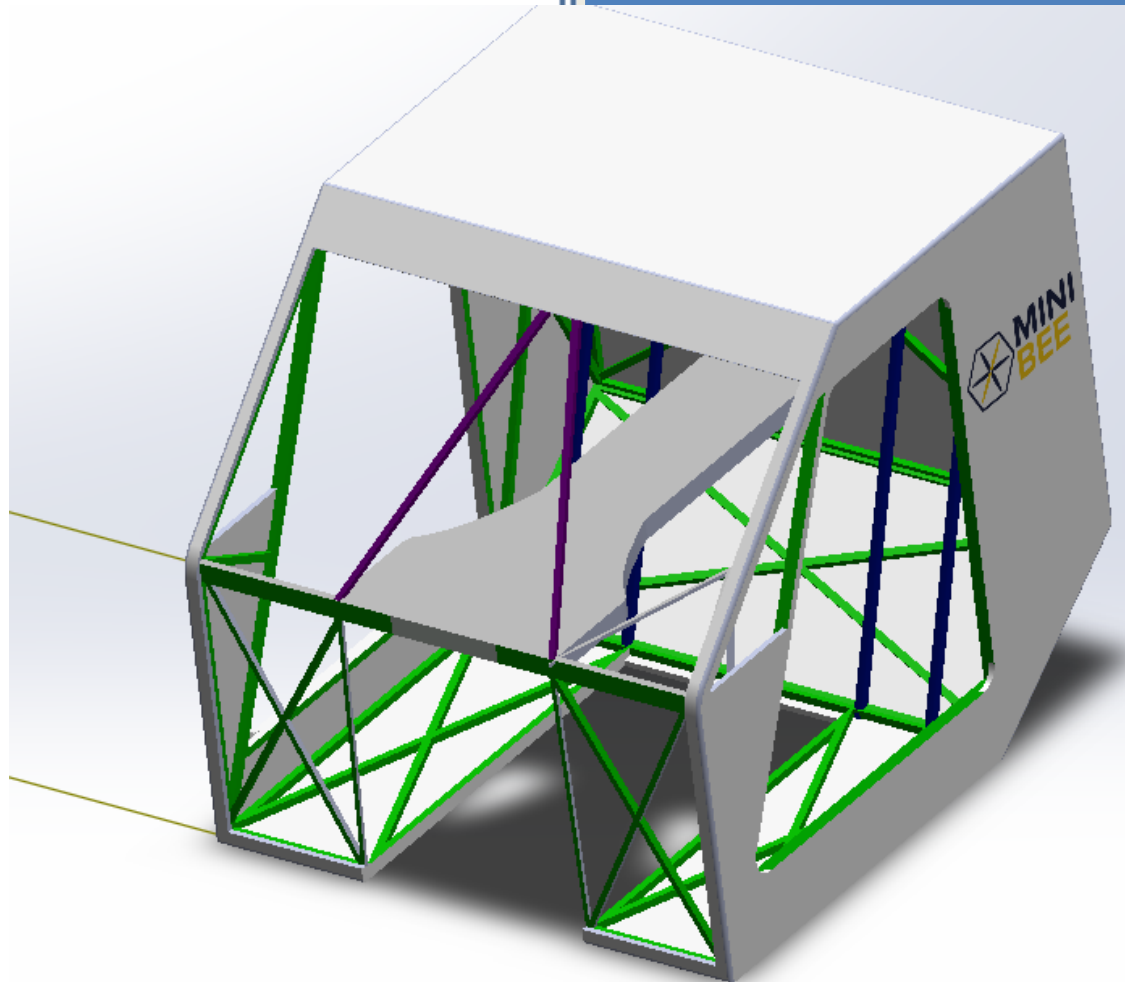


Validation de la chaîne de propulsion du Minibee



Projet industriel 3A ESTACA

2022 -2023

Guillaume HUET

Joseph DUBOCAGE

Jean-Benoît FOURAGE

Guilhem AUBIGNY

Alexandra SOUDEE

Table des matières

Introduction	2
Partie 1 : étude de la documentation des composants imposés	3
Prise en compte des limites du Rotax sans gearbox	3
Prise en compte des limites du Rotax avec gearbox	7
Partie 2 : Electronique de puissance	11
Redressement du courant : Etude des ponts de diode	11
Architecture proposée	11
Choix du pont de diode	13
Bilan	14
Dédution du besoin de supercondensateur	14
Evaluation du type et du nombre de carte de puissance	18
Partie 3 : Moteur et hélice	20
Etude du choix du moteur	20
Etude des performances motrices suivant le type d'hélices	21
Partie 4 : Choix de la chaîne de puissance adéquate	22
Description de la chaîne de puissance choisie	22
Dans quel mesure ce choix est-il viable ?.....	22
Avantages de cette chaîne par rapport aux autres	23
.....	23
Bilan des composants choisis :.....	23
Conclusion	24

Introduction

Les eVTOL et VTOL sont aujourd'hui au cœur de beaucoup de bureaux d'études. Face à la congestion des axes routiers, des enjeux climatiques, la voie des airs pour des trajets courts présente de nombreux atouts, une motorisation moins gourmande en carburant. Les VTOL répondent également à de nombreuses problématiques, dans le domaine médical par exemple. Dans d'innombrables régions du monde, aussi bien dans des contrées reculées que dans des pays industrialisés, l'accès au soin médicaux est difficile voire impossible. Même dans des espaces urbanisés, l'arrivée d'un médecin ou de soins médicaux urgent est parfois impossible. C'est dans cette logique que Technoplane développe le mini-bee en collaboration avec de nombreuses universités et écoles dont l'ESTACA et par extension notre groupe de travail, font partie.

Ce VTOL possède une motorisation particulière : un moteur d'avion Rotax 915is utilisé comme générateur pour alimenter 60 hélices qui assurent la propulsion de l'appareil.

Cette conversion n'est pas sans défi et nous avons choisis de le relever et d'établir la chaîne de puissance complète du mini-bee. Nos travaux à ce sujet font l'objet de ce rapport.

Partie 1 : étude de la documentation des composants imposés

Tout d'abords pour pouvoir commencer ce projet nous avons dû s'appuyer sur les données déjà existantes tout en proposant notre propre vision de l'aménagement et de la composition de la chaîne de puissance du mini-bee. La partie imposée était l'élément Rotax qui sert de moteur principal directement relié à la manette des gaz dont le pilote à le contrôle. Cependant dans une perspective d'alléger l'appareil pour augmenter la charge utile, améliorer la performance, et réduire les coûts nous proposons d'enlever la gearbox. Ce pourquoi nous avons étudié deux cas pour la validation de la chaîne de puissance.

Nous avons une configuration du ROTAX sans gearbox et une configuration du ROTAX avec gearbox.

Prise en compte des limites du Rotax sans gearbox

Tout d'abord, nous nous sommes appuyés sur la documentation technique afin de définir les limites du ROTAX dans deux configurations proposées (décollage et vol stationnaire). À la suite de quoi nous avons pu déterminer une plage de puissance sur laquelle pouvait évoluer le Mini-Bee.


 Sans gearbox		
Phase de vol	Au décollage	En vol stationnaire
Puissance max	104 kW <small>(Bon décollage avec la manette des gaz entre 75 et 100%)</small>	99 kW
Puissance délivrée	4350 RPM à 5800 RPM	3000 RPM à 5500 RPM

Figure 1 : Données de sortie du ROTAX sans gearbox

Une fois les valeurs en sortie du ROTAX dans la configuration sans gearbox connue, on avait la capacité de chercher l'EMRAX adapté. Après plusieurs comparaisons des EMRAX qu'on avait à notre disposition, on en a pu définir l'EMRAX 228 comme étant le meilleur dimensionnement pour ce cas d'utilisation.

EMRAX 228			
Voltage	Low	Médium	High
Tension maximale de la batterie (Tension continu en Volt)	160	500	680
Vitesse de rotation maximal [RPM]	5500 (6500 RPM peak for a few seconds)(with maximal battery voltage or magnetic field weakening)		
Diametre ϕ / largeur [mm]	228/86		
Poids [kg]	12		
Couple délivré [Nm]	96-120		
Puissance moyenne [kW]	50-62		

Figure 2 : Donnée constructeur EMRAX

On devait également évaluer le courant et la tension en sortir de cette EMRAX afin de pouvoir adapter le reste de la chaîne de puissance.

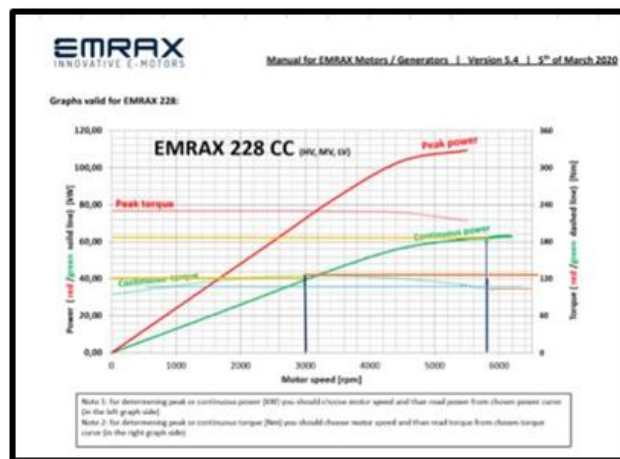


Figure 3 : Graphe de la puissance et du couple en fonction de la vitesse

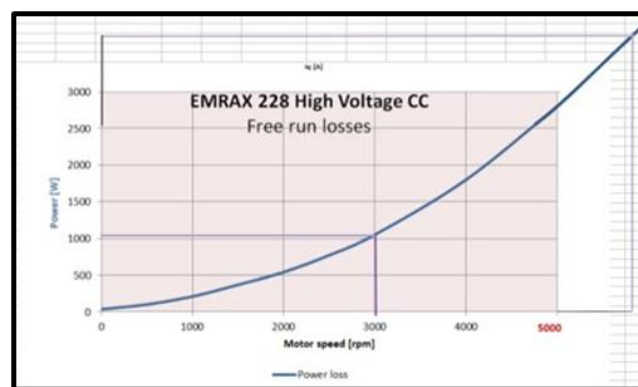


Figure 4 : Graphe de la puissance en fonction de la vitesse de rotation

Comme nous sommes dans une nouvelle exploitation de l'EMRAX (en mode moteur plutôt qu'en mode générateur) on a dû effectuer un prolongement des courbes des données constructeur pour pouvoir interpréter les différents graphes de la documentation.

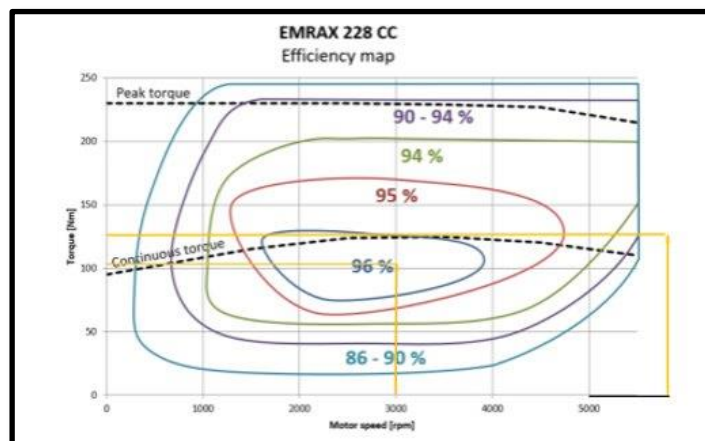


Figure 5 : Carte d'efficacités

Ce graphe de cette figure 5 nous montre l'efficacité du produit en fonction des données qu'il reçoit et qu'il génère. Ainsi quand l'EMRAX est poussé au max de la puissance du ROTAX, il a une efficacité variante entre 86-90% alors que lorsqu'il est au minimum de puissance ROTAX en vol stationnaire, il a une efficacité de 96%.

RPM	Couple (en Nm)	Efficacité
5800	103	86-90%
3000	126	96%

Figure 6 : Données en sortie d'EMRAX

Pour les graphes suivants, on a considéré que le couple reste constant entre 1000 RMM et 5800 RPM.

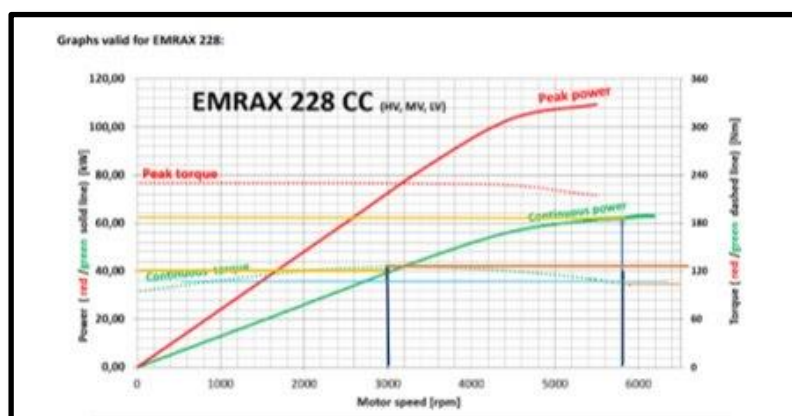


Figure 7 : Graphe de la puissance et du couple en fonction de la vitesse

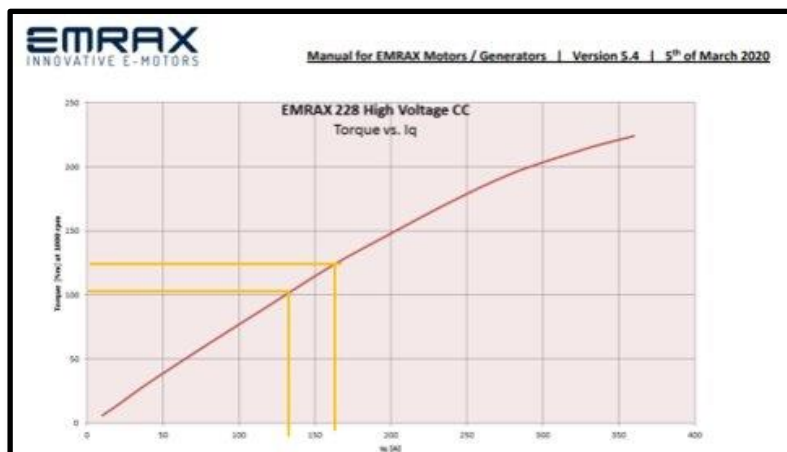


Figure 8 : Couple en fonction du courant

Par lecture graphique, on obtient dans le cas d'un EMRAX 228 en high voltage, une sortie en courant variant de 132 ampères à 163 ampères. Concernant les autres types de tensions, elles sont définies à partir du cas high voltage dans la documentation du constructeur. L'ensemble de nos travaux sur cette partie sont résumés dans le tableau suivant :


Pourcentage de manette des gaz	ROTAX	Vitesse arbre de sortie	2 EMRAX	Tension de sortie		Ampérage (A)	
						3000 RPM	5800 RPM
Décollage : 75% - 100% Vol stationnaire : 70% - 100%	 Prix total: ROTAX + Certification (estimation): 36 106 € + 10 000 €	Entre 3000 RPM et 5800 RPM	Réf 228 Prix : 2790 € avec une efficacité comprise entre 88% et 96%	High Voltage	227,2V – 397,2V	163	132
				Medium Voltage	149,5V – 261,3V	247,76	200,54
				Low Voltage	56,8V – 99,3V	652	528

Figure 9 : Tableau récapitulatif de l'étude du ROTAX et de l'EMRAX sans gearbox

Prise en compte des limites du Rotax avec gearbox

Le Rotax 915iS est vendu avec une gearbox intégrée. Celle-ci impose un rapport de réduction en sortie du moteur qui a pour valeur : 2,54 :1. On peut donc calculer aisément la vitesse en sortie de la gearbox :


 Avec gearbox		
Phase de vol	Au décollage	En vol stationnaire
Puissance max	104 kW <small>(Bon décollage avec la manette des gaz entre 75 et 100%)</small>	99 kW
Puissance délivrée	1733 RPM à 2283 RPM	1181 RPM à 2200 RPM

Figure 10 : Vitesse en sortie de gearbox

Ces valeurs de sortie de gearbox nous ont permis de déterminer un type d'Emrax adapté : l'Emrax 268. La documentation de ce composant présente les caractéristiques suivantes :

EMRAX 268			
Voltage	Low	Médium	High
Charge maximale (en config moteur)	3200 RPM	4700 RPM	4500 RPM
Pas de charge	3800 RPM	5500 RPM	5500 RPM
Tension maximale de la batterie (Tension continu en Volt)	250	680	700
Vitesse de rotation maximal [RPM]	4500 RPM (5500 RPM peak for a few seconds)(with maximal battery voltage or magnetic field weakening)		
Diametre \varnothing / largeur [mm]	268/91		

Figure 11: Caractéristiques Emrax 268

Par la suite, le raisonnement employé est analogue au cas sans gearbox. L'objectif est de déterminer les valeurs de tensions et d'intensité en sortie d'Emrax, dans l'idée de choisir des composants adaptés par la suite ou d'adapter la configuration de l'Emrax (High-Medium-Low). Une analyse approfondie de la documentation nous a permis d'obtenir les résultats suivants :

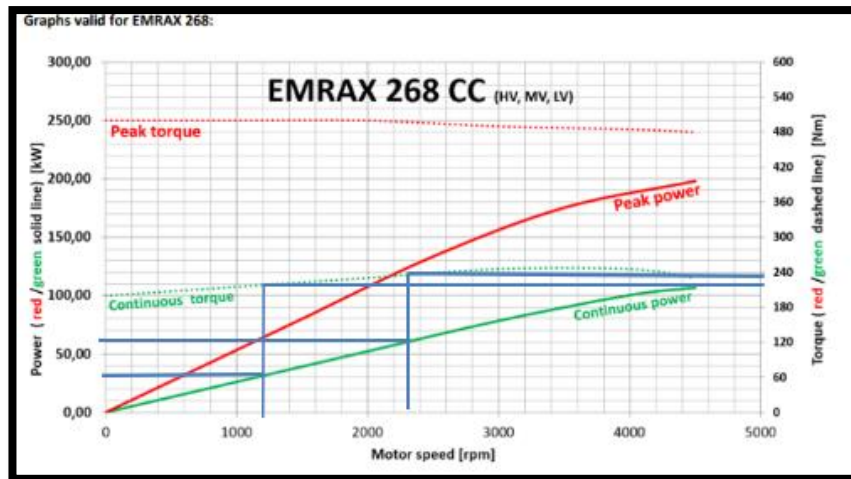


Figure 12 : Graphe de la puissance et du couple en fonction de la vitesse de rotation

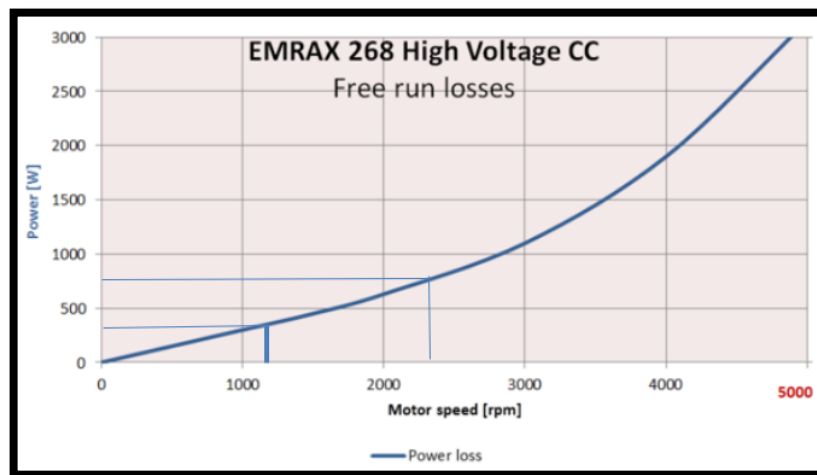


Figure 13 : Graphe des pertes de puissance en fonction de la vitesse de rotation

L'exploitation de ces graphes nous donne :

Vitesse de rotation	Puissance	Puissance avec pertes	Couple
1181	54 kW	53,25 kW	240 Nm
2283	35 kW	34,75 kW	220 Nm

Ces deux graphes permettent de déterminer la puissance transmise par un Emrax. Cependant, un Emrax n'étant pas un composant parfait, son efficacité varie en fonction de la vitesse de rotation. Il faut donc corriger les valeurs trouvées. La documentation fournie le graphe suivant :

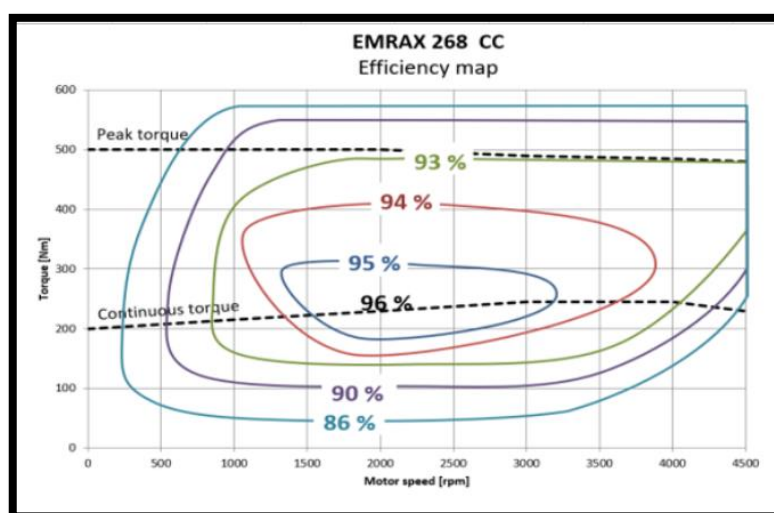


Figure 14 : Carte de l'efficacité de l'Emrax

Ainsi on peut préciser la puissance réelle transmise :

Vitesse de rotation	Puissance	Puissance avec pertes	Puissance corrigée avec l'efficacité	Couple
1181	54 kW	53,25 kW	51,12 kW	240 Nm
2283	35 kW	34,75 kW	32,49 kW	220 Nm

Nous avons désormais la puissance réelle transmise par l'Emrax. L'objectif est toujours de déterminer la tension et l'intensité de sortie de l'Emrax.

Rappelons que les Emrax existent en différentes version : High Voltage, Medium Voltage et Low Voltage.

Le graphe suivant nous permet, à l'aide du couple que nous avons trouvé, de déterminer le courant dans la configuration High Voltage.

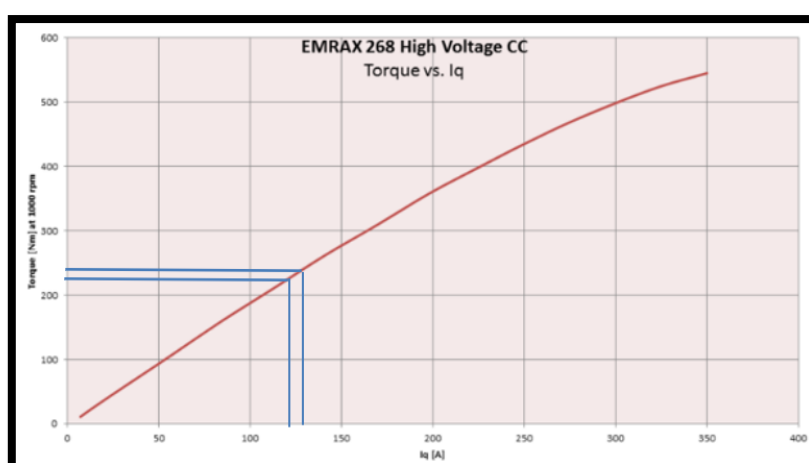


Figure 15: Couple en fonction du courant

On peut donc compléter notre tableau :

Vitesse de rotation	Puissance	Puissance avec pertes	Puissance corrigée avec l'efficacité	Couple	Intensité HV
1181	54 kW	53,25 kW	51,12 kW	240 Nm	120
2283	35 kW	34,75 kW	32,49 kW	220 Nm	130

Suite à des calculs ont peu dresser le bilan suivant :


Pourcentage de manette des gaz	ROTAX	Vitesse arbre de sortie	2 EMRAX	Tension de sortie		Ampérage (A)
Décollage : 75% - 100%	 Prix total: 36106 €	Entre 1181 RPM et 2283 RPM	Réf 268 Prix : 3798 € avec une efficacité comprise entre 93% et 96%	High Voltage	345,7V – 462,7V	120 – 130
Vol stationnaire : 70% - 100%				Medium Voltage	227,4V – 304,4V	182 – 197
				Low Voltage	86,4V – 115,7V	480 - 520

Figure 16 : Bilan de l'Emrax 268

Partie 2 : Electronique de puissance

Au cours de ce projet, notre objectif concernant la partie « Electronique de puissance » a été de proposer une chaîne de transmission de puissance crédible entre les EMRAX et les moteurs. Nous avons donc débuté notre travail en étudiant les différents travaux et propositions des précédents projets. Pour la partie concernant le redressement du courant, après plusieurs essais, nous sommes finalement revenus sur une architecture simplifiée qui est celle présentée ici.

Redressement du courant : Etude des ponts de diode

La partie « Electronique de puissance » de la chaîne de transmission de puissance commence avec le courant fourni par les deux EMRAX utilisés comme générateurs. Les deux EMRAX fournissent un courant hexaphasé, et les moteurs fonctionnent en courant continu. Le premier enjeu est donc de lisser le courant sortant des EMRAX. Ce lissage du courant hexaphasé est effectué ici par une architecture simple de deux ponts de diodes triphasés (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Un des objectifs du projet est de constituer une chaîne de puissance à un coup maîtrisé tout en utilisant des composants disponibles dans le commerce et donc facilement remplaçable. Le choix de l'architecture et des composants sont évidemment liés et il a été pris en compte lors de l'étude de l'architecture le prix et les caractéristiques des composants présents dans le commerce. Nous commencerons cependant ici sur la présentation de l'architecture pour ensuite développer le choix du composant.

Architecture proposée

L'objectif de l'architecture électrique est d'adapter les valeurs du courant de sortie des EMRAX à des valeurs adaptées pour le fonctionnement des moteurs. Cette architecture doit également inclure le redressement du courant par la présence de pont de diode hexaphasé.

Les valeurs d'entrée retenues ont été celles de l'EMRAX 228 en « High Voltage », ce qui correspond à la configuration « sans gear box » du ROTAX. Deux architectures sont envisagées.

Première architecture :

Sur ce schéma, l'inscription « Hexaphasé » est là pour rappeler que le courant sortant des EMRAX est un courant hexaphasé et que six câbles sont donc nécessaires.

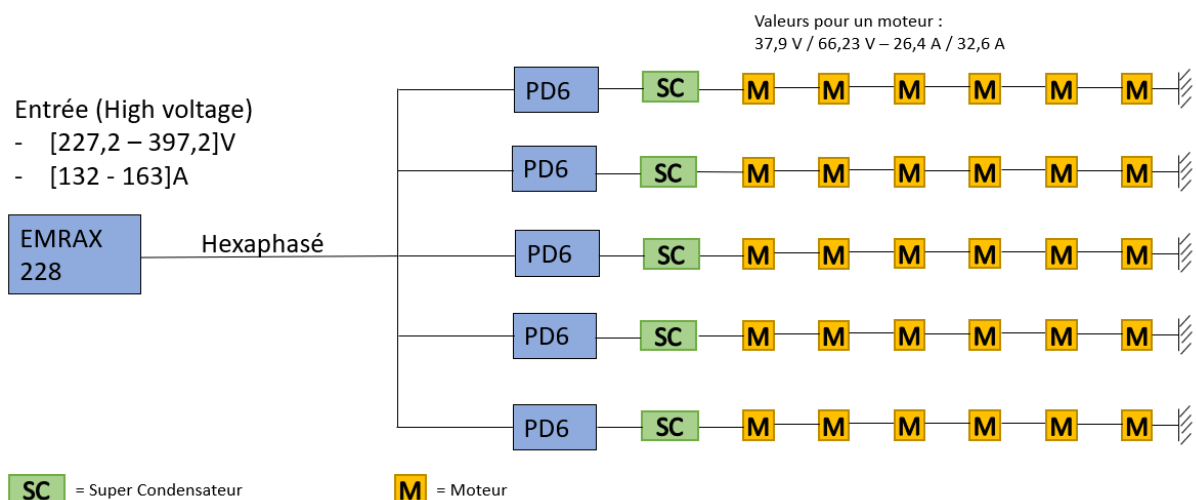


Figure 17 : Schéma de la première configuration de l'architecture de la partie électrique de la chaîne de puissance

Pour cette architecture, les ponts de diode et les supercondensateurs sont positionnés après la division en cinq branches. Cette architecture présente donc un courant moins élevé traversant les ponts de diodes et les supercondensateurs. Les inconvénients de cette architecture concernent le câblage et le nombre de composants utilisés.

En ce qui concerne le câblage, le courant délivré par les EMRAX est hexaphasé, il faut donc six câbles pour le transporter. Ces six câbles se divisent en cinq avant d'arriver aux ponts de diodes, ce qui donne un nombre de câble important. L'ampérage du courant étant élevé, les câbles seront d'un diamètre et donc d'un poids qui ne peut pas être négligé. Il sera donc nécessaire d'approfondir l'étude du câblage.

Le nombre de composant peut aussi poser problème dans cette configuration. Un nombre important de composant peuvent poser des problèmes de poids et d'encombrement. Même si cela n'est pas le cas pour les ponts de diodes, comme présenté ci-dessous, le poids et l'encombrement des supercondensateurs dans cette configuration est problématique.

Deuxième architecture :

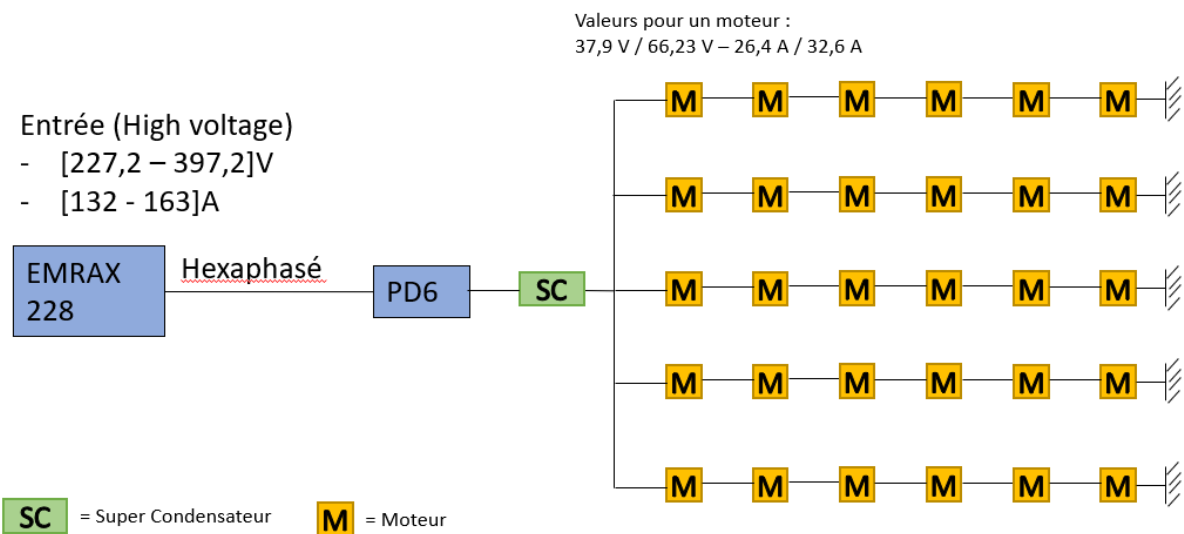


Figure 18 : Schéma de la deuxième configuration de l'architecture de la partie électrique de la chaîne de puissance

Cette architecture place le pont de diode et le supercondensateur avant la séparation en cinq branches. Cela nous ne change pas les valeurs du courant dans les fils, mais permet de réduire le nombre de ponts de diode.

Choix du pont de diode

Le redressement du courant doit être effectué par un pont de diode hexaphasé qui est constitué de deux pont de diode triphasé montés en parallèle (Figure 19).

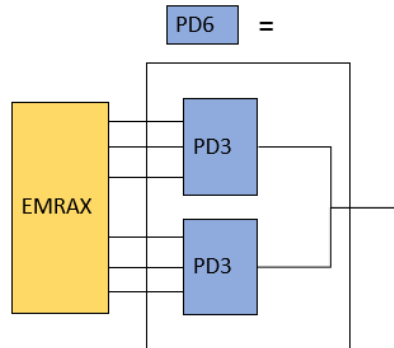


Figure 19 : Schéma du branchement des ponts de diodes aux EMRAX

Pour trouver le pont de diode triphasé répondant le mieux à notre cahier des charges, nous avons utilisé une matrice de cotation (Figure). Pour constituer cette matrice nous avons tout d’abord chercher les composants disponibles dans le commerce, répondant à notre cahier des charges. Une fois ceux-ci regrouper, la matrice nous permet de choisir celui qui semble le plus adapté

Pour la première architecture, on a la matrice de cotation suivante (Figure). On peut voir que le composant qui est le mieux adapté est dans notre cas le VS-36MT40¹. Dans cette configuration, le prix de l’ensemble des ponts de diode serait de 392,2 € et le poids de 400g.

Matrice de cotation	Colonne1	Colonne2	Colonne3	Colonne4	Colonne5	
Pont Redresseur	série VU082, IXYS	série VS-100MT	série VS-MT	série VS-36MB	VS-36MT40	
Tension	1200V	1600V	200V	100V	400V	
Courant direct moyen	88A	100A	35A	35A (existe en 25A)	35A (existe en 25A)	
Masse	159g	65g	20g	20g	20g	
Dimensions	72 x 42 x 30mm	63.5 x 32.5 x 16mm	28.5 x 28.5 x 10mm	28.5 x 28.5 x 9.8mm	28.5 x 28.5 x 10mm	
Coût (à l'unité TTC)		55,34 €	44,46 €	17,80 €	10,16 €	19,61 €
Montage	Panneau	Montage sur CI	bornes enfichables	bornes enfichables	bornes enfichables	

Figure 20 : Matrice de cotation des ponts de diodes triphasé



Figure 21 : Image de pont de diode triphasé VS-36MT40

¹ <https://fr.rs-online.com/web/p/ponts-redresseurs/3953238>

Pour la seconde architecture, on a la matrice de cotation ci-dessous :

Pont Redresseur	VS-160MT80KPBF	VUO160-12NO7
Tension	800V	1200V
Courant direct moyen	200A	175A
Masse	176g	284g
Dimensions	94 x 35 x 30mm	94 x 54 x 30mm
Coût (à l'unité TTC)	82,32 €	120,67 €
Montage	panneau	panneau

Figure 22 : Matrice de cotation de ponts de diode triphasé (configuration 2)



Figure 23 : Image de Pont de diode triphasé VS-160MT80KPBF

Le composant le plus adapté est donc ici le VS-160MT80KPBF. Dans cette configuration, le prix de l'ensemble des ponts de diode serait de 329,284 € et le poids de 704g. Le poids dans cette configuration est donc légèrement plus élevé par rapport à la première configuration. Le prix, lui est équivalent.

Bilan

Les deux configurations proposées ci-dessous sont viables. Au niveau des ponts de diodes les différences de caractéristiques sont négligeables à l'échelle du MiniBee (-63 € ; +304g). Pour différencier ces deux configurations nous allons dans la partie suivante nous intéresser aux supercondensateurs.

Déduction du besoin de supercondensateur

Un pack de supercondensateurs est ici nécessaire afin de stocker l'énergie électrique pour une utilisation ultérieure. Notre choix s'est dirigé vers les supercondensateurs, en opposition aux condensateurs conventionnels et aux batteries. En effet, les supercondensateurs possèdent une capacité C plus élevée que les condensateurs conventionnels, ce qui permet de stocker davantage d'énergie et de fournir une puissance plus importante pendant une période de temps plus longue. D'autre part, les supercondensateurs peuvent se charger et se décharger très rapidement (en quelques dizaines de secondes), ce qui n'est pas le cas des batteries (en quelques heures).

Un aspect important du fonctionnement des supercondensateurs est que l'on peut les brancher en série et/ou en dérivation. Un branchement en série permet d'augmenter la tension de l'ensemble du pack et ainsi répondre aux exigences en termes de tension du circuit. D'autre part, un branchement en dérivation permet d'augmenter la capacité du pack et donc de stocker davantage d'énergie. On peut ainsi choisir de brancher les supercondensateurs en série, en dérivation ou les deux à la fois selon les exigences du cahier des charges.

Pour déterminer le nombre de supercondensateurs à brancher en série et en dérivation en tenant compte de la résistance interne du supercondensateur et du temps de décharge, nous utilisons les formules suivantes :

$$\begin{array}{l}
 N_{\text{série}} = \frac{U_{\text{sortie}}}{U_{\text{supercondensateur}}} \\
 \Delta U = U_{\text{sortie}} - \frac{U_{\text{sortie}}}{2}
 \end{array}
 \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \rightarrow \begin{array}{l}
 C_{\text{tot}} = \frac{I_{\text{sortie}} \times \Delta t}{\Delta U \cdot N_{\text{série}} \times \text{ESR} \times I_{\text{sortie}}} \\
 C_{\text{série}} = \frac{C_{\text{supercondensateur}}}{N_{\text{série}}}
 \end{array}
 \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \rightarrow N_{\text{branches}} = \frac{C_{\text{tot}}}{C_{\text{série}}}$$

$$N_{\text{tot}} = N_{\text{série}} \times N_{\text{branches}}$$

Avec :

- $N_{\text{série}}$: le nombre de supercondensateurs à brancher en série
- U_{sortie} : la tension en sortie du pack de supercondensateurs (V)
- $U_{\text{supercondensateur}}$: la tension d'un seul supercondensateur (V)
- ΔU : la variation de tension (V)
- C_{tot} : la capacité du pack entier (F)
- I_{sortie} : le courant en sortie du pack (A)
- Δt : le temps de décharge (s)
- ESR : la résistance interne d'un supercondensateur (Ω)
- N_{branches} : le nombre de supercondensateurs à brancher en dérivation
- N_{tot} : le nombre total de supercondensateurs dans le pack

Nous avons tout d'abord opté pour un pack ne comprenant qu'un seul supercondensateur. En effet, l'utilisation d'un unique supercondensateur présente de nombreux avantages comme limiter la masse et l'encombrement contrairement à un pack qui comporte des supercondensateurs en série et en dérivation. Cela peut aussi avoir un impact significatif sur le coût du pack. De plus, un pack avec un unique supercondensateur est plus fiable qu'un ensemble et sa maintenance est plus aisée.

Cependant, les supercondensateurs que nous avons trouvé sur le marché se sont révélés trop volumineux, trop lourds et trop coûteux.



	SKELMOD 51V	PBLH-54R0/166SD	SM0165-048-ATH
Voltage (1 unité)	51 V	54 V	48 V
Voltage (total)	51 V	54 V	48 V
Intensité	35 A	35 A	35 A
Capacité (1 unité)	177 F	166 F	165 F
Capacité (totale)	120 F	121 F	15,83 F
Delta t	30 s	30 s	30 s
Nombre	1	1	1
Masse (kg)	15,8	17,2	14,2
Volume (dm³)	15,2	14	14,9
Coût (€)	1861,08	1547,16	832,52

Figure 24 : Première sélection de supercondensateurs

Nous avons donc cherché à mettre en place un pack comprenant plusieurs supercondensateurs moins volumineux.

Le critère de sélection choisi était la tension nominale du composant. Sachant que le pont de diode fonctionne à une tension de 400 V, nous avons choisi des valeurs de tension nominale élevées afin de limiter le nombre de supercondensateurs en série. Cela permet de réduire l'encombrement tout en répondant aux exigences en termes de tension en sortie du pont de diode (leurs tensions s'additionnant).



	A958AL112M800S	SM0006-180-P
Voltage (V)	800	180
Voltage total	800	180
Intensité	35 A	35 A
Capacité (1 unité)	0,0011 F	6 F
Capacité totale	4,42 F	25,3
Delta t	50 s	60 s
Nombre	5 (en parallèle)	5 (en parallèle)
Masse totale (kg)	3,3	26
Volume total	7,4 dm³	34,5 dm³
Coût total (€)	360	3 650

Figure 25 : Deuxième sélection de supercondensateurs

On constate que le deuxième pack de supercondensateur possède une capacité totale plus grande que le premier. Or, la capacité totale du premier pack est amplement suffisante car elle permet de stocker 1 414 kW contre 97 kW (avec la formule $E=0,5 \times C_{tot} \times U^2$). D'autre part, le premier pack est plus léger, moins volumineux et moins cher.

Un aspect est que brancher tous les supercondensateurs en dérivation rend l'ensemble plus fiable.

Pour conclure, notre choix se tournerait vers un pack comprenant plusieurs A958AL112M800S qui est léger, peu encombrant et à un prix abordable. On émettra seulement une réserve en ce qui concerne l'énergie stockable. Il pourrait être intéressant dans une étude ultérieure de faire varier le temps de décharge (donc la capacité totale et donc le nombre de supercondensateurs) afin de coller au plus près des besoins en puissance des moteurs.

Evaluation du type et du nombre de carte de puissance

Pour ce composant, aucune recherche n'avait été effectuée et la question du nombre ou même de la référence de celui-ci n'était pas pris en compte. Nous avons donc été amené à étudier le type de branchement de ce composant, mais surtout son choix. Même si cette partie arrive avant celle des moteurs, il nous a fallu attendre le type de moteur choisi pour pouvoir définir notre carte de puissance. Pour le moteur choisi (voir partie 3), seules deux cartes de puissances sont compatibles. On a donc une comparaison à faire afin de faire le choix du meilleur composant possible pour notre chaîne de puissance.



Figure 26: ESC ALPHA 120A 12S – TMOTOR



Figure 27: ESC Flame 180A 12S V2 - TMOTOR

Nous avons choisi le modèle ESC Flame 180A 12S V2 - TMOTOR puisqu'il supporte un courant plus élevé ce qui est nécessaire pour notre moteur. Cependant, il reste le plus coûteux des deux propositions. Concernant la disposition, on aurait une carte de puissance par moteur, ce qui fait un total de 60 cartes de puissances de 279g donc un poids total supplémentaire de 16,74kg, or, on cherche à minimiser le poids.

Étude Carte de puissance :		
Modèle	ESC ALPHA 120A 12S - TMOTOR	ESC Flame 180A 12S V2 - TMOTOR
Taille	110 x 55 x 25 mm	112,2 x 50,5 x 35,5 mm
Poids	359,5 g	279 g
Courant continu	100 A	180 A
Pic de courant	120 A	200 A
Tension Max	50,2 V	50,2 V
Prix	171,68 € TTC	262,58 € TTC

Figure 28 : Tableau comparatif des cartes de puissances

C'est pourquoi on a tout de même cherché une alternative à ce composant. Il est possible de trouver un composant beaucoup plus puissant qu'on placera en tant que carte de puissance pour six moteurs en série.

Étude Carte de puissance :

MOTOR CONTROLLER HBC 50063-3

- Valeur maximum du courant : 600A
- Valeur maximum de la puissance : 37 kW
- Voltage : 16-63V
- Poids : 1,26 kg




Figure 29 : Données sur nouvelle proposition de carte de puissance

Le problème resterait à savoir si ce branchement est techniquement réalisable et si le fait de brancher six moteurs sur une même carte de puissance ne poserait pas de problème dans le placement des moteurs. En vue de ce qu'il a été proposé en termes de disposition des moteurs nous pensons que cela ne sera pas possible.

Pour contrôler l'ensemble des cartes de puissance nous allons utiliser deux cartes de contrôle SPI (pour chaque branche d'EMRAX). Ce composant est hors de la chaîne de puissance, mais il est tout de même important de la prendre en compte pour notre réflexion des branchements et de la façon dont la chaîne se comporte.

Étude Carte de contrôle :

- Consommation électrique : entre 1.8 V à 3.6 V
- 10€ l'unité
- 140 mm³



Figure 30 : Données de la carte de contrôle

Partie 3 : Moteur et hélice

Etude du choix du moteur

Nous avons ensuite été amené à faire le choix du type de moteurs BLDC qui équipera le MiniBee. Ces moteurs seront au nombre de 60 et doivent donc être choisis avec soin afin de ne pas représenter un prix ni une masse trop importante.

On nous a donc proposé de choisir l'un des deux candidats qui avaient été retenus par les études précédentes : l'**U12 KV120** et son cousin, l'**U13 KV130**, une version plus puissante mais également plus chère et plus lourde.

Nous avons donc fait une étude comparative de ces deux moteurs afin d'étudier s'ils respectaient tout deux le cahier des charges et, le cas échéant, de choisir le meilleur compromis.

Nous avons décidé pour cela de prendre plusieurs critères :

- La tension d'entrée
- Le courant d'entrée
- La puissance maximale disponible
- La puissance disponible fournie avec le courant maximale en sortie des supercondensateurs sans redistribution de la puissance
- La masse totale
- Le volume totale
- Le prix

	U12 KV120	U13 KV130	
Voltage (V)	48	48	
Pmax (W)	4560	5659	
Pmin (W)	696	979	
Max continuous current (A)	94	118	
Max thrust (kg)	20,4	24,3	
Weight (g)	778	990	
rpm	4742	4609	
Total max thrust (kg)	1224	1458	> masse Mini Bee (700kg)
Total weight with prop (kg)	54,6	67,1	
Total price with prop TTC (€)	42770,4	44709,6	

Figure 31 : Tableau comparatif BLDC

Après avoir étudié les données constructrices, nous pouvions avancer que la tension et le courant d'entrée correspondaient aux cahiers des charges. Par ailleurs, bien que l'U13 KV130 délivrait plus de puissance, nous avons étudié après différents calculs que les deux moteurs permettaient au Minibee de se sustenter pendant la phase de vol la plus énergivore (ie le décollage vertical).

Par ailleurs, le moteur U12 KV120 étant plus petit, il présente l'avantage d'être moins lourd, moins encombrant et surtout moins cher que son concurrent l'U13 KV130.

Par ailleurs, il semble important de noter que le pont de diode assure un apport maximal en courant de 32.6 A, ce qui correspond à environ 63% de la puissance disponible. Cette puissance supplémentaire par moteur pourra être néanmoins exploitée via une répartition de la puissance entre les 60 moteurs en fonction des différentes phases de vol. Ainsi, à un instant T du vol, certains moteurs pourront être à 100% de leur puissance (pour rappel, la puissance nominale est de 63%) pendant que d'autres seront à 30% par exemple.

Ainsi, nous avons donc choisi de retenir l'**U12 KV120**. En effet, ce BLDC est le candidat qui présentait les caractéristiques les plus intéressantes, tout en respectant le cahier des charges.

Etude des performances motrices suivant le type d'hélices

Une étude similaire a été effectuée sur les hélices des BLDC. En effet, nous devons sélectionner un type d'hélice entre 3 candidats : les **G30*10,5 inch**, les **G32*11 inch** et les **G34*11,5**.

Différents éléments ont été pris en compte afin d'élire le bon candidat :

- Le nombre de RPM optimal pour chaque type d'hélice
- La poussée générée au RPM maximal de l'U12 KV120
- La masse
- Le volume

	G30*10,5inch	G32*11inch	G34*11,5inch	
Optimum RPM	2150	2100	1950	
Max thrust (kg)	33	35	42	
Total max thrust (kg)	1980	2100	2520	
Total max thrust (N)	19424	20601	24721	>2 à 3*7500N (2 à 3*masse Mini Bee)
Total weight (kg)	7,8	7,8	7,8	
Total price TTC (€)	9300	9900	10500	
RPM U12 KV120	192	180	169	
Différence de masse négligeable				

Figure 32 : Tableau comparatif hélices

A la suite d'une étude comparative, nous avons choisi l'hélice G30*10.5 inch car elle présente le rapport prix/ performance le plus intéressant tout en respectant le cahier des charges.

Partie 4 : Choix de la chaîne de puissance adéquate

Description de la chaîne de puissance choisie

Nous avons choisi de conserver la configuration sans Gearbox qui nous permet de gagner quelques kilos au niveau de la Gearbox mais surtout au niveau des Emrax qui le suivent. En effet l'Emrax 268 est plus léger que le 228. Nous nous retrouvons avec un gain de 20,1 kg ainsi que de 1000€.

En sortie d'Emrax, nous avons plusieurs hypothèses de branchements pour le reste des composants.

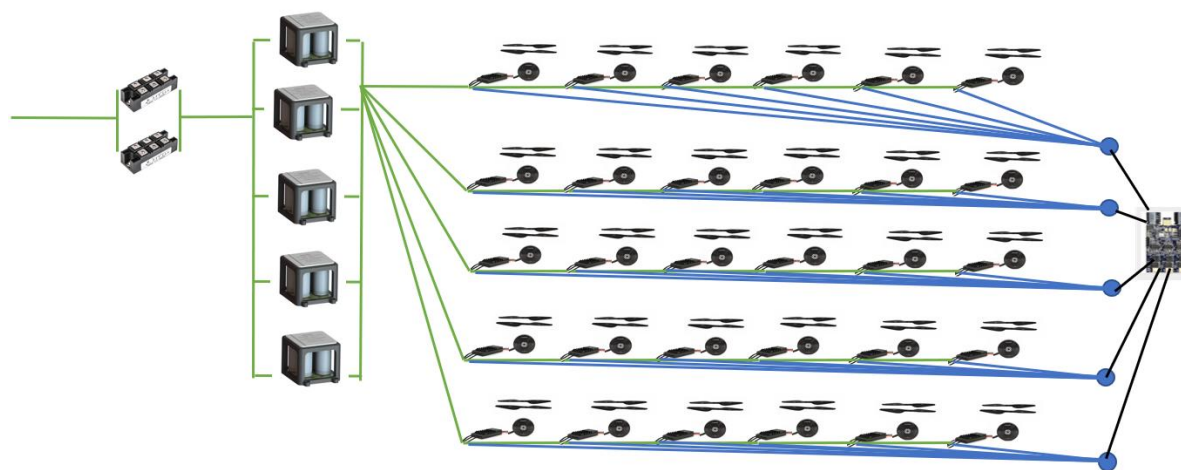


Figure 33 : Schéma choisie en sortie d'un Emrax

Nous avons retenu le schéma ci-dessus. Il nous permet d'exploiter au mieux les composants. Les 2 pont de diodes supportent l'hexaphasé d'un Emrax 228. Suivent 5 supercondensateurs en parallèle qui permettent un temps de puissance disponible de 60s. 5 branches sont ensuite branchées en parallèle. Chacune de ses branches comporte 5 moteurs en série. Chacun avec ses hélices, et son contrôleur de puissance.

L'ensemble des branches est rattaché à la carte de contrôle STM32.

Dans quel mesure ce choix est-il viable ?

Cette architecture permet d'augmenter la fiabilité du mini-bee en limitant les risques de crash lors de la rupture d'une branche, grâce au montage en parallèle puis en série des moteurs. Les caractéristiques de chaque composant sont respectées (Intensité et tension entrantes).

Avantages de cette chaîne par rapport aux autres

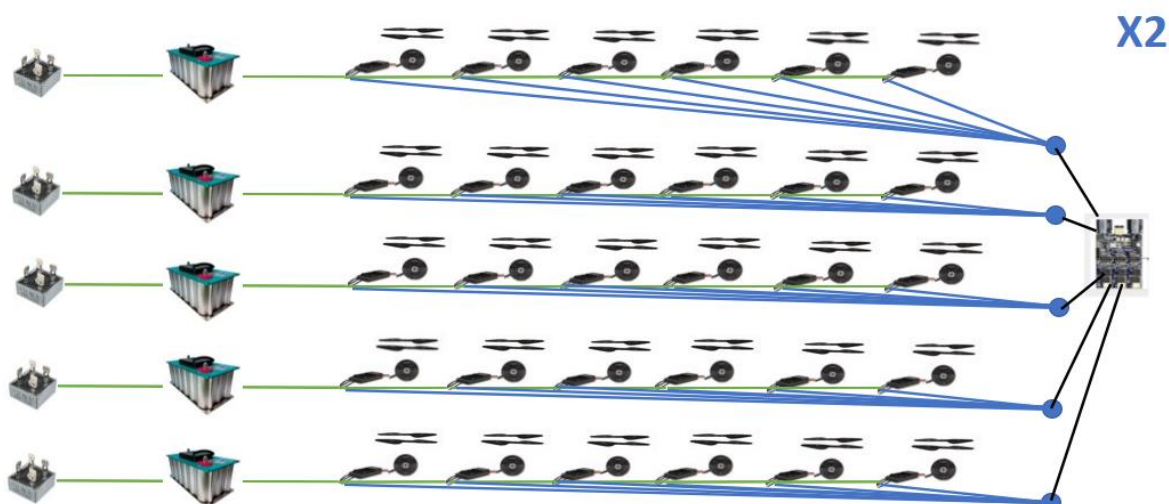


Figure 34 : Schéma alternatif écarté

Dans un premier temps nous avons considéré ce schéma. Cependant, il était plus lourd, onéreux et plus encombrant car demandant plus de ponts de diodes. Notre chaîne (Figure 28) écarte ses problèmes tout en conservant la fiabilité.

Bilan des composants choisis :

SANS GEARBOX	Rotax	Emrax	Pont de diode	Supercondensateur	Carte de contrôle	CdP	Moteur BLDC	Hélices	TOTAL DE LA CHAINE
Modèle	915IS (sans gearbox)	228 High Voltage	VS-160MT80KBPF	A958AL112M800S	STM32	ESC Flame 180A 12S V2 - TMOTOR	U12 KV120	G30*10.5inch	
Quantité	1	2	4	10	2	60	60	60	
Prix total (€)	36106	2790	329.28	720	20	15754.8	42770		98490.08
Poids (Kg)	85	24.8	0.704	7	0.558	16.74	47.5	7.8	189.702
Volume			0,099dm3	1,48m3	<0,001dm3	0,201dm3	17dm3		
Puissance max (kW)	104	52	160			10	4.56		
Intensité (A)		132 - 163	200	35		180 (200 pic)	14 - 94		
Tension (V)		227,2 - 397,2	800	800	1,8-3,6	50.2	48		

AVEC GEARBOX	Rotax	Emrax	Pont de diode	Supercondensateur	Carte de contrôle	CdP	Moteur BLDC	Hélices	TOTAL
Modèle	915IS (avec gearbox)	268 HV	VS-160MT80KBPF	A958AL112M800S	STM32	ESC Flame 180A 12S V2 - TMOTOR	U12 KV120	G30*10.5inch	
Quantité	1	2	4	10	2	60	60	60	
Prix total (€)	36106	3798	329.28	720	20	15754.8	42770		99498.08
Poids (Kg)	88.9	41	0.704	7	0.558	16.74	47.5	7.8	209.802
Volume			0,099dm3	1,48m3	<0,001dm3	0,201dm3	17dm3		
Puissance max (kW)	104	52	160			10	4.56		
Intensité (A)		120-130	200	35		180 (200 pic)	14 - 94		
Tension (V)		345,7 - 462,7	800	800	1,8-3,6	50.2	48		

20.1 Kg

Conclusion

La validation de la chaîne de puissance du projet d'ambulance volante Minibee a été une expérience très enrichissante pour notre équipe d'élèves ingénieurs. Pendant près d'un an, nous avons travaillé ensemble sur ce projet complexe et avons pu appliquer les compétences acquises lors de notre apprentissage.

L'un des aspects les plus passionnants de nos projets est de travailler sur des produits innovants qui ont un impact positif sur la vie des gens. En travaillant sur la conception d'une ambulance volante, nous avons appris à résoudre des problèmes de manière créative et à innover avec une technologie de pointe.

Le travail d'équipe a été un facteur clé dans la réussite de notre projet. Nous avons dû apprendre à travailler ensemble en harmonie, en utilisant les compétences et les connaissances de chacun pour atteindre nos buts. Nous fixons des objectifs clairs et précis, distribuons les tâches équitablement et rendons compte régulièrement des progrès via un diagramme de Gant. Cela nous a permis de travailler ensemble efficacement et de mener à bien le projet.

De plus, l'apprentissage dans les processus standardisés tels que les présentations régulières de l'état d'avancement des projets et les rapports d'avancement via Powerpoint tels qu'ils sont faits en entreprise, nous ont fourni une expérience précieuse. Nous travaillons également en étroite collaboration avec des mentors et des experts de l'industrie pour obtenir des commentaires et des conseils sur notre travail.

En définitive, cette expérience nous a permis de mieux comprendre les exigences des professionnels de l'ingénierie tout en développant des compétences pratiques essentielles pour notre future carrière, telles que la résolution créative de problèmes, la gestion de projet, la collaboration et la communication professionnelle. Nous sommes fiers de notre travail et croyons que cette expérience nous servira tout au long de notre carrière.