modules, on y ajoute les hélices, ainsi que les bras des hélices qui sont aussi démontables.



Comme pour la version supérieure, le transport du MiniBee R1 est essentiel, c'est pourquoi ce modèle peut être transporté en seulement deux containers :

- **Un container LD-3** pour le module passager
- **Un container LD-3** pour le module générateur et les hélices



L'avantage de ce container est qu'il est le plus courant dans les avions de ligne long courrier, ainsi on le retrouve dans B777/B777F/B747/B747F/B767/B787/A330/A340/A350/A380. Ce qui fait de cette version, la plus facilement transportable des deux.

## III. Définition de la certification

### Présentation des certifications

En débutant ce projet, nous avons d'abord commencé par nous documenter sur toutes les certifications existantes pouvant s'appliquer à nos prototypes.

#### La CS-23

Elle s'applique aux avions de petite et moyenne taille, transportant au maximum 19 passagers et pour un poids inférieur ou égal à 8618 kg.

On distingue 4 niveaux de certification :

- Niveau 1 : aéronef avec une configuration de sièges permettant le transport de 0 à 1 passager.
- Niveau 2 : aéronef avec une configuration de sièges permettant le transport de 2 à 6 passagers.
- Niveau 3 : aéronef avec une configuration de sièges permettant le transport de 7 à 9 passagers.
- Niveau 4 : aéronef avec une configuration de sièges permettant le transport de 10 à 19 passagers.

Nous avons ensuite des niveaux de performances :

- Faible vitesse : pour les aéronefs dont la VNO (vitesse normale d'opération) ou la VMO (vitesse max d'opération)  $\leq 250$  kt, ou MMO (mach maximum operating)  $\leq 0.6$
- Grande vitesse : pour les aéronefs dont la VNO (vitesse normale d'opération) ou la VMO (vitesse max d'opération)  $> 250$  kt, ou MMO (mach maximum operating)  $> 0.6$

Il est important de spécifier si l'aéronef est conçu pour effectuer des acrobaties aériennes.

#### La CS-27

Cette certification est réservée aux petits hélicoptères de moins de 3175 kg avec moins de 9 passagers.

#### La CS-VLR

La CS-VLR est spécifique aux *Very Light Rotorcraft*. Elle s'applique donc aux hélicoptères ultra légers avec un poids maximum de 600 kg, seulement 2 occupants et n'étant pas alimenté par un moteur turbine ou fusée. Les aéronefs en CS-VLR sont utilisables uniquement en VFR.

#### La catégorie ULM

Cette certification est particulière : elle ne dépend pas de l'EASA, mais d'un organisme d'État par pays. En France, c'est la DGAC qui s'en occupe. Cette différence par rapport aux autres certifications se

caractérise par une simplification des exigences, mais aussi une validité limitée aux frontières de l'hexagone.

En France, la catégorie ULM est déclinée en 6 classifications, résumées dans le tableau ci-contre :

	Classe 1 paramoteurs	Classe 2 pendulaires	Classe 3 multiaxes	Classe 4 autogires	Classe 5 dirigeables		Classe 6 hélicoptères
					Motif d'exemption des règles européennes : <b>§ h) de l'annexe I (y compris ULM de série)</b>	Autres motifs (ex : amateur ou kit - règle des 51%)	
monoplace	300 kg <sup>1</sup> 60 kW	300 kg <sup>1</sup> 60 kW 65 km/h	330 kg <sup>1</sup> 65 kW 70 km/h	330 kg <sup>1</sup> 85 kW (3)	1200 m <sup>3</sup> air chaud 400 m <sup>3</sup> autre gaz	2000 m <sup>3</sup> air chaud 900 m <sup>3</sup> autre gaz	330 kg <sup>1</sup> 85 kW (4)
biplace	450 kg <sup>2</sup> 75 kW	450 kg <sup>2</sup> 75 kW 65 km/h	500 kg <sup>2</sup> 80 kW 70 km/h	500 kg <sup>2</sup> 105 kW (3)			500 kg <sup>2</sup> 105 kW (4)

<sup>(1)</sup> + 15 kg si parachute pour les classes 1 à 4 et 6, + 30 kg si l'ULM est destiné à être exploité sur l'eau pour les classes 2 à 4 et 6 (cumulables)

<sup>(2)</sup> + 25 kg si parachute pour les classes 1 à 4 et 6, + 45 kg si l'ULM est destiné à être exploité sur l'eau pour les classes 2 à 4 et 6 (cumulables)

<sup>(3)</sup> charge rotorique à la masse max comprise entre 4,5 et 12 kg/m<sup>2</sup>

<sup>(4)</sup> charge rotorique à la masse max comprise entre 8 et 20 kg/m<sup>2</sup>

Pour nos prototypes, nous serons concernés par la classe 6 des hélicoptères.

## La SC-VTOL

La SC-VTOL est particulière car ce n'est pas une *Certification Specification* mais une *Special Condition*. Cette certification a été créée en juillet 2019 pour répondre à l'émergence croissante de ces appareils à décollage et atterrissage verticaux, qui éprouvaient des difficultés à répondre aux certifications classiques comme la CS-23 et 27. En effet, la délivrance d'un certificat de type pour un aéronef relativement "hors-standard" peut être problématique. La plupart des conditions spéciales sont de petits changements apportés aux exigences basées sur quelque chose qui n'avait pas été anticipé lorsque la règle a été écrite.

Les critères d'application sont :

- 9 occupants maximum
- Masse maximum au décollage de moins de 3175 kg.

La SC-VTOL se divise en deux catégories : « de base » pour les opérations non commerciales et à moindre risque et « Amélioré » pour les vols survolant des zones plus peuplées ou les opérations commerciales.

- **La catégorie de base** exige qu'en cas d'atterrissage d'urgence, le véhicule doit pouvoir être contrôlé jusqu'au sol. Elle est destinée aux opérations non commerciales.
- **La catégorie Améliorée** exige qu'aucune défaillance unique ne puisse avoir un effet catastrophique sur les aéronefs. Elle est destinée au survol d'agglomération et par extension au transport commercial.

En plus de s'adapter au VTOL, cette certification est plus flexible que les autres, son but premier étant de permettre le développement de projets innovants. La SC-VTOL est donc doublement intéressante.

Notre projet se décompose en deux prototypes, il y a donc deux certifications à valider. Les prototypes étant à l'état de maquette numérique, nous avons dû nous comparer à des aéronefs déjà existants pour pouvoir avancer dans notre démarche. Ces choix de comparaison sont effectués en fonction du poids, du gabarit, des performances et des capacités de chacun.



Dans cette étude, nous nous intéresserons d'abord au R2H10A4P3, puis nous discuterons du R1H6A0P2.

### Certification du R2 :

Nos choix d'appareils de comparaison pour ce prototype se sont portés sur le Cessna 172, avion léger classé en CS-23 et le R44, hélicoptère léger classé en CS-27.



Cessna 172



R44

À titre indicatif, voici un tableau de comparaison :

	<b>R44</b>	<b>Cessna172</b>	<b>R2H10A4P3</b>
<b>Nombre de places</b>	4	4	4 ou 2+1 brancard
<b>Vitesse de croisière</b>	209 km/h	226 km/h	200 km/h
<b>Rayon d'action</b>	740 km	1185 km	800 km
<b>Poids</b>	1087 kg	757 kg	1200 kg
<b>Altitude max</b>	14 000 ft	14 000 ft	14 000 ft
<b>Distance au décollage</b>	N/A	497 m	*
<b>Vitesse de montée</b>	60 kt (vertical)	730 ft/min	*
<b>Taux de descente (approche)</b>	30 kt (vertical)	-500 ft/min	*
<b>Vitesse d'atterrissage</b>	N/A	65 kt	*
<b>Distance d'atterrissage</b>	N/A	390 m	*
<b>Vitesse de décrochage</b>	130 kt	45 kt	*

\*dépend de la configuration

Le choix de certification concernant le R2 se répartit entre la CS-23, CS-27 et SC-VTOL.

Nous choisissons de nous concentrer sur la SC-VTOL.

Rappel des critères d'application :

- Masse maximale de **3175 kg**
- Emport de **9 passagers** maximum

**Masse :**

Voici un bilan de masse du R2 :

Composant	Masse unitaire	Quantité	Masse totale
<b>Systèmes propulsifs</b>			
Carburant	0,75g/L	195,94	184,95
ROTAX 915is	84,6	2	169,2
Cables	10	1	10
Refroidissement	10	2	20
EMRAX 228 High Voltage	12,3	4	49,2
Ensemble rotor	7,7	12	92,4
Contrôleurs	0,65	12	7,8
Batterie moto	0,4	1	0,4
Sous-total			533,95
<b>Structure, pax et équipements</b>			
Module avant (structure + verrière)	136	1	136
Module générateur	38	1	38
PAX	100	3	300
Sièges	18	2	36
Civière de sauvetage	13	1	13
Ailes			100
Bras rotors			60
Trains d'atterrissage			30
Plancher			8
Portes	8	4	32
Sous-total			753
<b>Total</b>			<b>1286,95</b>

Nous obtenons une masse de 1287 kg. Nous respectons bien le critère de masse.

**Emport pax :**

Le R2 possède deux configurations de sièges, soit un couple pilote/copilote et un brancard, soit un couple pilote/copilote et deux passagers. Dans les deux cas, nous sommes en dessous de 9. Le critère de pax est respecté.

Le R2 respecte bien les critères de certification SC-VTOL.

Cette certification possède un avantage majeur qui l'amène à se démarquer des autres : une certification plus flexible.

Comme expliqué plus haut, cette certification a été très récemment conçue pour permettre aux industriels de développer de nouveaux types d'appareils et d'accentuer l'innovation face aux nombreux défis du monde aéronautique de demain. Cette flexibilité se caractérise par des critères moins précis, tout en gardant un haut niveau d'exigences en termes de sécurité.

La SC -VTOL étant une extension de la CS-23 amendement 5, choisir la CS-23 serait peu intéressant et ne prendrait pas en compte le décollage vertical de l'appareil. A l'inverse, la CS-27 ne prend pas en compte les performances d'un appareil ayant les capacités d'un avion.

Le choix de la catégorie, basique ou améliorée, s'impose.

L'objectif premier est la certification d'un appareil pouvant effectuer un survol d'agglomération afin d'effectuer des missions de sauvetage et éventuellement se convertir en taxi aérien. La catégorie améliorée semble donc la mieux adaptée.

Cependant, il sera plus facile de certifier les premiers prototypes sur une catégorie basique, destinée aux opérations non commerciales donc, et profiter des retours d'expériences et de temps pour répondre aux exigences de la catégorie améliorée.

Nous pouvons donc partir sur une catégorie basique et évoluer sur une catégorie améliorée en fonction de l'avancement du projet.

La SC-VTOL est la meilleure option pour certifier le prototype R2H10A4P3.

### Certification du R1 :

Comme pour le R2, nous avons choisi 3 appareils de comparaison : le Cessna 152, le Robin R22 et le LH 212 D.



R22



Cessna 152



LH212D

	<b>Cessna 152</b>	<b>R22</b>	<b>LH212 D</b>	<b>R1H6A0P2</b>
<b>Nombre de places</b>	2	2	2	2
<b>Vitesse de croisière</b>	198 km/h	177 km/h	160 km/h	148 km/h
<b>Rayon d'action</b>	1278 km	386 km	450 km	400 km
<b>Poids</b>	757 kg	622 kg	450 kg	628 kg
<b>Altitude max</b>	14 000 ft	14 000 ft	12 000 ft	12 000 ft

<b>Distance au décollage</b>	408 m	N/A	N/A	*
<b>Vitesse de montée</b>	720 kt	1200 ft/min	1350 ft/min	*
<b>Distance d'atterrissage</b>	366	N/A	N/A	*
<b>Vitesse de décrochage</b>	35 kt	102 kt	110 kt	*
<b>Puissance moteur</b>	80 kW	91 kW	85 kW	104 kW

\*dépend de la configuration

Le choix de certification possible concernant le R1 reprend ceux du R2, à savoir la CS-23, CS-27 et SC-VTOL mais du fait de sa masse réduite, la CS-VLR et l'ULM sont envisageables.

## Validation des choix

Nous choisissons de nous concentrer sur la certification ULM. Ce choix est motivé par deux critères :

### Une simplification drastique des exigences de sécurité et de performances.

Pour donner un ordre d'idée, la certification ULM française fait 17 pages, là où la CS-23 en fait 33, et la CS-27, 168 ! Cette réduction d'informations nécessaires à l'obtention de la certification fait de l'ULM la moins contraignante de toutes.

### L'ULM est un produit plus accessible.

A la différence de toutes les autres qualifications d'aéronefs, la qualification de pilote d'ULM ne nécessite pas de visite médicale poussée. Cet avantage permet aux personnes plus âgées, ayant des déficits visuels ou autres problèmes physiques mineurs de pouvoir voler là où une qualification de type PPL (licence de pilote privé) aurait été inenvisageable. La formation est plus courte et l'heure de vol est la moins chère après le planeur. En somme, le marché de l'ULM s'adresse à une plus grande partie de la population que celui de l'avion.

### En contrepartie, l'ULM perd en opérabilité :

- Vol limité au VFR.

Le vol VFR est le vol à vue. Cela signifie que l'aéronef doit respecter certaines conditions de visibilité et de distance horizontale et verticale par rapport aux nuages. De plus, les règles dépendent de la classification des espaces aériens. Certains espaces aériens sont libres au VFR, d'autres sont interdits (survol de Paris par exemple), d'autres autorisés avec accord préalable du contrôle aérien. Cette limitation restreint grandement l'aéronef dans les missions qui peuvent lui être confiées.

- Certification valide uniquement en France.

La certification ULM étant déposée par des organismes d'État, elle n'est valable que dans ledit État. Si l'aéronef souhaite voler dans un autre pays, il doit répondre aux qualifications de certification du pays

en question. Cela réduit considérablement l'opérabilité de l'appareil, sachant que la France est actuellement l'une des plus clémentes en Europe.

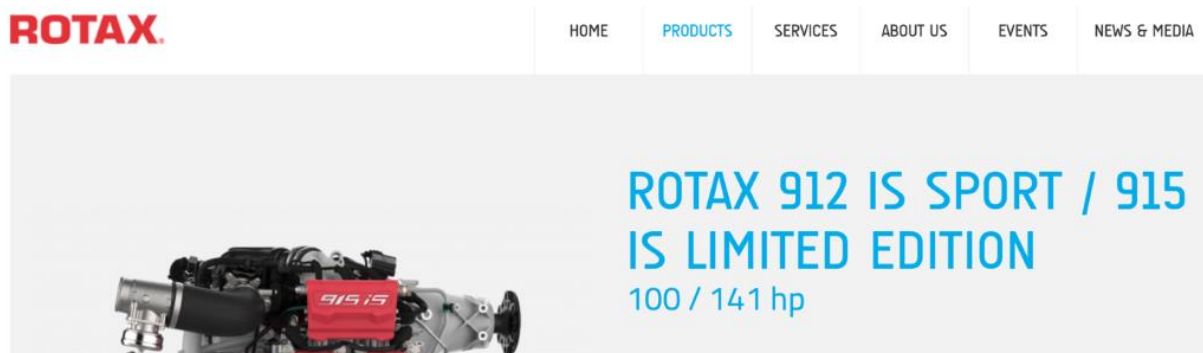
La certification ULM possède donc certains avantages par rapport aux CS classiques, mais aussi des inconvénients non négligeables qu'il faudra prendre en compte dans la décision finale de certification.

Intéressons-nous au respect des critères de certification ULM :

Pour rappel, la classe 6 de l'ULM biplace impose :

- Puissance max : **105 kW**
- Charge rotorique à masse max : **entre 8 et 20 kg/m<sup>2</sup>**
- Masse max : **500 kg + 25 kg** de bonification dû à l'emport d'un parachute.

### Puissance :



Page web du fournisseur Rotax

La puissance maximale du Rotax 915 IS est de 141 ch soit **104 kW**. Le critère de puissance est donc respecté.

### Charge rotorique :

La charge rotorique est calculée suivant cette formule :

$$\frac{\text{poids}}{\text{nb rotors}} \times \frac{1}{D^2 \times \frac{\pi}{4}} = \text{Charge}_{rot}$$

On obtient alors

$$\text{Charge}_{rot} = \mathbf{11,4 \text{ kg/m}^2}$$

Cette valeur est bien comprise entre 8 et 20, la charge rotorique est bonne.

### Masse :

Nous avons effectué un bilan de masse sur ce prototype :

composant	masse unitaire	quantité	masse totale
<b>systèmes propulsifs</b>			
Rotax 915 IS	84,6	1	84,6
EMRAX 208	9,3	2	18,6
Refroidissement	10	1	10
Cables	3	1	3
Ensemble rotor	7,7	8	61,6
Contrôleurs	0,65	8	5,2
Batterie	0,4	1	0,4
Carburant	0,75 g/L	45	33,75
		Sout-total	202,15
<b>Structure, pax et équipements</b>			
Module avant (structure + verrière)	102	1	102
Module générateur	38	1	38
PAX	86	2	172
Sièges	18	2	36
Civière de sauvetage	13	0	0
Ailes	18	0	0
Bras rotors	6	6	36
Trains d'atterrissage	12	2	24
Plancher	6	1	6
Portes	6	2	12
		Sous-total	426
		<b>Total</b>	<b>628,15</b>

Il s'avère que la masse du R1 dépasse de 103 kg la masse maximale autorisée. Ce problème de surpoids paralyse la certification ULM.

Deux options s'offrent à nous :

- **Réduire la masse**

C'est l'option la plus évidente mais ce n'est pas la plus aisée ; il faut retirer 16% de la masse actuelle, sans compromettre l'opérabilité de l'appareil.

Cependant, ce bilan de masse a été effectué en ayant un regard pessimiste sur les choix de masse unitaire. Il reste à déterminer de combien nous serons capables de réduire ces masses.

Des efforts peuvent certainement être fait sur le poids des portes, des sièges et surtout du module avant.

La diminution à un seul passager a été envisagée, ce qui aurait permis un allègement d'environ 80 kg. Malheureusement la transformation à un passager fait basculer notre prototype dans la catégorie ULM monoplace, où la limitation de masse est fixée à 345 kg. Cette option n'est donc pas envisageable.

La diminution de l'emport carburant n'est pas non plus une option. Les 45 L présents sont réglementaires, et assurent la sécurité de l'appareil au cours du vol.

- **Changer de certification**

Changer de certification signifie perdre les avantages de l'ULM. Nous retournons alors à nos choix de certifications classiques. Le choix le plus logique parmi celles-ci reviendrait à la SC-VTOL. Toutefois, notre faible masse nous permet d'envisager une autre possibilité : la CS-VLR. Cette certification, délivrée par l'EASA, est à la base destinée aux hélicoptères ultralégers. Elle possède les mêmes caractéristiques que la CS-27 mais à l'avantage d'être moins fournie, donc plus souple.

Nous répondons déjà aux critères de propulsion, d'emport passager et de navigation. Seule la masse reste excédentaire de 28 kg. Cela apparaît toutefois beaucoup plus atteignable que 103kg. La CS-VLR semble donc viable. Elle est plus lourde que la certification ULM, moins adaptée à notre prototype que la SC-VTOL, mais reste intéressante de par sa validité en Europe et des exigences moins fortes qu'une CS-27.

#### Pour résumer :

La certification ULM est celle que nous désirons. Elle n'est pas réalisable pour le moment, il faut perdre du poids. Si l'allègement de la structure n'est pas suffisant, la CS-VLR est envisageable. En cas de non-conformité avec notre prototype, la SC-VTOL reste une certification valable.

## IV. Commandes de vol

Rappel de la certification concernant les systèmes de commande de vol :

### VTOL.2300 Flight control systems

(a) The flight control systems must be designed to:

(1) operate easily, smoothly, and positively enough to allow proper performance of their functions; (2) protect against likely hazards;

(3) allow flight crew to be aware of the control limits. (b) Trim systems, if installed, must be designed to:

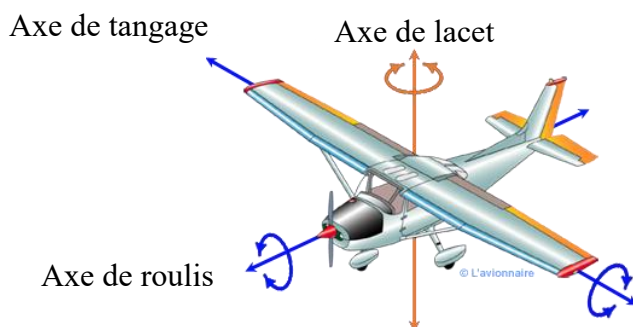
(1) protect against inadvertent, incorrect, or abrupt trim operation;

(2) provide information that is required for safe operation.

Dans le but de répondre à ces exigences, nous nous sommes penchés sur le système permettant le pilotage de l'appareil. L'idée de base pour ce système était la solution présentée au salon du Bourget, qui consiste en un volant. En effet, cela permet aux néophytes de comprendre facilement comment diriger l'appareil dans l'espace. Nous allons voir quelles sont les fonctions auxquelles doit répondre le système de commandes de vol.

### Les fonctions du volant

Premièrement, ces commandes de vol doivent permettre de diriger l'appareil dans les 3 dimensions. On repère donc 3 axes permettant d'orienter l'appareil dans l'espace :



Ensuite, il faut que les commandes permettent de faire monter ou descendre l'appareil, soit en agissant directement sur le régime de rotation du moteur grâce à une manette des gaz, soit par le biais de boutons agissant sur cette commande.

Enfin, il peut être inclus de pouvoir engager le pilote automatique, actionner la radio ou activer un mode standby pour rester sur place.

Pour le prototype de volant, nous avons fait appel à l'entreprise Technomap, spécialisée dans ce domaine, pour avoir des recommandations d'experts. Après quelques échanges, il en est ressorti quelques recommandations :

- En ce qui concerne les différents boutons, une seule couleur doit être attribuée par fonction pour ne pas se tromper de bouton
- Le volant doit être séparé en termes de commandes : les commandes de vol principales doivent être regroupées et décorrélées des boutons secondaires. Par exemple, si les commandes pour orienter l'appareil sont dans la partie haute du volant, les boutons de radio et autres boutons secondaires seront dans la partie basse du volant.



## Les différentes versions de volants

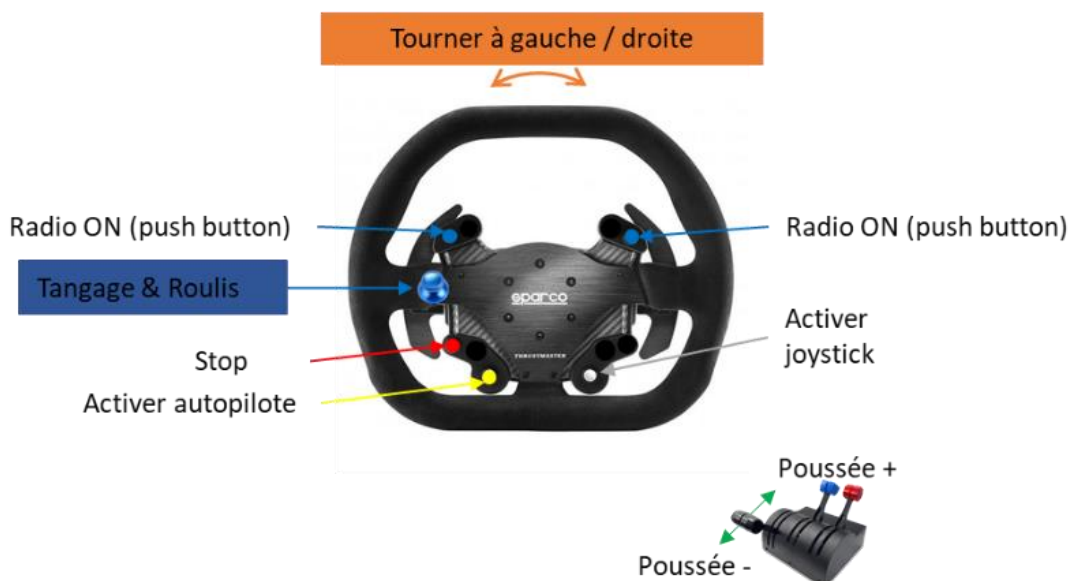
Première version :

Grâce à tous ces conseils, nous avons pu créer une première maquette de volant. L'idée de cette première version était d'avoir un volant devant le pilote pour diriger l'appareil, ainsi qu'un joystick en position centrale dans la cellule. Ce joystick avait pour but d'orienter l'appareil, mais de manière plus sportive que le volant. Le problème de cette version est que deux instruments permettent d'actionner les mêmes commandes, ce qui pourrait poser des actions involontaires voir même contradictoire. Il y avait donc ici une faille dans le système de pilotage ; un bouton permettant d'inhiber le joystick a donc été installée sur le volant. En outre, ce volant pilotait l'appareil avec des boutons agissant sur la vitesse verticale et horizontale de l'appareil, ce qui rendait l'orientation de l'appareil plus compliquée à gérer que d'agir directement sur les 3 axes que nous avons vus précédemment.



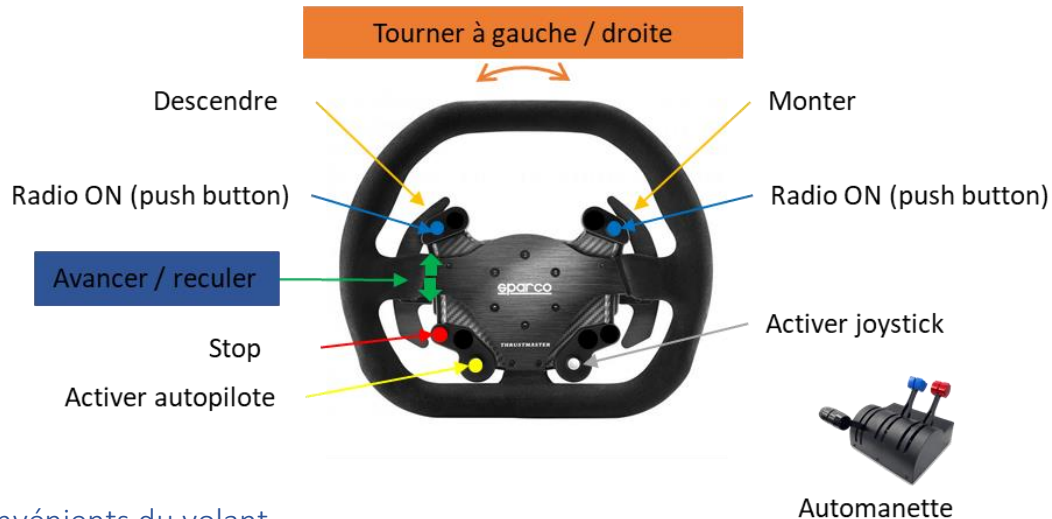
Volant avec joystick :

Nous avons donc cherché une solution pour améliorer ce volant, ce qui nous a conduit à installer un joystick de manette de console sur le volant lui-même. En effet, ceci permet d'agir sur les 3 axes de l'appareil directement sur le volant : l'action de tourner le volant agit sur l'angle de lacet, tandis que l'on gère le roulis et le tangage grâce à ce joystick. Avec cette version, il faut donc gérer la manette des gaz de manière manuelle afin de choisir son altitude de vol. Le fonctionnement de cette version est décrit dans l'animation « Animation tour de piste » disponible sur le serveur. Le seul désavantage de cette version est qu'il faut constamment gérer la manette des gaz car une commande sur l'axe de roulis affecte l'altitude de l'appareil.



## Volant avec automanette des gaz :

Nous en sommes donc arrivés à une version du volant avec une manette des gaz gérée automatiquement, avec cependant des palettes derrière le volant pour choisir de monter ou descendre. Dans un souci de recherche de simplicité et d'accès du pilotage au plus grand nombre, nous avons décidé de retirer le joystick de console de jeux du volant. Celui-ci a été remplacé par deux flèches permettant d'avancer ou de reculer. L'action de tourner le volant n'affecte maintenant plus l'angle de lacet seul, mais coordonne l'exécution d'une mise en lacet ainsi que d'une mise en tangage.



## Inconvénients du volant

Comme vu précédemment, le volant permet de comprendre facilement comment piloter un appareil qui ne ressemble en rien à une voiture, cependant il y a quelques inconvénients à son utilisation.

Premièrement, ce volant pèse lourd, en effet une masse moyenne sur le marché des volants de simulation pour jeux vidéo est de 3kg. Lorsque l'on sait que nous atteignons une certification avec seulement quelques kilogrammes en première approximation ; cela peut s'avérer être un facteur de choix pour envisager une autre solution.

Ensuite, ce volant nécessite une structure supplémentaire pour le fixer devant le pilote. Cette structure encombre l'espace visuel du pilote et ajoute également du poids au total de l'appareil. Un facteur à prendre en compte est que, de la même manière à une voiture, nous avons tendance à agripper le volant pour entrer et sortir de la voiture. Cela signifie que la structure ne doit pas seulement supporter le poids du volant, mais supporter l'effort d'une personne en plus, soit 86kg si l'on se réfère au poids d'un PAX dans la réglementation.

## Solution du joystick

Dans un souci de diminuer le poids du système de pilotage de l'appareil, nous nous sommes penchés sur une solution de joystick placé en position centrale dans l'appareil. Celui-ci contrôle directement les 3 axes de l'appareil, permettant un contrôle précis de l'attitude du Mini-Bee.



## Récapitulatif des solutions

Nous allons résumer les avantages et inconvénients du joystick ci-dessus et du dernier volant présenté dans le tableau ci-dessous :

	Avantages	Inconvénients
Volant	<ul style="list-style-type: none"><li>• Comportement similaire à une voiture</li><li>• Regroupe les boutons de manière visuelle pour le pilote</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Nécessite un logiciel pour traiter une entrée (ex: tourner à gauche = roulis + lacet)</li><li>• Prend de l'espace visuel dans le cockpit -&gt; moins de place pour instruments de navigation</li><li>• Besoin d'une structure supplémentaire pour tenir le volant dans le cockpit</li><li>• Poids ~ 3kg</li></ul>
Joystick	<ul style="list-style-type: none"><li>• Comportement similaire aux avions / hélicoptères</li><li>• Plus compact que le volant</li><li>• Situé au centre, pas besoin de structure portante</li><li>• Poids ~ 1kg</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Moins intuitif à prendre en main par un néophyte</li><li>• Plus de chances d'actionner une autre commande en faisant un mauvais geste</li></ul>

Le choix d'utiliser un joystick plutôt que le volant qui est le concept de base n'est pas figé ; ce choix sera à réévaluer une fois que les différents systèmes seront plus aboutis, notamment en fonction de la masse globale du Mini-Bee. Ce facteur pourrait être un élément majeur dans la prise de décision, en effet cela pourrait empêcher le Mini-Bee d'être certifié dans une catégorie à cause de sa masse qui ne respecte pas les critères.

## V. Étude des cas de panne du groupe motopropulseur

### Le groupe motopropulseur et ses pannes

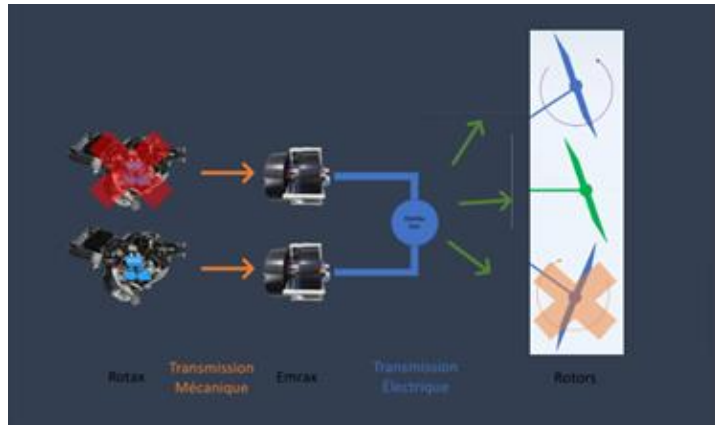
Ce groupe est composé de nombreux éléments dont :

- Les rotax
- Les emrax
- Les rotors

Chacun de ses éléments peuvent être soumis à des pannes ou dysfonctionnements différents qui auront des conséquences multiples. Il est important d'identifier ces pannes dans le cadre de la certification du

Mini-Bee pour démontrer la faible probabilité qu'aura l'aéronef à subir des conséquences catastrophiques (perte de l'appareil ou perte de vie humaine). En effet le Mini-Bee ne pouvant pas planer il est particulièrement sensible aux pannes de son groupe de propulsion qui fournit toute la poussée mais aussi la portance.

Nous étudierons tout d'abord les différents éléments du groupe motopropulseur, leurs fonctions et la gravité et fréquence de leurs défaillances. Ensuite nous expliciterons ces modes de défaillance et enfin nous proposerons des solutions à adopter pour celles-ci.



### Lien avec la SC-VTOL

Nous détaillerons dans cette étude les procédures pilote pour répondre aux pannes, cela est en lien avec la partie B.2170 de la SC-VTOL qui se nomme « Operating limitations ».

*(a) The following flight information must be established:*

*(1) operating limitations, procedures and instructions necessary for the safe operation of the aircraft.*

Elle est aussi en lien avec la C.2265 qui requiert d'évaluer la sécurité des composants critiques et la C.2270 qui nécessite la protection des occupants de l'appareil en cas d'accident et atterrissage d'urgence.

## Analyse des différents éléments

Les tableaux suivants donnent une note de gravité et de fréquence à chaque panne. La somme de ces notes nous donne un indice. Cet indice doit impérativement rester en dessous d'une certaine valeur.

Méthode de cotation pour la gravité et la fréquence

La classification des défaillances est basée sur l'AMC VTOL.2510 qui nous donne ce tableau :

		Failure Condition Classifications			
Maximum Passenger Seating Configuration		Minor	Major	Hazardous	Catastrophic
Category Enhanced	-	$\leq 10^{-3}$ FDAL D	$\leq 10^{-5}$ FDAL C	$\leq 10^{-7}$ FDAL B	$\leq 10^{-9}$ FDAL A
Category Basic	7 to 9 passengers	$\leq 10^{-3}$ FDAL D	$\leq 10^{-5}$ FDAL C	$\leq 10^{-7}$ FDAL B	$\leq 10^{-9}$ FDAL A
	2 to 6 passengers (see note A)	$\leq 10^{-3}$ FDAL D	$\leq 10^{-5}$ FDAL C	$\leq 10^{-7}$ FDAL C	$\leq 10^{-8}$ FDAL B
	0 to 1 passenger (see note A)	$\leq 10^{-3}$ FDAL D	$\leq 10^{-5}$ FDAL C	$\leq 10^{-6}$ FDAL C	$\leq 10^{-7}$ FDAL C

[Quantitative safety objectives are expressed per flight hour]

Fréquence		Gravité	
Note	Critère	Note	Critère
1	Extrêmement improbable (proba < $10^{-8}$ par heure de vol)	1	Mineur
2	Extrêmement rare (proba < $10^{-7}$ par heure de vol)	2	Majeur
3	Rare (proba < $10^{-5}$ par heure de vol)	3	Dangereux
4	Probable (proba < $10^{-3}$ par heure de vol)	4	Catastrophique



Quand l'indice est égal à 5 cela signifie qu'on est dans la zone acceptable de ce graphique. Si l'indice est supérieur à 5 on est dans la zone inacceptable. Les icônes représentent ici la solution à adopté. Nous y reviendrons plus en détails.

## Les Rotax

Nom élément	Fonction de l'élément	Sous-Fonction de l'élément	Modes de défaillance	Gravité	Fréquence	Indice
<b>Rotax</b>	Produire énergie mécanique	Transformer énergie thermique en mécanique	1 rotax fournit moins de puissance	2	3	5
			1 rotax Ne fournit plus de puissance	3	2	5
			2 rotax Fournissent moins de puissance	3	2	5
			2 rotax Ne fournissent plus de puissance	4	1	5

## Liaison Mécanique

Nom élément	Fonction de l'élément	Sous-Fonction de l'élément	Modes de défaillance	Gravité	Fréquence	Indice
<b>Liaison mécanique</b>	Transporter énergie du rotax à l'emrax		Elément brisé ou endommagé, mauvais contact	variable	variable	variable

La gravité, la fréquence et l'indice sont variables car cela dépend si une des deux liaisons est coupée (gravité 3 ; fréquence 2) ou si les deux liaisons sont coupées (gravité 4 ; fréquence 1).

## Les Emraxes

Nom élément	Fonction de l'élément	Sous-Fonction de l'élément	Modes de défaillance	Gravité	Fréquence	Indice
<b>Emrax</b>	Transformer énergie mécanique en électrique		1 emrax ne transforme qu'une partie de l'énergie	2	3	5
			1 emrax ne transforme plus d'énergie	3	2	5
			2 emraxes ne transforment qu'une partie de l'énergie	3	2	5
			2 emraxes ne transforment plus d'énergie	4	1	5

## Liaison Electrique

Nom élément	Fonction de l'élément	Sous-Fonction de l'élément	Modes de défaillance	Gravité	Fréquence	Indice
<b><u>Liaison électrique</u></b>	Transporter énergie de l'emrax au rotor		Court-Circuit, rupture	variable	variable	variable

La gravité, la fréquence et l'indice sont variables car cela dépend du nombre de liaisons coupées.

## Rotor

Nom élément	Fonction de l'élément	Sous-Fonction de l'élément	Modes de défaillance	Gravité	Fréquence	Indice
<b><u>Rotor</u></b>	Entrainer l'hélice	Transformer énergie élec en rotation	Transforme qu'une partie de l'énergie	2	3	5
			Plus d'énergie	variable	variable	variable

La gravité, la fréquence et l'indice sont variables car cela dépend du nombre de rotors défaillants.

## Hélice

Nom élément	Fonction de l'élément	Sous-Fonction de l'élément	Modes de défaillance	Gravité	Fréquence	Indice
<b><u>hélice</u></b>	Fournir poussée et portance		1 hélice perdue ; vol possible avec dissymétrie	1	4	5
			2 hélices perdues ; vol stationnaire impossible	variable	variable	variable
			3 hélices perdues ; vol stationnaire impossible	3	2	5
			4 hélices perdues ; Atterrissage d'urgence	4	1	5
			5 ou 6 hélices perdues ; Atterrissage d'urgence	4	1	5

La gravité, la fréquence et l'indice pour la perte de 2 hélices sont variables car cela dépend si ces 2 hélices sont du même côté du Mini-Bee ou non.

## Différents modes de défaillance

### Défaillances liées aux Rotax

#### Perte d'un Rotax

- Chaque Rotax a une puissance de 224 ch. Donc en cas de perte d'un rotax on a une puissance disponible restante de 224 ch.
- $Poussée = 7,4 (P \times D)^{\frac{2}{3}} \times \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{1}{3}}$  Cette formule nous donne la poussée pour un rotor.

Données : P = 224 ch ; D = 3.6 m ;  $\frac{p}{p_0}$  environ 1 car l'altitude maximum du Mini-Bee est faible.

Application numérique : poussée pour un rotor avec un Rotax en panne = 87.6 kg.

- La **poussée totale disponible** est donc de **876 kg**.

#### Perte des deux Rotax

- Perte totale de puissance et poussée verticale nulle.

#### Rotax fourni moins de puissance

- Le Rotax à cause d'une panne interne n'est plus en mesure de fournir sa puissance maximale (165 kW). La puissance disponible oscille donc entre >165 kW et <330 kW si un des deux rotax a une panne et >0 et <330 kW si les deux rotax ont une panne.

### Défaillances liées aux Emraxe

Les défaillances des Emraxe sont dues à des pannes internes à ceux-ci et à l'impossibilité de transformer une partie ou toute l'énergie mécanique en électrique. Les défaillances ont les mêmes conséquences que pour les rotax : perte de 1 ou 2 emraxe et les emraxe ne transforment pas toute l'énergie.

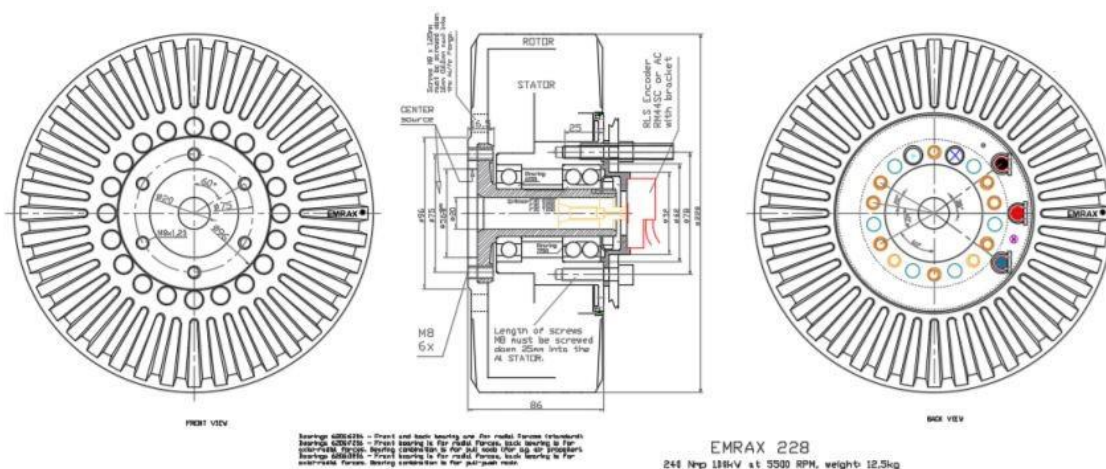
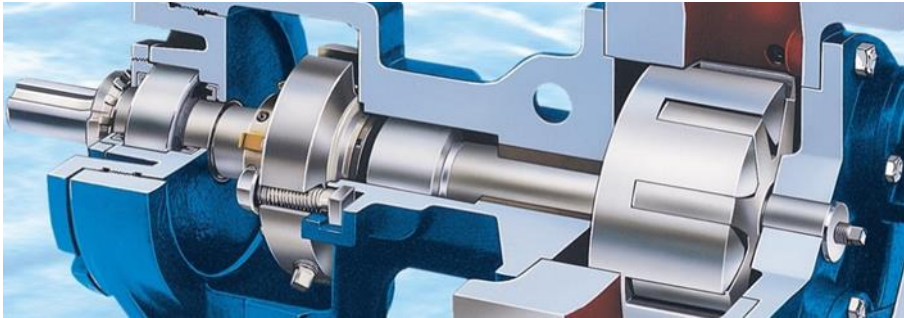


Figure 7: EMRAX 228 drawing



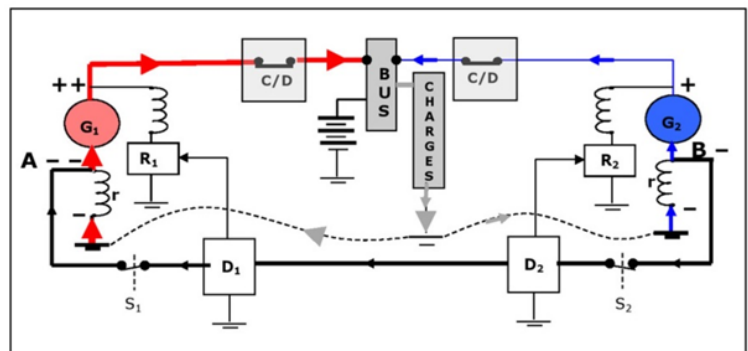
## Défaillances liées au circuit de transmission mécanique

La transmission mécanique s'effectue entre les rotax et les emrax. Cette transmission est composée d'éléments tournants et de joints qui peuvent être endommagés. Cela peut entraîner la rupture de la liaison entre un rotax et un emrax. En cas de rupture cela revient à une perte d'un emrax. En cas de mauvaise transmission cela revient à une perte de puissance sur un emrax.



## Défaillances liées au circuit de transmission électrique

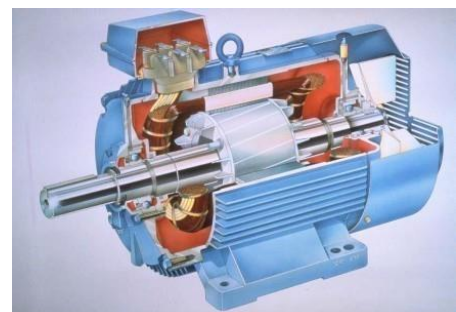
La transmission électrique se fait des emrax vers les différents rotors. Les deux emrax ainsi que les 10 rotors sont branchés en parallèle. Cela permet qu'en cas de dysfonctionnement d'une charge (rotor) ou d'une source (emrax) le système continue de fonctionner. Certaines branches peuvent présenter des défauts comme un court-circuit ou une coupure (résistance, diode, etc. qui ne fonctionne plus), on a alors la perte du rotor associé à cette branche.



*Ceci est un exemple de distribution électrique d'avion ; dans notre cas les générateurs sont remplacés par les emrax.*

## Défaillances liées aux rotors

Les rotors sont en fait des machines électriques en mode de fonctionnement moteur. Ceux-ci peuvent tomber en panne. En cas de panne ils n'entraînent plus les hélices. Il existe aussi des cas de pannes où ils ne transforment qu'une partie de l'énergie.



*Machine électrique*

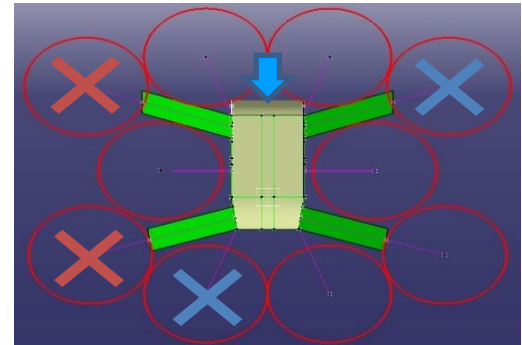
### Perte symétrique de rotors

La poussée fournie par un rotor est de **140 kg** et la MTOW est de **1 100 kg**.

Rotors perdus	Poussée restante (kg)
1	1251
2	1112
3	973 < MTOW
4	834

### Perte unilatérale de plusieurs rotors

**Poussée restante** identique que dans le cas précédant mais celle-ci sera totalement **asymétrique**. Le **maintien d'attitude** de l'appareil est **impossible** si la puissance n'est pas redistribuée.



 Unilatérale  Symétrique

### Défaillances liées aux hélices

Une hélice peut être défailante si elle est endommagée par exemple par un choc (aviaire ou objets proches du sol). Les défaillances sont alors les mêmes que pour les rotors (voir perte symétrique de rotors et perte unilatérale de plusieurs rotors).

## Arbre de défaillances

Ces différents arbres de défaillances sont liés chacun à un niveau de gravité.

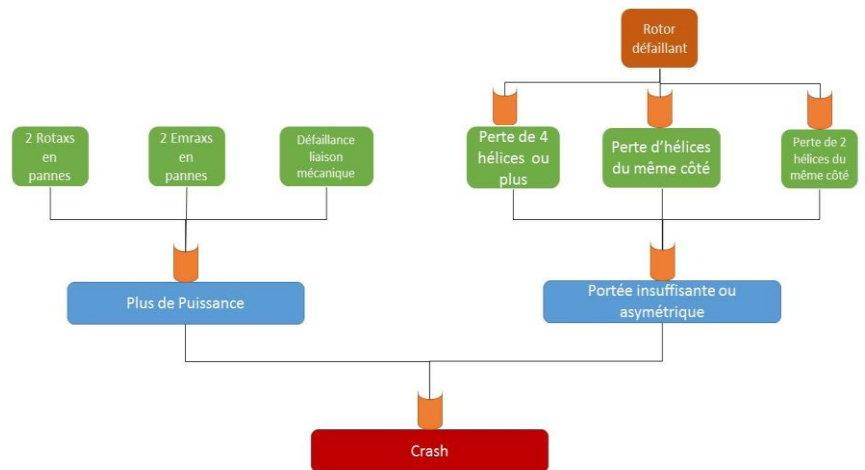
Les causes sont liées à l'événement à risque par des portes, signifiant que chaque cause doit avoir lieu pour créer l'événement.

### Conséquences Catastrophiques

*Les pannes présentées ici entraînent un aéronef totalement incontrôlable et/ou avec un taux de chute trop important. Si on ne fait rien l'aéronef se « crash ».*

#### Solutions :

- Déploiement du parachute
- Absorption du choc par la structure/siège

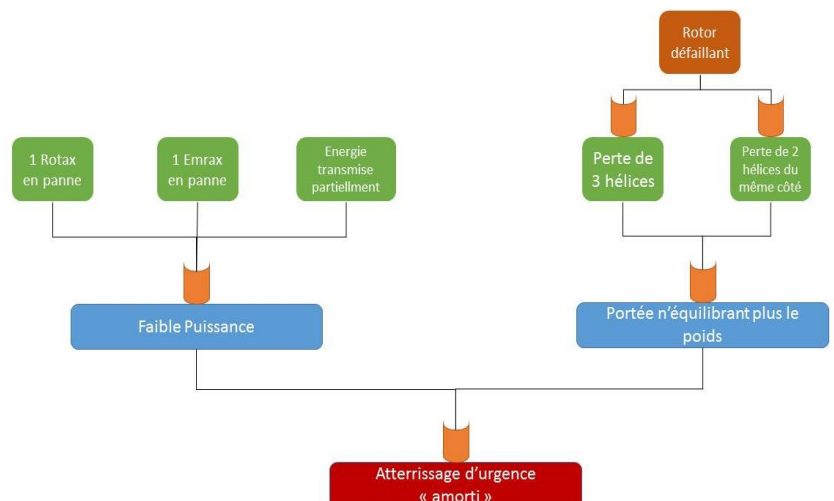


### Conséquences Dangereuses

*Les pannes présentées ci-contre ne permettent plus de contrôler l'aéronef. Celui-ci possède une vitesse verticale négative et/ou il est soumis à une perte d'attitude.*

#### Solutions :

- Utiliser la puissance et les rotors restants pour amortir la chute et atterrir en urgence.
  - En cas de perte d'altitude équilibrer le Mini Bee en diminuant la puissance de certains rotors.



### *Le Mini-Bee peut-il vraiment amortir sa chute en cas de défaillances dangereuses ?*

L'hypothèse et l'objectif de départ sont que le Mini-Bee en cas de perte d'un rotax/emrax ou de 3 rotors puisse amortir et contrôler sa chute sans avoir à déployer le parachute. Nous allons vérifier cette hypothèse.

#### Perte d'un Rotax/Emrax

- Poussée disponible restante : 876 kg
- Il faut considérer que la vitesse de chute de l'appareil va entraîner une rotation induite des hélices et donc une portée induite.
- Portée induite =  $0.5 * \rho * S * C_z * V^2 * 10$  (nbr hélices)
- Le profil de l'hélice est similaire au Eppler 874 Hydrofoil celui-ci à un  $C_z$  max de 0.8. La surface des hélices est de  $0.33 \text{ m}^2$ .
- $\rho = 1.225 \text{ kg.m}^{-3}$   $S = 0.33 \text{ m}^2$  et  $C_z = 0.8$
- Portée induite =  $1.6 * V^2$
- On fait ensuite un bilan des forces et on applique le PFD.

On trouve finalement une vitesse de chute stabilisée à **132 km/h**.

#### Perte de 3 rotors

- Poussée disponible restante : 973 kg
- On refait la même méthode que pour la perte d'un rotax/emrax.

On trouve finalement une vitesse de chute stabilisée à **99 km/h**.

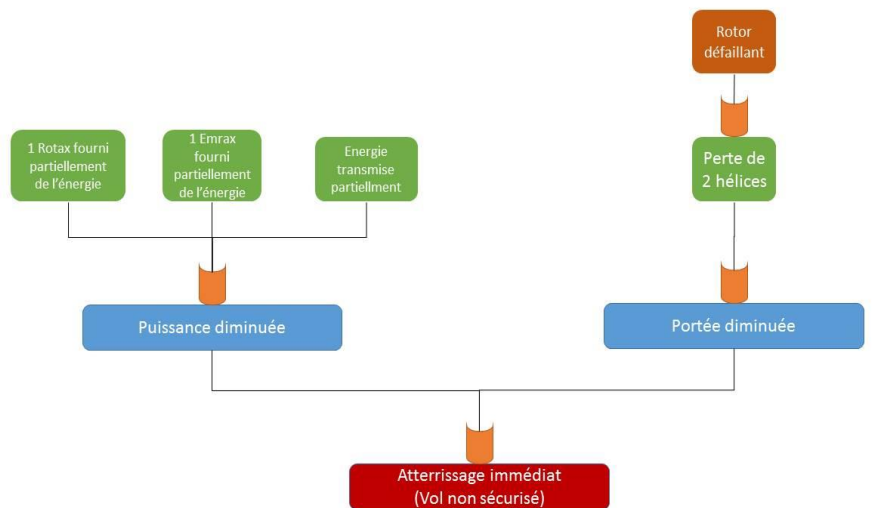
Nous pouvons voir que bien que la vitesse de chute soit diminuée, elle est encore bien trop élevée. Cela implique la reclassification, en attendant de trouver une solution technique, de ces défaillances en catastrophiques. Le pilote doit déployer le parachute.

## Conséquences Majeures

Les pannes présentées ci-contre n'entraînent pas une perte de contrôle. Cependant les conditions pour un vol sécurisé ne sont plus atteintes.

### Solutions :

- Atterrir au plus vite sur un terrain convenable.

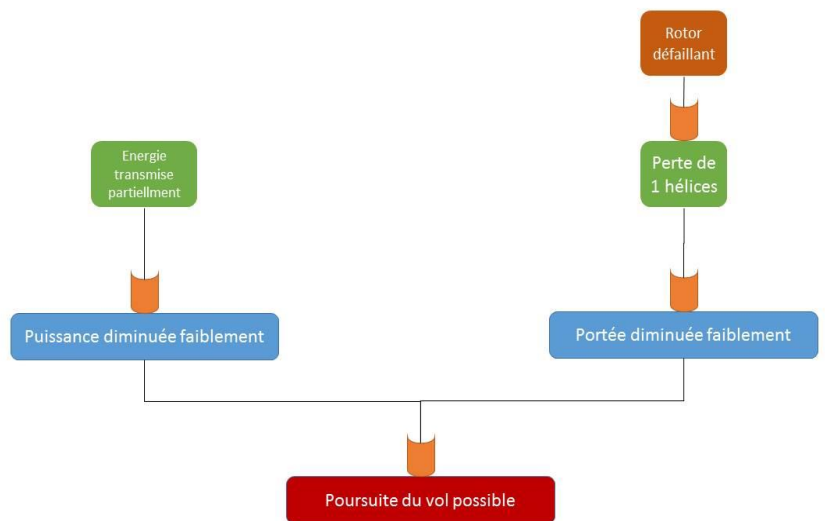


## Conséquences Mineures

Suite aux pannes présentées ci-contre la poursuite du vol est possible.

### Solutions :

- A la fin de la mission prévue la panne doit être réparée avant que l'aéronef reparte en vol.



## Diagramme récapitulatif

Voir Annexe 1.

## VI. Étude des systèmes anti-crash

### Le parachute

#### L'histoire du parachute

Imaginé par Léonard de Vinci en 1485.

Le tout premier saut en parachute répertorié date du 22 octobre 1797 et fut réalisé par un chien et mis en place par André Jacques Garnerin au-dessus du parc de Monceau à Paris.

D'abord inventé pour un seul homme on observe aujourd'hui des parachutages de frets sur les zones en difficulté mais aussi de véhicules alors pourquoi pas sur un avion ?

Depuis les débuts de l'aviation civile, les ingénieurs cherchent à réduire les risques de crash et donc trop souvent de pertes humaines. Et le parachute apparaît déjà comme une solution.

Cette solution semble la plus évidente : on trouve déjà un gilet gonflable sous chaque siège, pourquoi pas un parachute ? Mais elle est en fait irréalisable pour les vols commerciaux. En effet, il est illusoire de penser que les passagers auront le temps et le sang-froid de sangler correctement leur parachute et de sauter de l'avion en toute sécurité. C'est pourquoi cette solution a depuis longtemps été écartée par les compagnies aériennes.









Mais pourquoi pas équiper l'avion d'un parachute ?

Les parachutes pour avion existent déjà et sont développés par plusieurs entreprises dont Ballistic Recovery Systems (BRS) qui a déjà sauvé 350 vies grâce à son système. Le produit consiste en un parachute, rangé sous le fuselage et qui se déploie après activation d'une manette par le pilote. Une voile de quelques 220m<sup>2</sup> vient alors déposer l'appareil entier sur le sol. Cette solution équipe déjà plusieurs modèles des fabricants Cessna et Cirrus qui peuvent transporter de 2 à 5 passagers.

## Le parachute sur le Mini-Bee

Nous avons choisi l'entreprise Junker car c'est une marque sérieuse de parachutes très performants avec de longues années d'expériences.

Au regard de notre MTOW (1200kg) et de notre croise speed de 200 Km/h le modèle nous correspondant serait le magnum 1201

							
<b>MAGNUM</b>		<b>601</b>	<b>650</b>	<b>800</b>	<b>901</b>	<b>1200</b>	<b>1201</b>
<b>Maximum permitted load</b>	kg	760	600	800	950	1200	1230
<b>Maximum speed</b>	km/h	320	250	250	320	250	250
<b>Rescue system weight (including rocket)</b>	kg	12,4	17	18,5	18	28	22
<b>Dimensions l x w x h</b>	mm	245x195x430 250x170x490 200x195x510 410x180x280	270x195x610	2 pcs. M 501	240x280x510	3 pcs M 501	300x260x550
<b>Opening time at max. speed</b>	s	3	3	3	8	3,2	5
<b>Max. overload with max. load</b>	kN	30	31	35	-	60	63,5
<b>Descent with max. load</b>	m/s	7	5,5	6,7	7,2	7	7,8
<b>Slider</b>	-	yes	yes	yes	yes	yes	yes
<b>Container type</b>	-	cloth	cloth	cloth	cloth	cloth	cloth
<b>Canopy</b>							
<b>Area</b>	m <sup>2</sup>	130	150	172	206	258	252
<b>Repack interval</b>	rok	6	6	6	6	6	6
<b>Ballistic device</b>							
<b>Rocket engine type</b>		Magnum 600	Magnum 600	Magnum 600	Magnum 1000 (Magnum 1500)*	Magnum 1000	Magnum 1000 (Magnum 1500)*
<b>Total impulse at 20°C</b>	kNS	0,464	0,464	0,464	0,539 (0,702)	0,539	0,539 (0,702)
<b>Activation</b>	-						Mechanical
<b>Burn time at 20°C in sec.</b>	s	0,86 ± 0,03	0,86 ± 0,03	0,86 ± 0,03	0,86 ± 0,03 (0,88 ± 0,04)	0,86 ± 0,03	0,86 ± 0,03 (0,88 ± 0,04)

\* depends on particular installation \*\* not measured yet

## Cas de panne en dessous du seuil d'action du parachute

Un des principaux inconvénients du Mini-Bee et des multi-copters en général est qu'en cas de crash ils n'ont pas assez de portance pour se poser comme un avion et qu'ils ne bénéficient pas de l'auto-giration comme les hélicoptères. Ce qui signifie qu'en cas de pannes majeurs au niveau des moteurs, il faut une solution de secours. Le parachute en est une mais il ne peut être efficace qu'à partir d'une certaine altitude. Pour les pannes qui arriveraient au décollage il nous faut trouver d'autres solutions.

### Siège amorti :

Une première idée consiste à l'utilisation d'un siège amorti pour protéger les occupants en cas de chocs. Nous nous appuyons sur l'expérience de l'entreprise Guimbal qui équipe son Cabri G2 d'un siège qui absorbe l'énergie en cas de crash. La structure centrale ainsi que le siège ont été désigné pour des impacts verticaux. Ils ont réussi à prouver au cours de crash certifié qu'un occupant pourrait survivre à un impact de 2000ft/min soit une chute libre de 5m.

L'idée pour le Mini-Bee étant de réaliser un siège possédant les mêmes caractéristiques mais en utilisant directement la déformation des matériaux pour réaliser le même amortissement.

Comme on peut s'en douter, cette solution n'est efficace que sur une hauteur relativement faible.

Il y a donc un gap énorme pendant lequel les occupants du Mini-Bee sont vulnérable.



### Amortisseur

Pour diminuer cet écart une première solution consisterait à coupler le siège amorti avec des amortisseurs performants.

Le système anti-crash développé par Piper pour le PA16 constitue une véritable innovation qui a déjà prouvé son efficacité. Ce train d'atterrissage pour un avion possédant une MTOW similaire à celle du mini-Bee nous fournirait un amortissement de 6 m/s et peut résister à des chutes jusqu'à 10,5 m/s.

Ainsi en couplant nos deux systèmes, on pourrait réduire le gap pendant lequel l'opérateur est en danger.

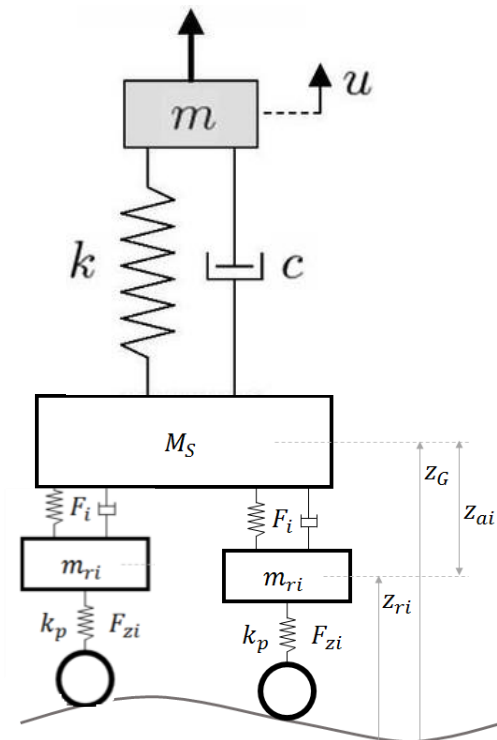


### Réglementation :

L'idée serait de mettre en place une réglementation définissant que le pilote doit décoller à la verticale jusqu'à la hauteur à laquelle le parachute peut être utilisé. On maximiserait ainsi l'efficacité des amortisseurs et du siège en cas de crash due à une panne.



## Calcul des taux de survie du pilote



## Choc encaissable par un humain

Mr. De Haven en 1942, dans une analyse clinique et mécanique de personnes ayant survécu à des chutes libres variant de 15 à 45 mètres, a montré l'importance de la direction et de la nature de la surface d'atterrissage lors d'un choc. Définissant ainsi que le corps humain peut tolérer et supporter une accélération deux cents fois supérieure à celle la gravité pour une courte durée et dans la mesure où les forces agissent transversalement par rapport au grand axe du corps. On sait donc que les modifications de structures envisagées pour réduire les forces d'impact et distribuer les pressions peuvent augmenter les chances de survie et modifier les blessures lors des accidents d'avions.

Le nombre de G auxquelles peut survivre un être humain dépend de sa position ainsi que de la durée d'exposition. Ainsi, debout quelque G suffisent à nous faire perdre connaissance mais allongé, un humain peut encaisser jusqu'à 25G pendant quelques secondes. En ce qui nous concerne, nous sommes en position assise et la durée d'exposition d'un choc est très brève, environ 0,01 sec.

On observe alors que des dommages sont irréversible à partir d'un choc de 40G/0,01s.

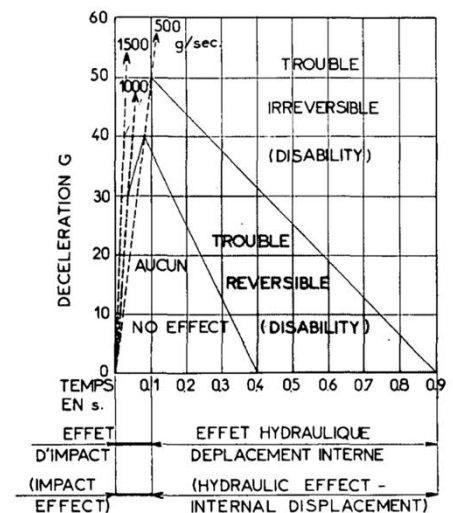


FIG. 8 - Représentation schématique de la tolérance humaine à l'accélération en fonction de sa durée et de son intensité. (HAYNES A.L. 1955). D'après STAPP J.P.

## Calcul des hauteurs de chute

On va donc chercher une hauteur de chute tel que lorsque l'on isole le pilote la force résultante du choc amortie par les amortisseurs et le siège n'excède pas les 40G soit 35280N.

Pour éviter de rentrer dans des calculs de chocs trop complexes notamment à cause de la déformation lors de l'impact et de l'importance de la nature de la réception nous allons faire les hypothèses suivantes :

- La surface du sol est telle que l'amortissement est de 0 m/s (pire cas envisageable)
- Le pilote est considéré comme un solide rigide indéformable
- Pour que le pilote survive il faut que la résultante après amortissement n'excède pas les 40G.

Le but ici est donc de donner un ordre d'idée et non pas une hauteur précise.

Soit la vitesse du mini-Bee en chute libre :

$$V = \sqrt{2gz}$$

Avec  $z$  la hauteur de chute

Et  $g$  l'accélération de la pesanteur

Soit pour un choc durant 0,01 sec on a :

$$m1 \cdot \sqrt{2gz} - m1 \cdot V_{at} - m2 \cdot V_{as} < 40g$$

Avec  $m1$  la masse du mini-Bee

$m2$  la masse du pilote

$z$  la hauteur de chute

$V_{at}$  la vitesse d'amortissement du train

$V_{as}$  la vitesse d'amortissement du siège

Nous avons choisi de regrouper les résultats selon les versions dans les tableaux suivants :

Poids du mini-Bee version R2H10A4	Altitude max crash	Poids du mini-Bee version R1H6A0	Altitude max crash
MTOW=1200kg	9m	MTOW=780KG	12m
A vide=850KG+pilotes	14m	A vide=620KG+pilote	17m

On observe donc qu'en opération et dans sa version classique le pilote du mini-Bee peut survivre à une chute libre donc avec tous les rotors qui se coupent d'un coup de 9m.

On observera toujours un gap énorme entre l'altitude à laquelle peut être tiré le parachute (80m) et celle à partir de laquelle un pilote peut survivre. Nous devons donc dans le futur trouver des solutions pour encore diminuer cette zone.

## Ce que dit la réglementation

 European Union Aviation Safety Agency	<b>SPECIAL CONDITION</b> <b>Vertical Take-Off and Landing (VTOL)</b> <b>Aircraft</b>	Doc. No: SC-VTOL-01 Issue: 1 Date: 2 July 2019
--	--	--

- B – Flight
  - VTOL.2170 Operating limitations
    - Structural durability
    - Special factor of safety
    - Emergency condition









Du point de vue de la CS-VTOL nous observons une absence de précisions en cas de crash. En revanche nous pouvons noter que tout équipement ne doit en aucun cas risquer de blesser encore plus le pilote en cas d'accident et que tous les équipements doivent être certifiés selon une durée précise et être remplacés dès la fin de celle-ci.

## VII. Certification du Cockpit

Dans notre démarche de certification, nous nous sommes attardés sur des points de certifications qui nous semblaient essentiels. De plus, certains points comme la certification du cockpit avaient déjà été traités. Voici donc un rappel de ce qui a été dit.

### Étude de L'ENSAM

L'ENSAM a donc réalisé une étude préliminaire pour la certification du cockpit de notre Mini-Bee. Ils ont listé et détaillé tous les éléments indispensables pour obtenir la certification de notre VTOL. Dans cette étude, ils ont donc choisi d'équiper le Mini-Bee en Garmin présentant une gamme fiable et s'adaptant parfaitement au Mini-Bee.

Dispositif de secours de mesure de l'assiette	 <p>Produit: TruTrak Gemini PFD Disponibilité:  Habituel Code: PFD</p> <p>Quantité: 1  </p> <p>Prix à l'unité: € 1 168,20 Prix HT: € 1 168,20</p>					0 €	1	1	2 400 €	1	1	2 400 €	1 200 €		
Vitesse de l'air indiquée supplémentaire	Compris dans l'horizon de secours					0 €	1	1	0 €	1	1	0 €	0 €		
Vitesse ascensionnelle supplémentaire	Compris dans l'horizon de secours					0 €	1	1	0 €	1	1	0 €	0 €		
Radar météo	A priori non indispensable					0 €			0 €				0 €		
Interphone	 <p>Produit: Flightcom 403 Disponibilité:  Habituel Code: 101-0243-10</p> <p>Quantité: 1  </p> <p>Prix à l'unité: € 266,60 Prix HT: € 266,60</p>	1	0	0		270 €	1	0	0	270 €	1	0	0	270 €	270 €

Dans leur étude dont voici un extrait ci-dessus, l'Ensam équipe notre Mini-Bee pour les vols VFR jour/nuit et IFR rendant ainsi le VTOL capable de réaliser des missions périlleuses par tout temps et dans presque toutes les conditions météorologiques possibles.

Pour finir, ils ont réalisé une étude des prix avec un total de 53 200€ pour équiper notre VTOL.

## Ce que dit la certification

 European Union Aviation Safety Agency	<b>SPECIAL CONDITION</b> <b>Vertical Take-Off and Landing (VTOL)</b> <b>Aircraft</b>	Doc. No: SC-VTOL-01 Issue: 1 Date: 2 July 2019
--	--	--

### ➤ F – System and equipment

- VTOL.2570
  - System, equipment and installation
  - The equipment and systems identified in SC VTOL.2500, considered separately and in relation to other systems, must be designed and installed.

Dans ce chapitre, on note que chaque équipement doit être certifié individuellement avant d'être installé et que tous les systèmes doivent fonctionner avant chaque utilisation de notre aéronef.

### ➤ B – Flight

- VTOL.2145
  - Flight controllability
  - The aircraft must be controllable and maneuverable, without requiring exceptional piloting skills.

Ce chapitre décrit les essentiels de la navigation en indiquant surtout qu'hormis la certification des pilotes sur notre Mini-Bee, ils ne devront pas avoir besoin d'une formation supplémentaire pour piloter.

## VIII. Conclusion

### Le futur de la certification

Le Mini-Bee n'en étant qu'à ses débuts en termes de certification, nous allons détailler l'ensemble du processus de certification auprès de l'EASA. Ce processus se décompose en quatre parties :

- **La familiarisation technique et base de certification :**  
C'est le premier contact avec les équipes de certification de l'EASA. Ceux-ci vont prendre connaissance de nos différents documents attestant notre respect des différentes règles inhérentes à la certification désirée. A l'issue de cette phase, les experts vont être en mesure de nous dire si le projet est assez mature pour entamer le reste du processus de certification.
- **Établissement d'un programme de certification :**  
Dans le cas où les experts ont approuvé notre demande de certification, ceux-ci vont établir un programme de certification conjointement avec le fabricant de l'appareil. Ceci a pour but de déterminer les grands jalons qui vont guider ce processus de certification.
- **Démonstration de conformité :**  
Cette partie est la plus longue du processus de certification, c'est celle-là où les experts vont vérifier la conformité de tous nos paramètres et simulations effectuées. Ceci passe par des tests de fatigue, de structure, d'essais en vol... C'est la partie la plus longue du processus ; en effet l'EASA l'estime à 5 ans maximum. C'est aussi la plus coûteuse car elle va nécessiter de casser quelques prototypes lors des différents tests menés.
- **Clôture technique et délivrance du certificat de type :**  
Si les précédents tests ont été concluants, l'EASA approuve la demande de certification de type de l'appareil et délivre son fameux certificat de type attestant que l'appareil est en droit de voler car il remplit les critères de sécurité.

Le processus de certification est donc un processus long, coûteux en argent, qui nécessite donc que le projet soit arrivé à un certain niveau de maturité pour ne pas perdre de temps à entamer des démarches qui sont lourdes.

A titre comparatif, l'Elixir Aircraft, un avion dessiné à partir d'une feuille blanche, a été certifié en 3 ans sous la CS-23. Cela montre donc que même un projet partant de zéro peut être certifié dans des délais raisonnables, à condition qu'il ait atteint un degré de maturité suffisant.



## Introspection de l'équipe

Nous avons effectué une introspection sur nous-même et notre projet afin d'en tirer objectivement nos conclusions :

Malgré un premier semestre difficile, où nous avons ressenti quelques difficultés à évaluer notre charge de travail et nous ancrer pleinement dans le projet, il est clair que notre niveau de compréhension de la certification d'aéronef s'est développé. Notre travail de recherche et d'exploration du monde de la certification aura été très enrichissant. Nous connaissons maintenant les différentes certifications régissant l'espace aérien européen, et nous discernons bien le travail nécessaire pour l'obtention de ces précieux sésames.

Toutefois, notre manque d'expérience dans ce domaine a fini par se faire sentir sur la fin du projet. Un point de vue expert devient nécessaire.

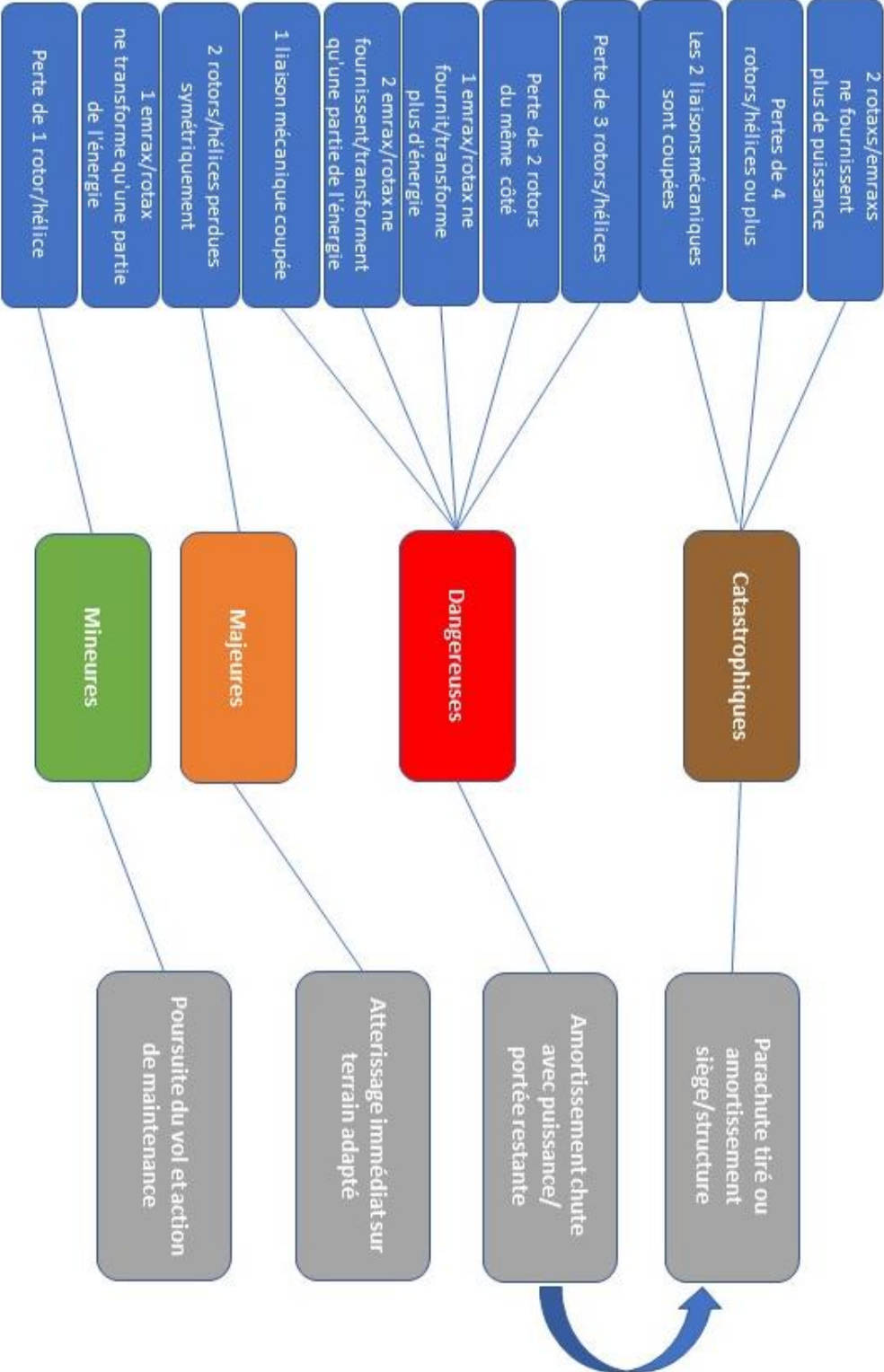


Concernant notre projet, il nous a été très bénéfique d'effectuer des points réguliers avec Mr Dutertre, notre chef de projet, afin de garder la ligne directrice de notre travail, mais aussi pour nous tenir informé des dernières nouveautés concernant le Mini-Bee.

Nous avons réfléchi à une manière d'améliorer ce partage d'information : Le Mini-Bee est sans cesse amélioré par plusieurs groupes de travail, et notre idée est à l'avenir de créer un fichier mensuel résumant l'avancement du projet pour chaque équipe.

Ce projet a beaucoup évolué depuis le début d'année, il se perfectionne au fil du temps et les choix stratégiques, de structure, d'équipement, de fonctionnement peuvent changer alors qu'ils étaient nécessaires à l'application de certaines certifications. Il est donc important de faire un suivi des impacts qu'auront les décisions futures sur la certification du Mini-Bee.

Annexe 1\_ Tableau récapitulatif cas de pannes du groupe Motopropulseur





## Bibliographie

Special Condition for VTOL : [www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/SC-VTOL-01%20with%20highlights.pdf](http://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/SC-VTOL-01%20with%20highlights.pdf)

CS 23 Amendement 5 for small aircrafts : [www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/CS-23%20Amendment%205.pdf](http://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/CS-23%20Amendment%205.pdf)

CS 29 for small rotorcrafts : [www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/CS-27%20Amendment%206%20v1%20%2826.4.2019%29.pdf](http://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/CS-27%20Amendment%206%20v1%20%2826.4.2019%29.pdf)

Étude UBER Elevate 2016 : [www.uber.com/fr/elevate.pdf](http://www.uber.com/fr/elevate.pdf)

Site spécialisé VTOL : [www.evtol.news](http://www.evtol.news)

Site du constructeur Guimbal : [www.guimbal.com](http://www.guimbal.com)

Site du fabricant de parachute Junker : [www.junkersprofly.fr/?page\\_id=32](http://www.junkersprofly.fr/?page_id=32)