
Modélisation de la chaîne de propulsion du Mini-Bee

Léo-Paul TONETTO
Maxime VERNHET

Projet 2A 2021-2021

Encadrants : Xavier DUTERTRE & Alessandro SILVESTRINI

Table des matières

.....	1
I – CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE	3
II – MODELISATION DES MOTEURS A COURANT CONTINU.....	4
1) CONTROLE EN TENSION.....	5
2) CONTROLE EN VITESSE	7
3) MODELE SIMSCAPE ELECTRICAL	9
III – MODELISATION DES MOTEURS ASYNCHRONES	11
1) MODELE 2A CS 2020-2021.....	11
2) MODELE SIMPSCAPE ELECTRICAL.....	12
IV – MODELISATION D’UN GENERATEUR SYNCHRONE.....	14
1) MODELE 2A CS 2020-2021.....	14
V – ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE.....	15
1) REDRESSEUR HEXAPHASE	16
2) BOOST CONVERTER	17
3) BUCK CONVERTER.....	18
4) ASSOCIATION DU BOOST ET DU BUCK CONVERTER.....	19
5) STOCKAGE DE PUISSANCE	21
6) ASSOCIATION SOURCE TRIPHASEE + REDRESSEUR + CONTROLEUR DE TENSION.....	21
VII – MODELISATION DE LA CHAINE DE PROPULSION	23
1) MODELISATION DES BLDC	23
2) MACHINE SYNCHRONE GENERATRICE HEXAPHASEE EMRAX 268.....	25
3) EMRAX 268 + REDRESSEUR + 9 PAIRES DE U13 II KV130	27
4) AMELIORATION DE LA CHAINE GLOBALE	29
VIII – TESTS DE SCENARII DE VOL.....	34
1) ARRET D’UNE PAIRE DE MOTEURS.....	34
2) SCENARIO DECOLLAGE	37
IX – CONCLUSION	41

I – Contexte et problématique

Le Mini Bee est un véhicule à décollage et à atterrissage vertical ou VTOL (Vertical Take Of and Landing) développé par la société TECHNOPLANE, start-up créée en 2013. Les VTOL apportent des avantages face aux avions et aux hélicoptères, et attirent donc l'œil des scientifiques. Le projet Mini-Bee est un projet collaboratif avec de nombreuses écoles. Les problématiques d'études sont différentes dans chaque école, et l'échange de résultats entre les groupes permettent de gagner en précision et de se coordonner sur un objectif commun. L'idée la plus répandue voudrait voir les VTOL servir comme taxi aériens, permettant le déplacement de civils, mais le projet Mini-Bee porte la barre à un plus haut niveau en ajoutant une dimension médicale. En effet, ce dernier a pour vocation d'être utilisé comme ambulance, et qui pourrait alors atteindre des zones normalement difficiles d'accès, et de ne pas être affecté par les problèmes de circulation routière. Ce dernier doit donc être en mesure de déplacer au minimum deux personnes : le pilote et la personne secourue.

Le Mini-Bee est constitué d'un habitacle (représenté figure 1) relié à 36 rotors et hélices qui permettent d'assurer son déplacement, comme représenté figure 2

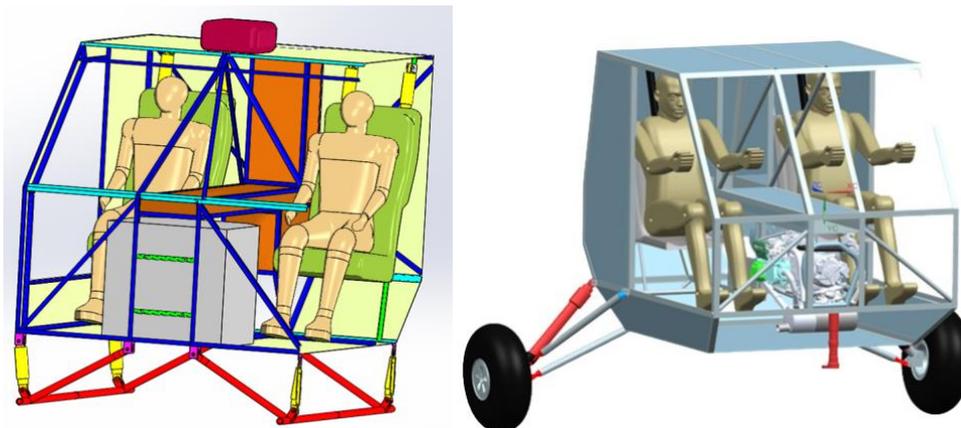


Figure 1 : Schémas de l'habitacle du Mini-Bee

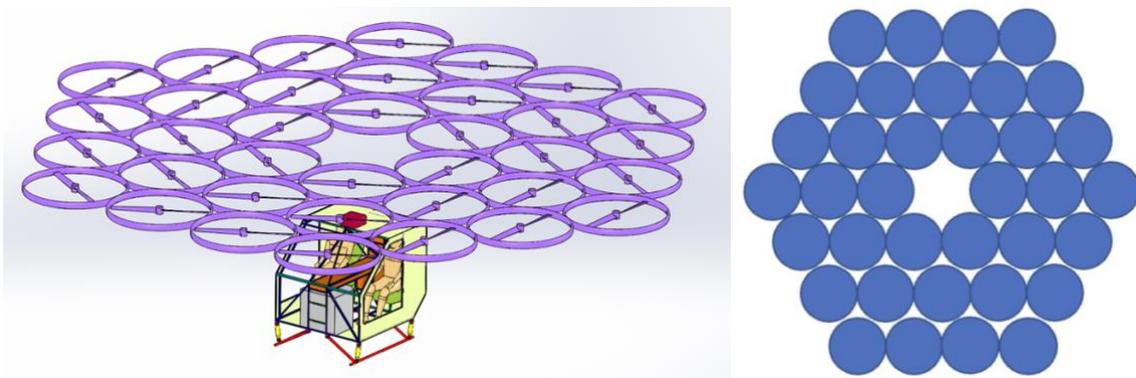


Figure 2 : Schéma extérieur du Mini-Bee

Notre projet est centré sur l'étude de la chaîne de propulsion du Mini-Bee. Elle fait intervenir un ROTAX 915 IS pour alimenter deux génératrices synchrones EMRAX 268 (ou un EMRAX 268 Twin). Deux configurations ont été envisagées lors du lancement de notre projet. La première utilisait un EMRAX 268 Twin High Voltage en triphasé, puis un relai SSR triphasé et des moteurs asynchrones nommés Vevor kit reliés à des réducteurs.

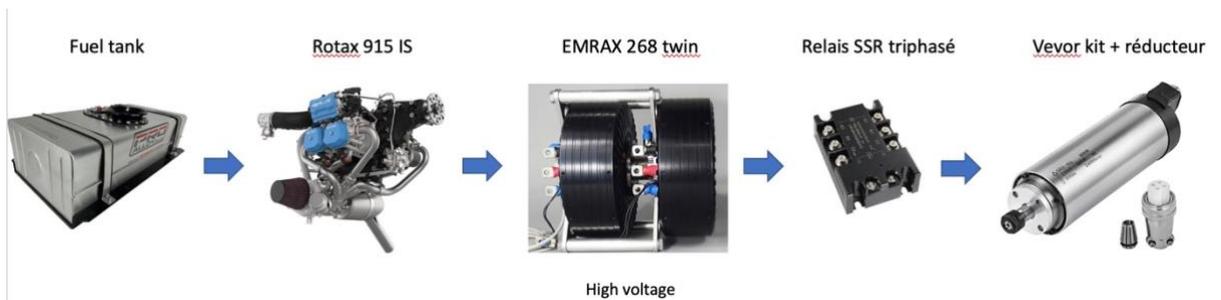


Figure 3 : Schéma de la configuration 1

La deuxième configuration fait intervenir un EMRAX 268 twin Low Voltage mais en hexaphasé, relié à un pont de diodes dans le but d'alimenter des moteurs à courant continu U12 KV90

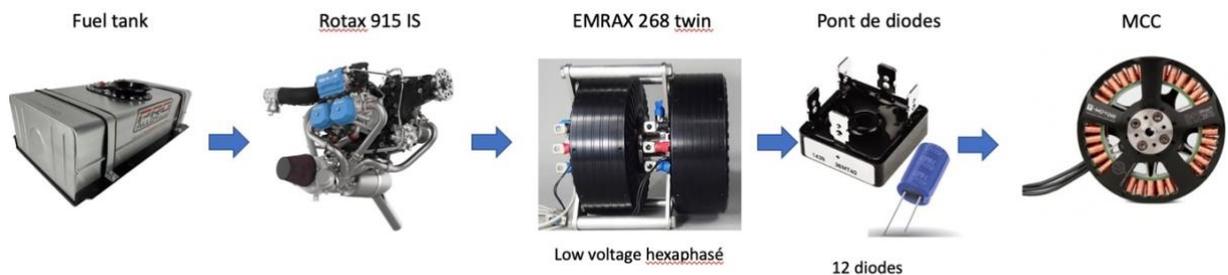


Figure 4 : Schéma de la configuration 2

La première configuration a finalement été abandonnée au début 2022 car ne collait pas assez aux exigences de poids, coûts et de capacité de contrôle nécessaires au bon fonctionnement du Mini-Bee. Nous cherchons à montrer que le contrôle est faisable avec une électronique simple. Nous allons de plus étudier les réactions de ces configurations à différentes situations de vols.

II – Modélisation des moteurs à courant continu

La configuration retenue utilisant des moteurs à courant continu pour faire tourner les pales. Il est nécessaire de les modéliser afin de s'assurer qu'ils vérifient les exigences imposées. Nous avons réalisé plusieurs modèles de moteurs à courant continu, que nous allons soumettre à 3 scénarii : une entrée

en échelon, une entrée en échelon suivi d'un abaissement à 0, et enfin un échelon suivi d'un abaissement à une valeur inférieure mais non nulle.

1) Contrôle en tension

Nous avons modélisé un moteur à courant continu sur Simulink en réalisant un contrôle en tension comme représenté figure 5. Nous avons fait subir à ce modèle les 3 scénarii présentés auparavant afin d'évaluer son comportement

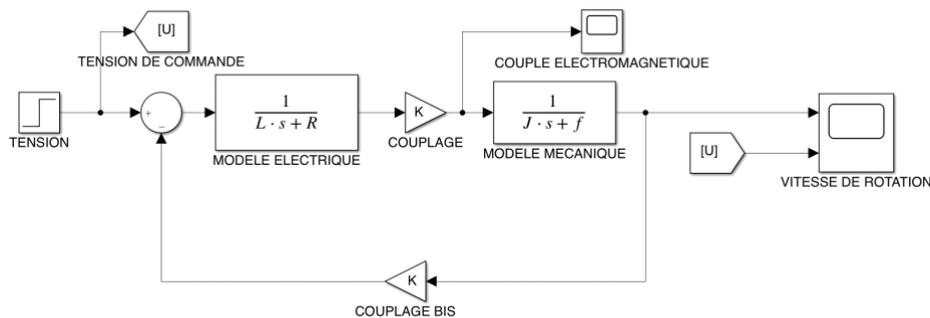


Figure 5 : Schéma Simulink du moteur

Dans le premier scenario, l'entrée est un échelon de tension de 400V. La vitesse de rotation croit exponentiellement et atteint une valeur limite de 2400 rad.s⁻¹. Le temps caractéristique est $\tau = 15\text{ms}$.

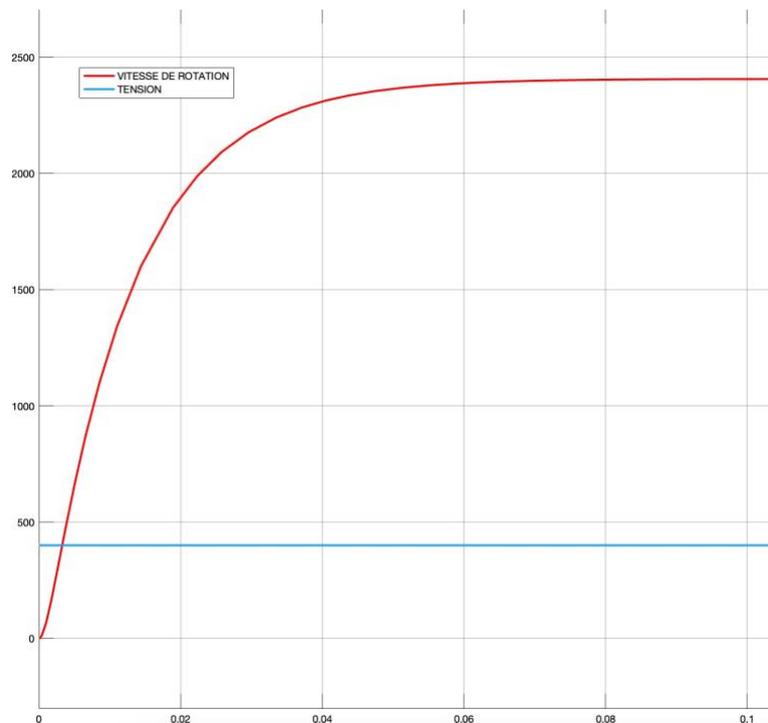


Figure 6 : Réponse au scénario 1 : tension d'entrée (V) et Vitesse de rotation (rad.s⁻¹) en fonction du temps (s)

Dans le deuxième scenario, l'entrée est un échelon de tension de 400V, suivi d'un abaissement à 0V après 100 ms. La vitesse de rotation croit exponentiellement et atteint encore une valeur limite de 2400 rad.s^{-1} avec un temps caractéristique $\tau = 15\text{ms}$, puis elle décroît exponentiellement jusqu'à atteindre une valeur nulle, ce qui est cohérent avec le comportement attendu.

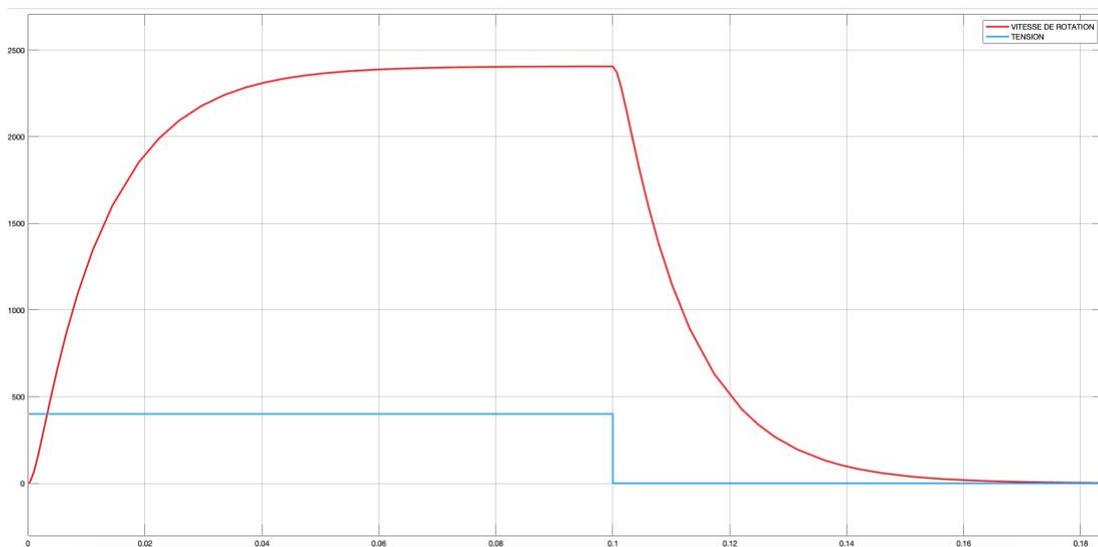


Figure 7 : Réponse au scénario 2 : tension d'entrée (V) et Vitesse de rotation (rad.s^{-1}) en fonction du temps (s)

Dans le troisième scenario, l'entrée est un échelon de tension de 400V, suivi d'un abaissement à 300V après 100 ms. La vitesse de rotation croit exponentiellement et atteint encore une valeur limite de 2400 rad.s^{-1} avec un temps caractéristique $\tau = 15\text{ms}$, puis elle décroît exponentiellement jusqu'à atteindre une valeur de 1800 rad.s^{-1} , ce qui est encore une fois cohérent avec le comportement attendu.

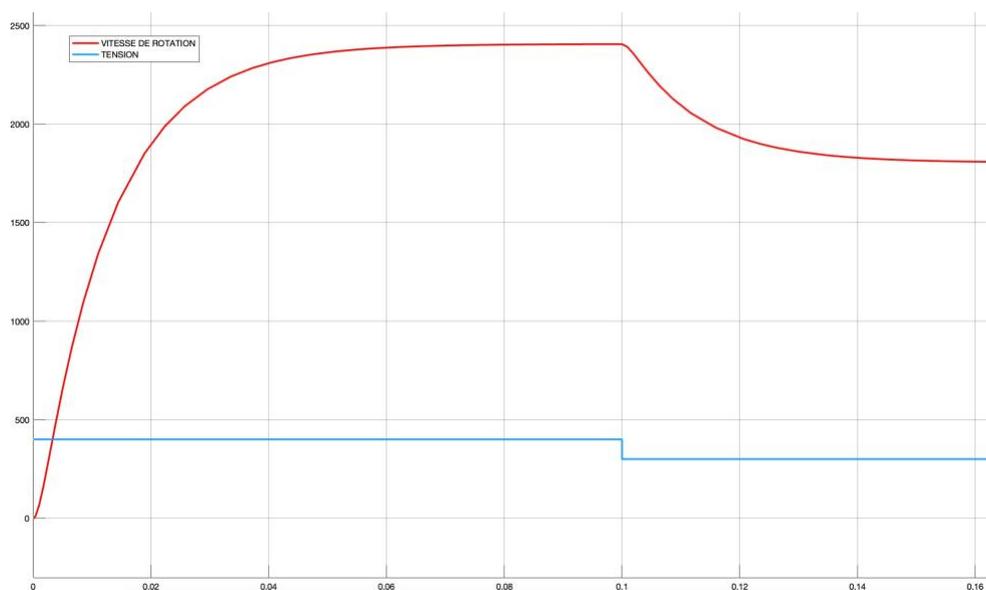


Figure 8 : Réponse au scénario 3 : tension d'entrée (V) et Vitesse de rotation (rad.s^{-1}) en fonction du temps (s)

Ainsi ce modèle répond aux premières attentes.

2) Contrôle en vitesse

Dans ce modèle, le contrôle ne s'effectue plus en tension mais en vitesse de rotation. Le schéma Simulink du modèle est donné figure 9.

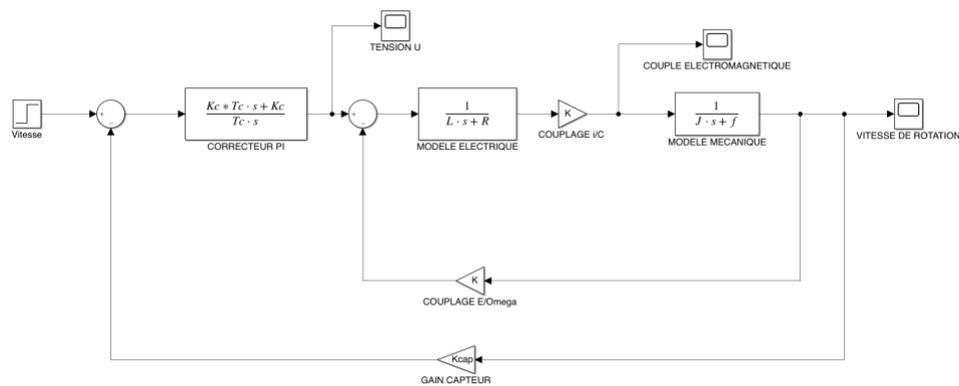


Figure 9 : Schéma Simulink du moteur

Dans ce premier scénario, on soumet le moteur à une entrée en échelon d'une valeur de 2400 $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$. On remarque que la vitesse de rotation converge bien vers la valeur souhaitée avec un temps caractéristique $\tau = 2.5\text{ms}$. On remarque de plus un dépassement de la vitesse de consigne. Nous avons malgré tout une possibilité de l'annuler en enlevant le correcteur proportionnel intégral, mais ceci induirait une augmentation de τ et l'erreur statique ne serait plus nulle.

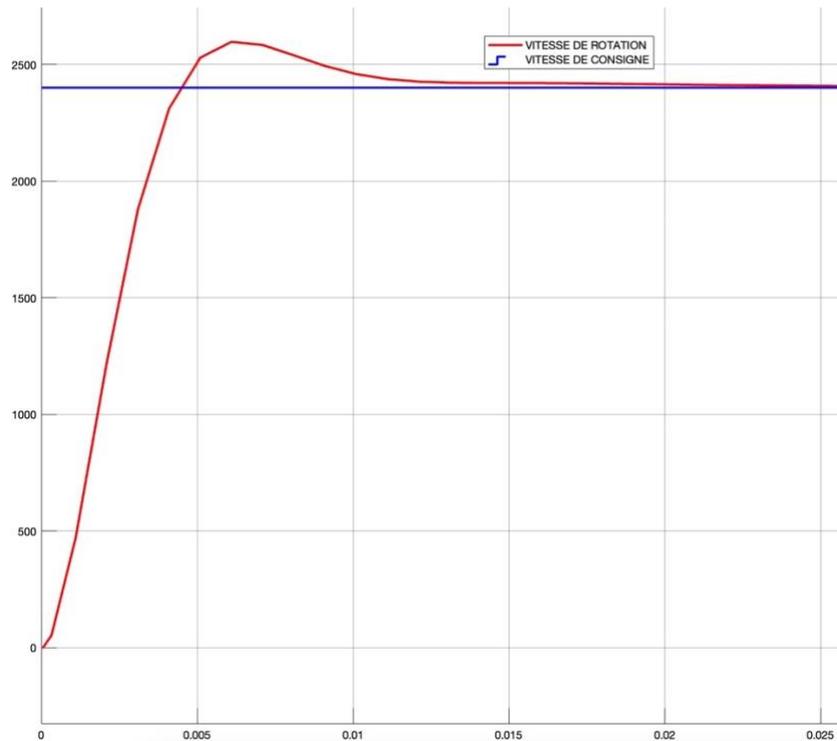


Figure 10 : Réponse au scenario 1 : vitesse d'entrée (rad.s^{-1}) et Vitesse de rotation (rad.s^{-1}) en fonction du temps (s)

Dans le deuxième scenario, on soumet le moteur à une entrée en créneau d'une valeur de 2400 rad.s^{-1} suivi d'un abaissement à 0 rad.s^{-1} à 20ms. On remarque que la vitesse de rotation converge bien vers 2400 rad.s^{-1} avec un temps caractéristique $\tau = 2.5\text{ms}$, puis que la valeur converge bien vers 0 lors de l'abaissement. On remarque de plus un dépassement de la vitesse par rapport à la consigne, qui devient négative lors de l'abaissement. Ceci pourrait poser un problème, car cela signifierait que les pales tournent dans le mauvais sens, entraînant la chute du Mini-Bee. Cependant ce cas n'arrivera pas en pratique, car on ne cherchera pas à éteindre les moteurs en cours de vol, et nous pouvons donc garder le correcteur proportionnel intégral pour garder en rapidité et en précision.

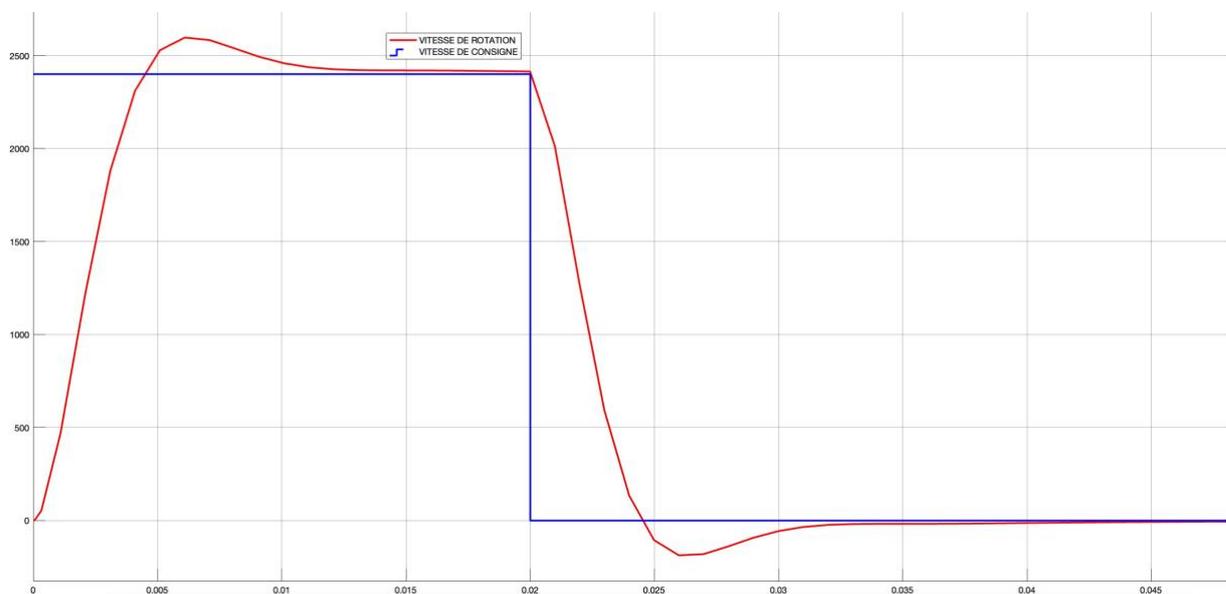


Figure 11 : Réponse au scenario 2 : vitesse d'entrée (rad.s^{-1}) et Vitesse de rotation (rad.s^{-1}) en fonction du temps (s)

Enfin dans le troisième scenario, on soumet le moteur à une entrée en créneau d'une valeur de 2400 rad.s^{-1} suivi d'un abaissement à 2300 rad.s^{-1} à 20ms. On remarque que la vitesse de rotation converge bien vers 2400 rad.s^{-1} avec un temps caractéristique $\tau = 2.5\text{ms}$, puis que la valeur converge bien vers 2300 rad.s^{-1} lors de l'abaissement. Les dépassements sont toujours présents mais ne posent pas de problème dans le cadre d'utilisation du Mini-Bee.

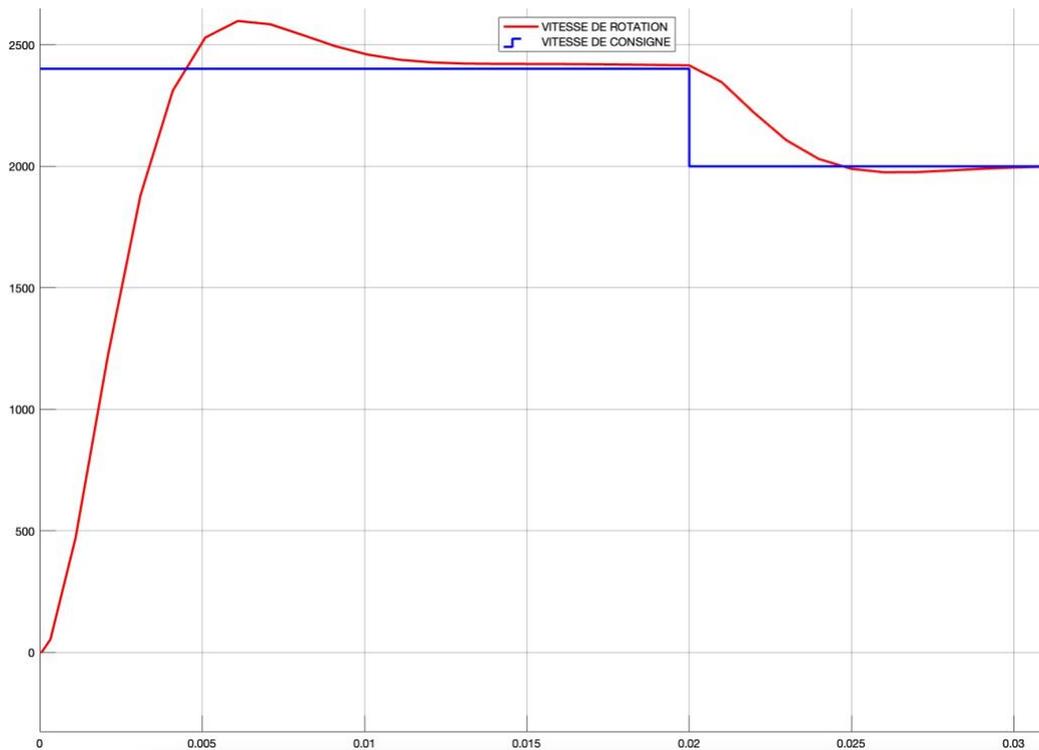


Figure 12 : Réponse au scenario 3 : vitesse d'entrée (rad.s^{-1}) et Vitesse de rotation (rad.s^{-1}) en fonction du temps (s)

3) Modèle Simscape Electrical

Enfin notre dernier modèle de moteur à courant continu utilise le module Simscape Electrical, et permet de modifier plus facilement le couple de la charge en entrée. Son schéma Simulink est donné figure 13.

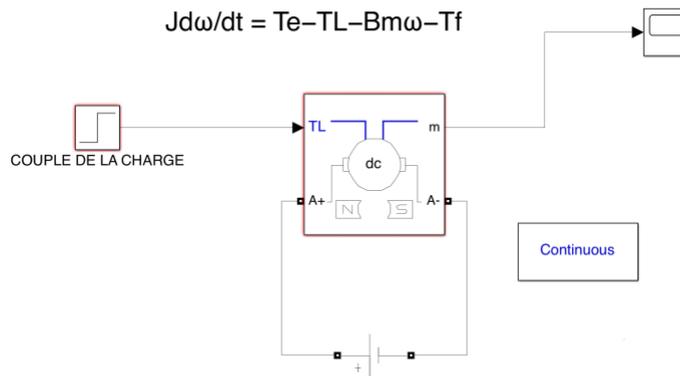


Figure 13 : Schéma Simulink du moteur

Nous n'avons fait subir à ce modèle que le premier scenario décrit auparavant, afin de vérifier l'équivalence de ce modèle par rapport à notre premier modèle contrôlé en tension évoqué partie 1. Nous avons donc utilisé un échelon de tension de 400V en entrée et la vitesse de rotation en réponse est obtenue figure 14. On remarque que la vitesse de rotation converge vers la même valeur que précédemment, et on peut donc valider ce modèle. On remarque une fois de plus que le correcteur proportionnel intégral utilisé dans le modèle contrôlé en vitesse permet de rendre le moteur plus rapide, car dans ce 3^{ème} modèle le temps caractéristique est $\tau = 12\text{ms}$.

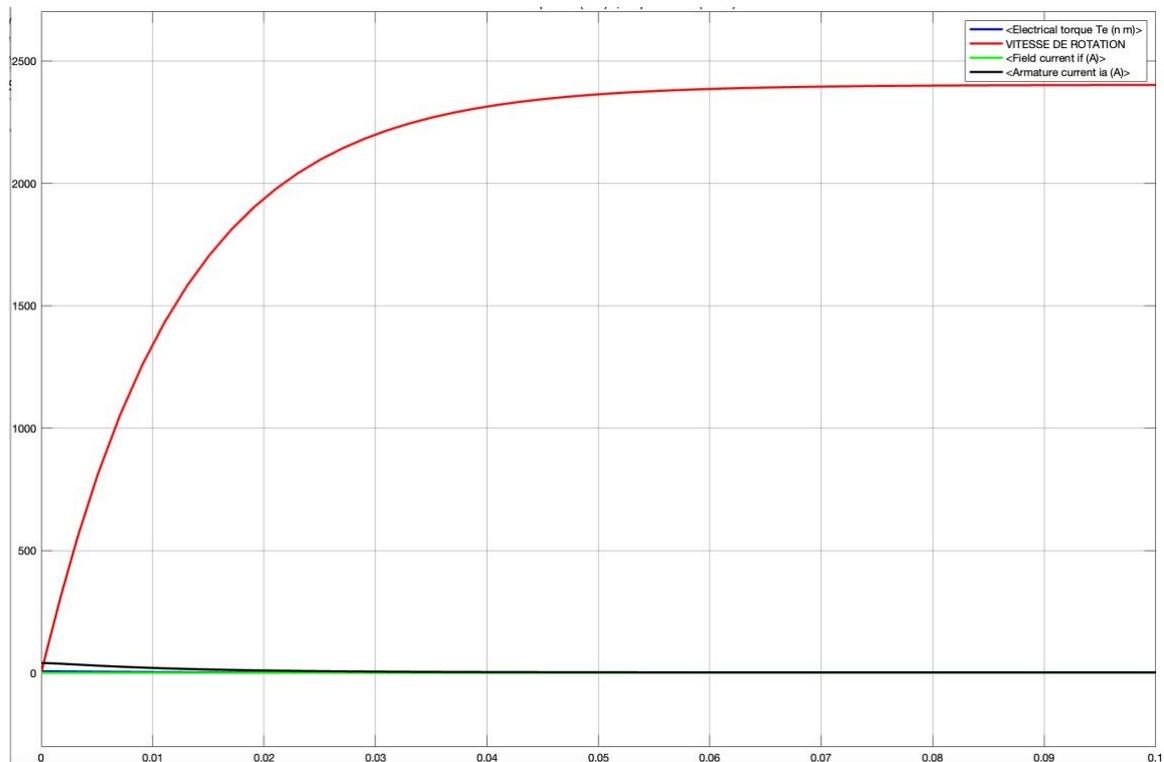


Figure 14 : Réponse au scenario 1 : Vitesse de rotation (rad.s⁻¹) en fonction du temps (s)

III – Modélisation des moteurs asynchrones

Nous nous sommes penchés dans un premier temps sur la modélisation de moteurs asynchrones afin de déterminer la faisabilité de la première configuration. Cependant, la première configuration a finalement été laissée de côté et seuls les moteurs de la deuxième configuration doivent être considérés, c'est pourquoi nous ne nous creuserons pas plus cette partie.

1) Modèle 2A CS 2020-2021

Nous avons commencé par récupérer le modèle créé lors du projet 2A à CentraleSupélec lors de l'année scolaire 2020-2021. Le schéma Simulink du moteur asynchrone est donné figure 15.

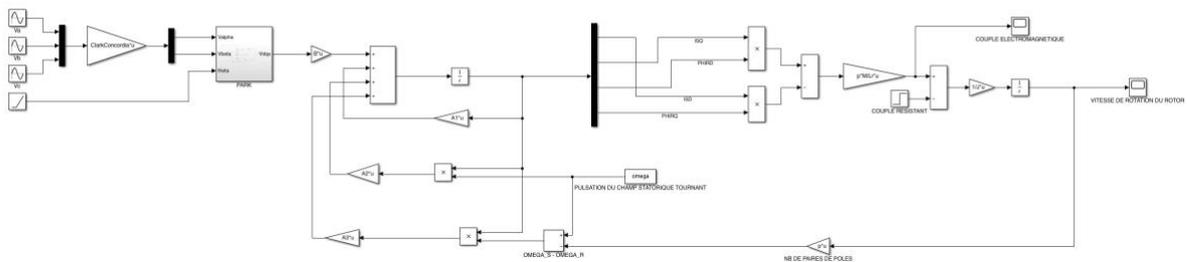


Figure 15 : Schéma Simulink du moteur

Ce modèle a été soumis à une tension triphasée d'amplitude V_{\max} de 200V, avec un couple de charge de 10Nm qui n'arrive qu'à partir de 0.5s. La vitesse de rotation en sortie est tracée figure 16. On y observe un régime transitoire de l'ordre de 1 seconde, et le modèle est stable.

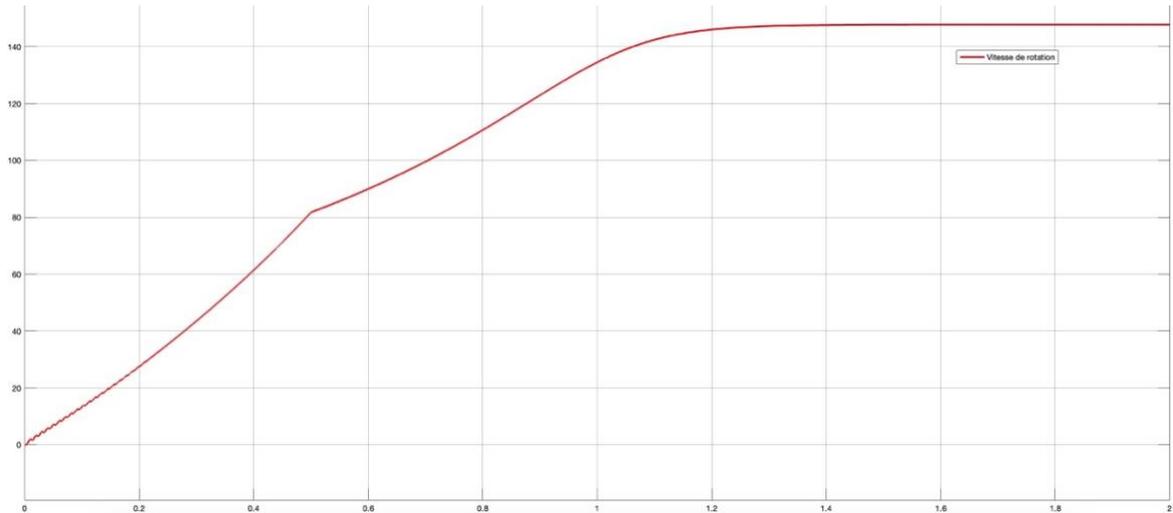


Figure 16 : Réponse du moteur : Vitesse de rotation (rad.s^{-1}) en fonction du temps (s)

2) Modèle Simscape Electrical

Nous avons encore une fois fait appel au module Simscape Electrical afin de modéliser le moteur asynchrone. Son schéma Simulink est donné figure 17.

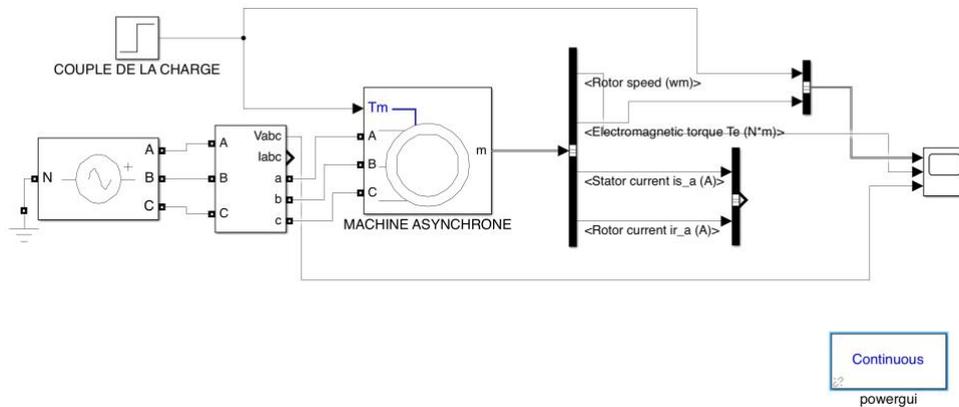


Figure 17 : Schéma Simulink du moteur

Nous avons soumis ce modèle à un premier scenario, avec une fréquence de 50Hz, un couple de charge 30 Nm à partir de 1s, et une tension composée de 325 V et source avec une tension triphasée. La réponse du moteur est donnée figure 18



Figure 18 : Réponse du moteur au scenario 1 : Vitesse de rotation ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$) en fonction du temps (s)

Puisque le but est de contrôler la vitesse de rotation du moteur en tension ou en fréquence le moteur asynchrone, nous avons créé une source de tension triphasée commandable, en amplitude pour commencer, afin de remplacer la source de tension présentée sur ce modèle. Nous arrivons ainsi au deuxième modèle, dont le schéma Simulink est donné figure 19

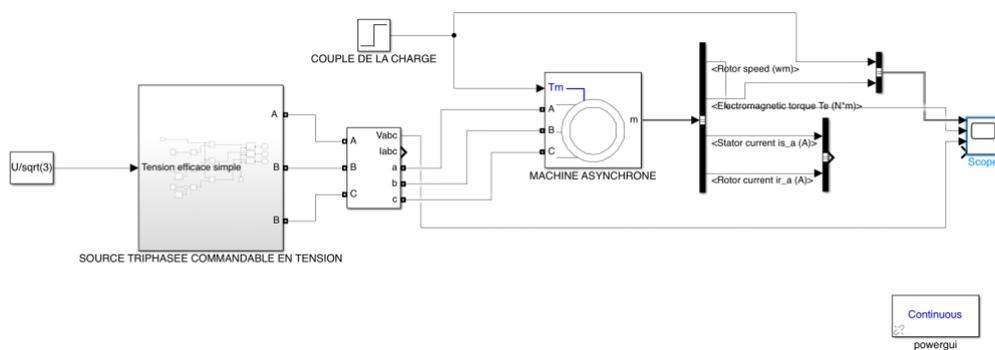


Figure 19 : Schéma Simulink du deuxième modèle

Afin de vérifier le bon fonctionnement du bloc de commande en tension, nous avons cherché à reconstruire le même signal d'entrée que celui du scenario précédent. La réponse du modèle nous permet de valider le bloc de tension commandable, car on constate que le couple est similaire et donc

la source de tension commandable fonctionne correctement. Elle est équivalente à la source précédente.

Grâce à ce bloc on va également pouvoir contrôler le moteur en fréquence.

IV – Modélisation d’un générateur synchrone

Comme la génératrice EMRAX 268 Twin est une machine synchrone, nous avons dû également nous concentrer sur la modélisation d’une génératrice synchrone sur Simulink.

1) Modèle 2A CS 2020-2021

Comme pour le moteur asynchrone, nous avons récupéré dans un premier temps le travail réalisé par Joseph l’année précédente pour avoir une base de départ. Son modèle Simulink portait sur le moteur synchrone et est représenté figure 20.

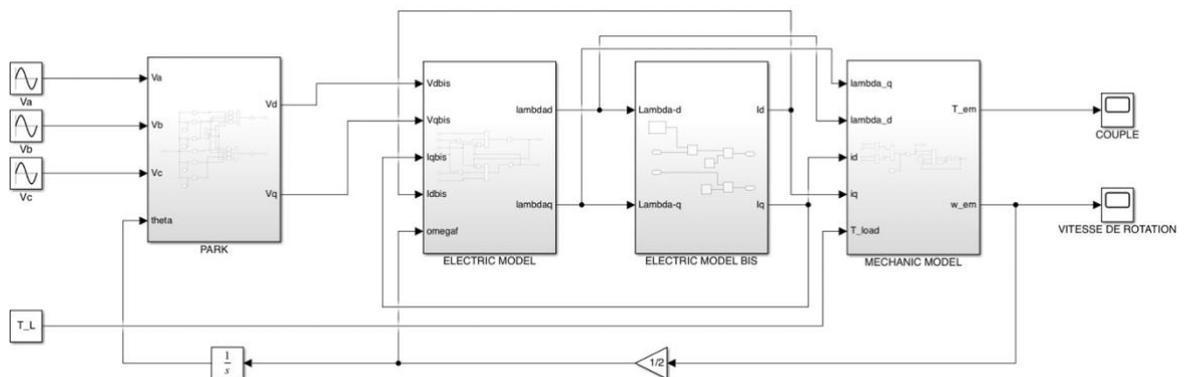


Figure 20 : Schéma Simulink du moteur synchrone

La simulation réalisée à partir de ce modèle montre la vitesse de rotation et le couple d’un moteur synchrone alimenté par une source triphasée de 230V et soumis à une charge de 20Nm. On obtient alors les 2 graphiques suivants.

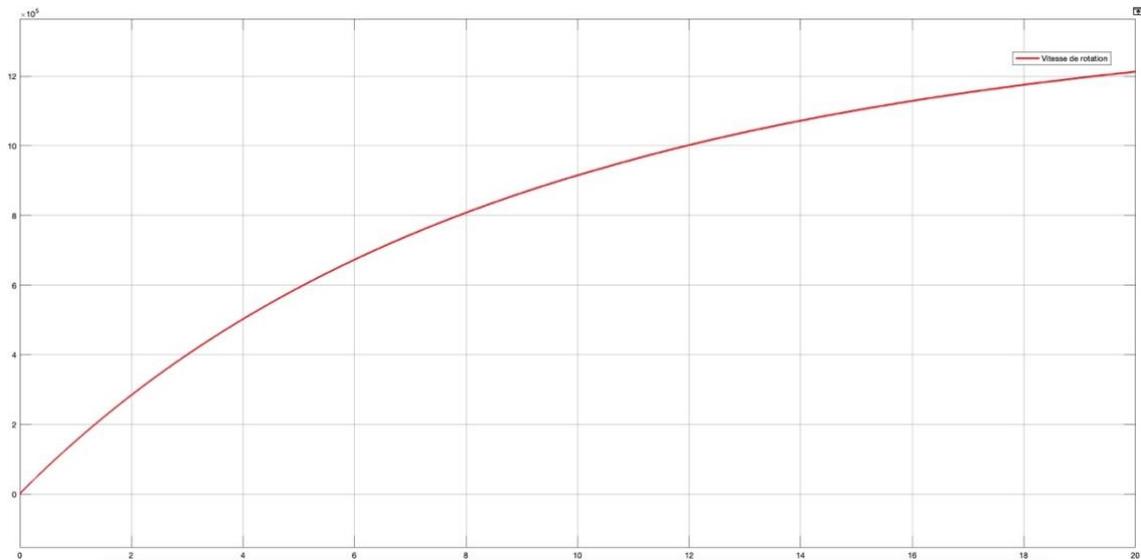


Figure 21 : Vitesse de rotation (rad.s^{-1}) en fonction du temps (s)

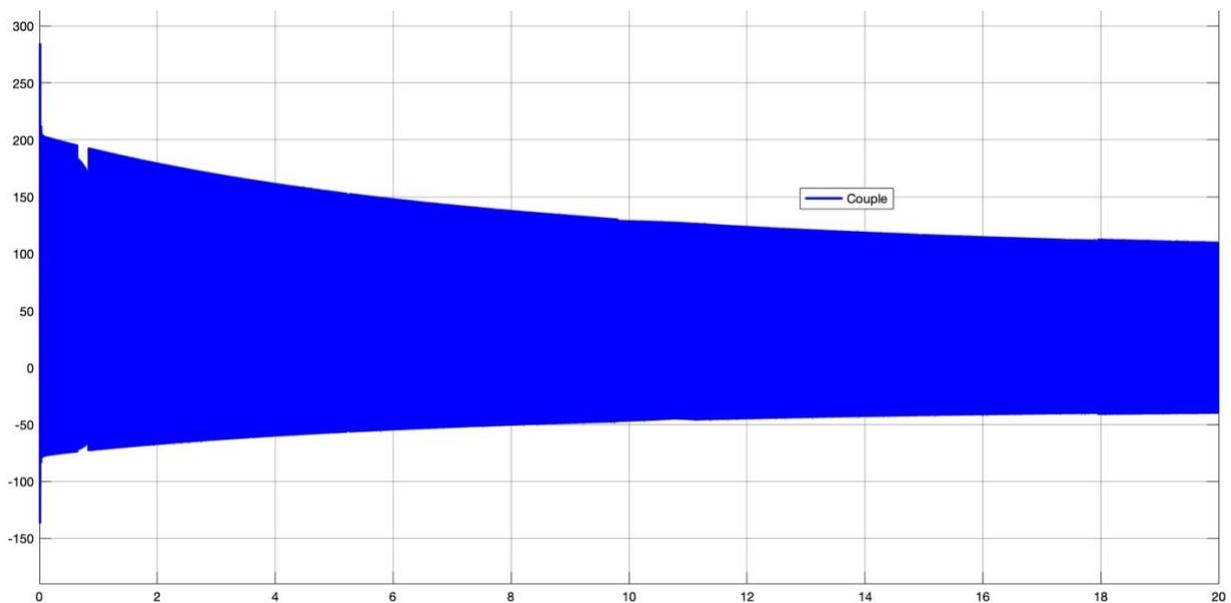


Figure 22 : Couple (Nm) en fonction du temps (s)

Pour le moment, nous n'avons pas développé davantage cette partie. Nous remplaçons, dans nos simulations, la génératrice par une source de tension triphasée ou hexaphasée.

V – Électronique de puissance

Afin de contrôler les différentes machines électriques de notre chaîne de propulsion, nous allons avoir besoin d'électronique de puissance. En effet, pour la configuration qui a été retenue, il est nécessaire de redresser la tension hexaphasée en sortie de l'EMRAX 268 Twin. Pour ce faire, nous

allons implémenter un redresseur hexaphasé pour créer une tension continue en sortie de la génératrice hexaphasée. Comme nous devons à terme maîtriser la tension aux bornes des moteurs à courant continu pour contrôler les hélices du Mini-Bee, il nous fallait concevoir un système pour fournir une tension quelconque aux moteurs à partir de n'importe quelle tension d'entrée. Cela a été possible grâce à l'association d'un boost convertter et d'un buck convertter.

1) Redresseur hexaphasé

Le redresseur hexaphasé est un système composé de diodes et d'un condensateur qui permet de transformer une tension hexaphasée en une tension continue. Le modèle Simulink est représenté figure 23.

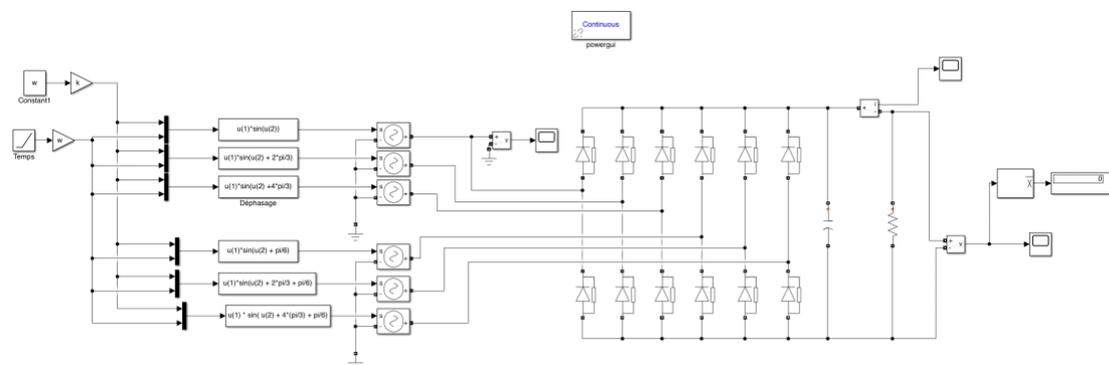


Figure 23 : Schéma Simulink du redresseur hexaphasé

La simulation du modèle est réalisée avec une source hexaphasée d'amplitude 100V et de fréquence 38Hz (qui correspond à celle de l'EMRAX) avec une résistance de 100Ω, une capacité de 100mF et des diodes avec des défauts.

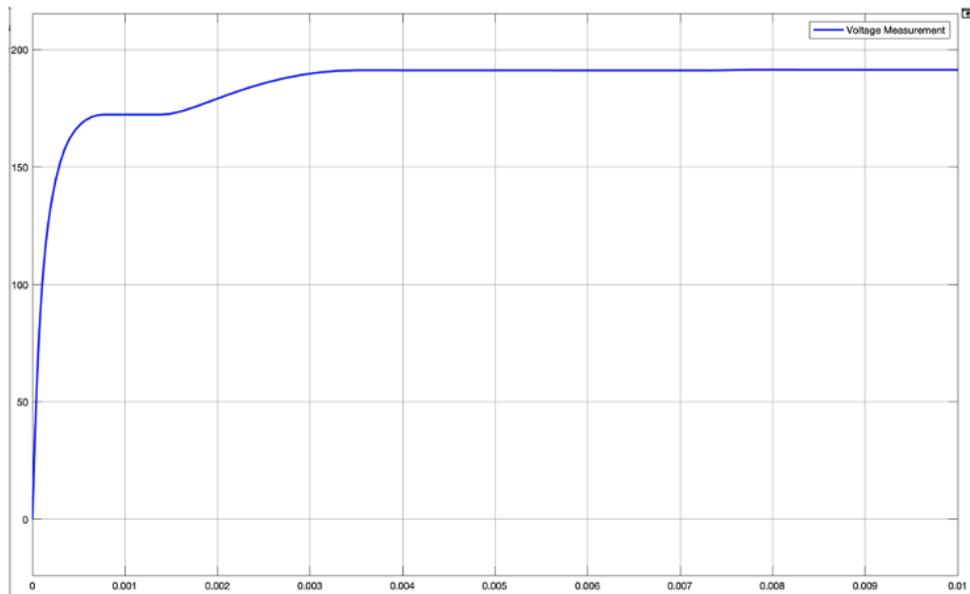


Figure 24 : Tension aux bornes de la résistance (V) en fonction du temps (s)

On note une tension de sortie d'environ 180V. Cette valeur sera ajusté par la suite grâce à un composant d'électronique de puissance.

2) Boost converter

Le boost converter est un composant d'électronique de puissance qui a pour but d'élever la tension d'un circuit continu. Lorsque la période d'ouverture/fermeture du transistor est très faible (i.e fréquence très élevée) les équations différentielles du circuit permettent d'établir la relation suivante entre U_s la tension de sortie et U_e la tension d'entrée : $U_s = U_e / (1-D)$. Il se modélise sous Simulink comme montré figure 25.

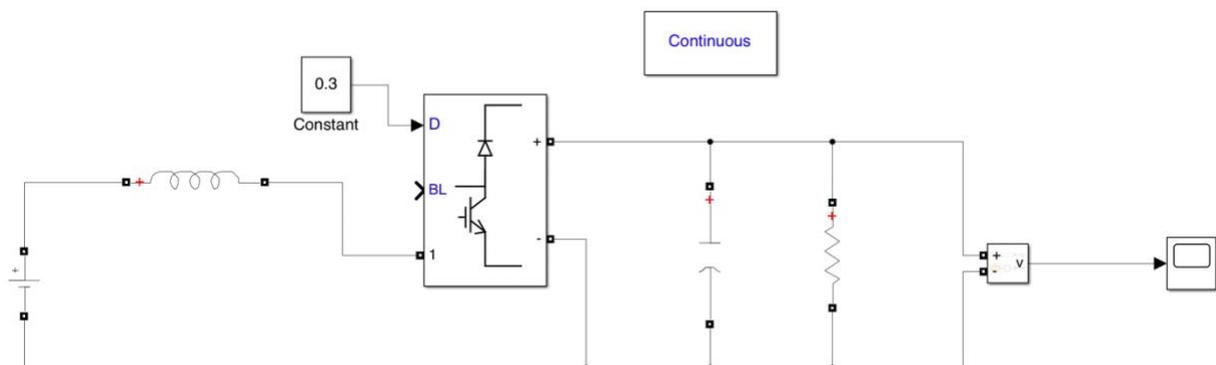


Figure 25 : Modèle Simulink d'un boost converter

Pour vérifier le bon fonctionnement du système, on lance une simulation, ayant pour paramètre $D = 0.3$, $R = 100\Omega$, $L = 1e-4H$, $C = 1e-8F$, et $U_e = 100V$. Le résultat obtenu est la courbe de la tension en sortie du convertier en figure 26.

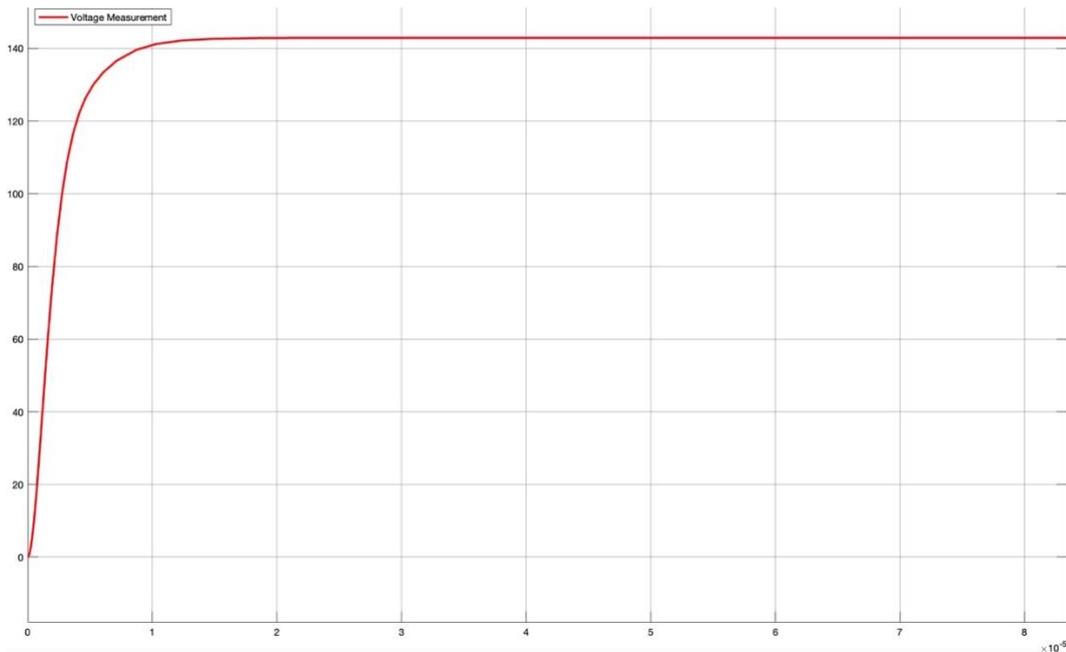


Figure 26 : Tension relevée par le boost converter (V) en fonction du temps (s)

La tension de sortie est de 143V, ce qui correspond bien à $100/0.7$ comme le donne la relation de tension et le temps de montée est de $15 \mu\text{s}$. Le modèle de boost converter est donc validé.

3) Buck Converter

Le buck converter fonctionne sur le même principe que le boost converter mais cette fois-ci celui-ci abaisse la tension du circuit électrique suivant la relation suivante entre U_s la tension de sortie et U_e la tension d'entrée : $U_s = D \cdot U_e$. Il se modélise sous Simulink comme montré figure 27.

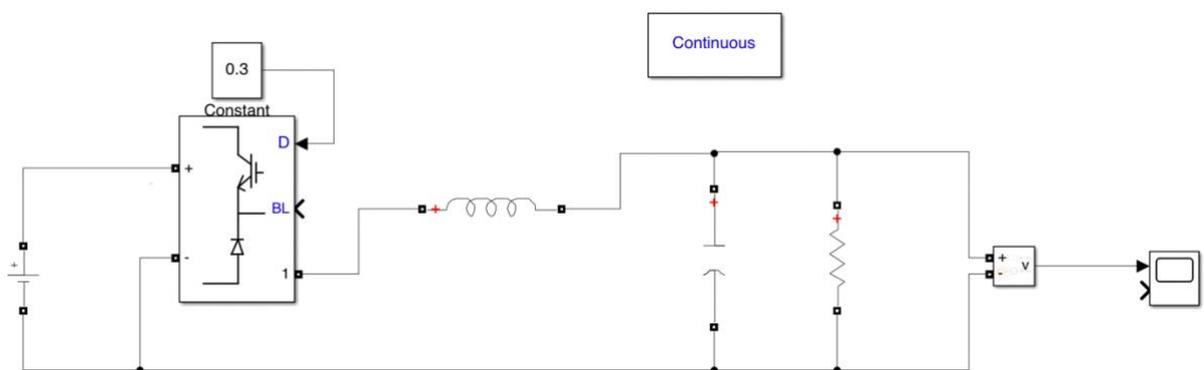


Figure 27 : Modèle Simulink d'un buck converter

Comme précédemment, pour vérifier le bon fonctionnement du système, on lance une simulation, ayant pour paramètre $D = 0.3$, $R = 100\Omega$, $L = 1e-4$, $C = 1e-8$, et $U_e = 100\text{V}$. Le résultat obtenu est la courbe de la tension en sortie du convertisseur en figure 28.

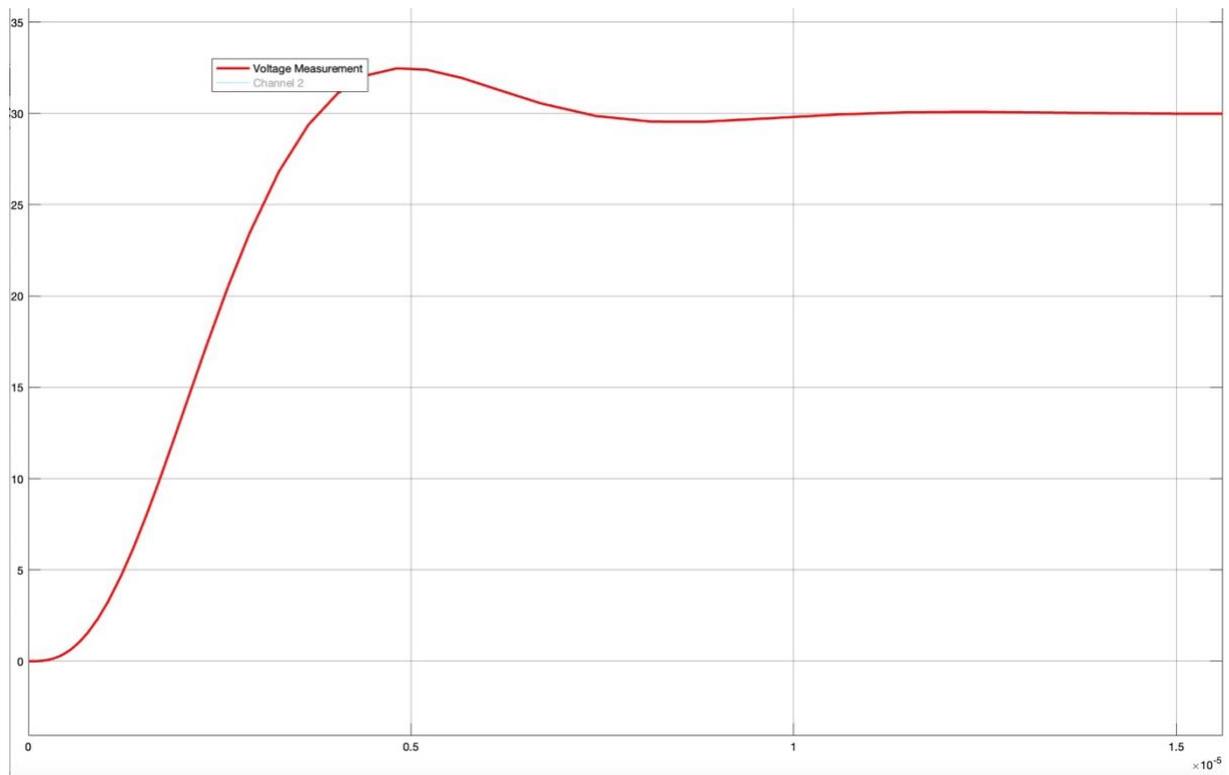


Figure 28 : Tension abaissé par le buck converter (V) en fonction du temps (s)

On mesure une tension de sortie de 30V, ce qui correspond bien à $0.3 \cdot 100$. Le temps de monté du système est semblable au précédent soit 15microsecondes. Le modèle de buck converter est validé.

4) Association du Boost et du Buck converter

Nous avons réalisé un modèle associant boost converter et buck converter, dont le schéma Simulink est donné figure 29.

Le modèle est un peu complexe, il est constitué du boost et du buck converter associé avec des interrupteurs de manière à contrôler lequel des 2 modules est utilisé. Pour savoir lequel est connecté entre l'entrée et la sortie, on compare à 0 la différence entre la tension de consigne que l'on souhaite en sortie et la tension d'entrée. Si la différence est supérieure à 0 alors on a besoin d'augmenter la tension d'entrée et donc on connecte au circuit le boost converter. Inversement si la différence est inférieure à 0 on connecte le buck converter.

Ensuite, le modèle détermine également le paramètre D de tel sorte que la tension sortie soit égale à la tension de consigne. Pour ce faire, le modèle se sert des équations reliant les tensions d'entrées sorties présentées ci-dessus pour les 2 systèmes. Dans le cas du boost converter on a alors $D = 1 - U_e/U_c$ qui est bien compris entre 0 et 1 puisque $0 < U_e < U_c$. Dans le cas du buck converter, on a $D = U_c/U_e$ qui est bien compris entre 0 et 1 puisque $0 < U_c < U_e$.

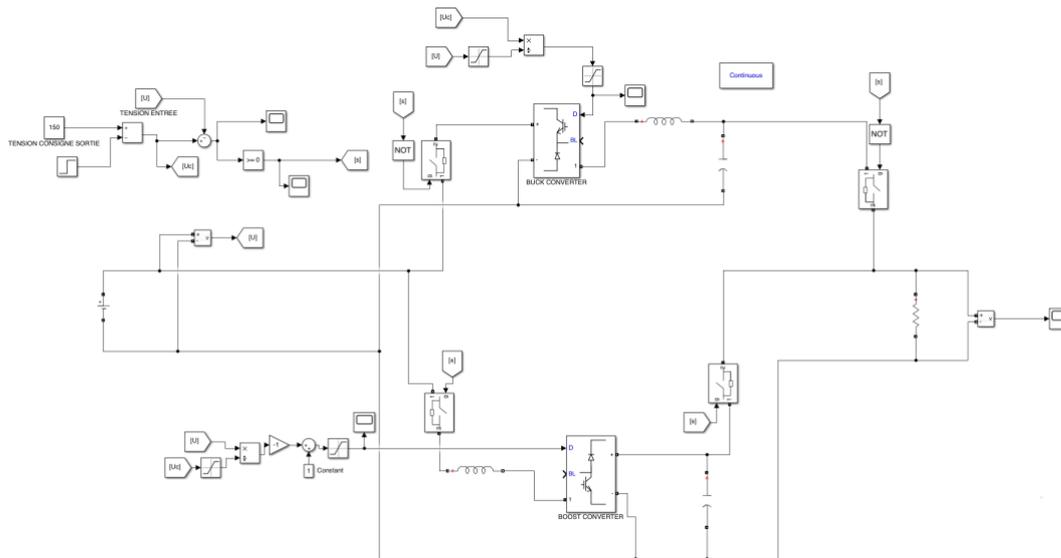


Figure 29 : Schéma Simulink de l'association boost converter et buck converter

Le but d'un tel bloc est de pouvoir moduler une tension d'entrée, pour avoir en sortie soit une tension plus faible soit une tension plus élevée. Nous avons donc soumis ce bloc à une entrée en tension de valeur $U = 100V$, et à une tension de consigne $U_c = 150V$ pendant $1ms$, puis une tension de consigne $U_c = 50V$. La tension mesurée en sortie est donnée figure 30.

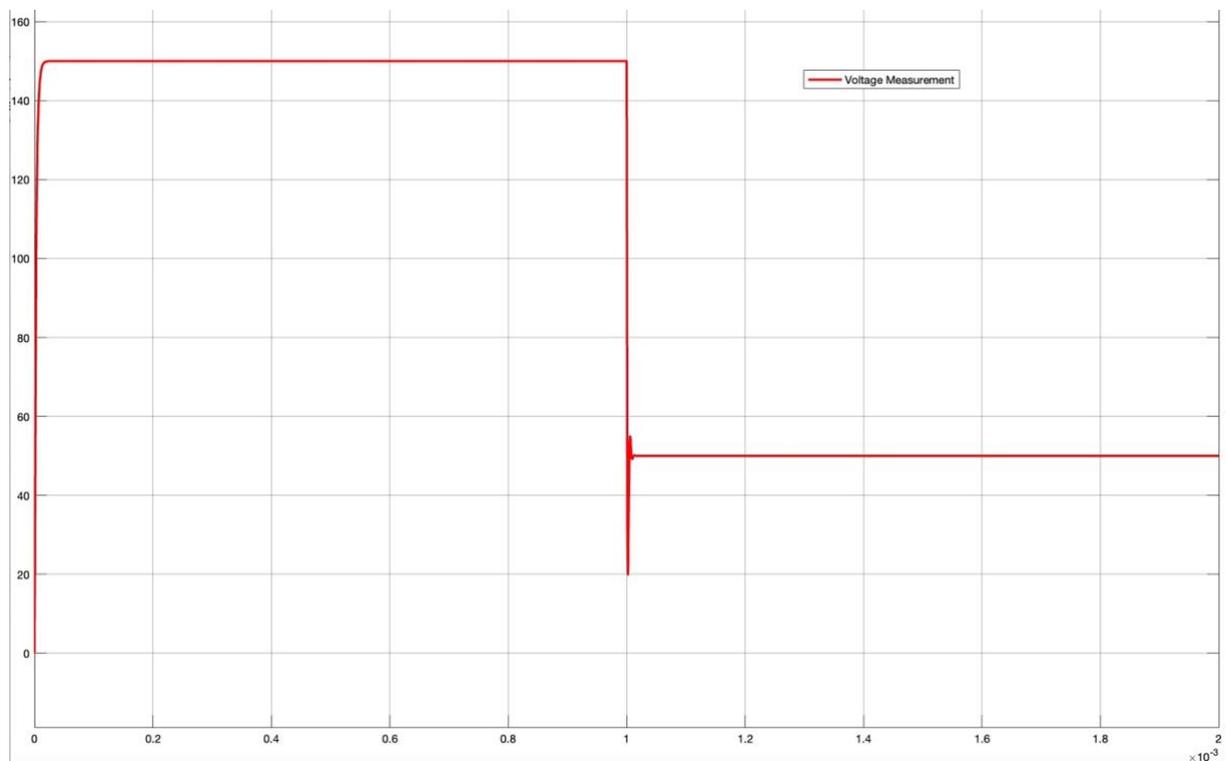


Figure 30 : Tension en sortie du bloc buck converter + boost converter (V) en fonction du temps (s)

Nous remarquons que la tension suit bien la valeur de consigne, qu'elle soit plus élevée ou plus faible que la valeur de tension d'entrée. L'alternance entre les deux composants fonctionne bien, et le bloc est donc fonctionnel. On peut donc obtenir n'importe quelle tension en sortie à partir de n'importe quelle tension d'entrée.

Problème important, le temps de réponse des systèmes buck et boost sont très dépendants de la valeur de la résistance de charge. Il sera donc important pour la suite de bien dimensionner l'inductance et la capacité en fonction de la résistance des moteurs afin d'obtenir les meilleures performances pour notre électronique de puissance.

5) Stockage de puissance

Comme vu dans les schémas des configurations étudiées, le Mini-Bee ne comporte pas de batterie pour stocker de l'électricité, mais à la place un réservoir d'essence qui alimente le ROTAX 915 IS pour des raisons de performance : la densité volumique de puissance des batteries étant plus faible que celle de l'association réservoir d'essence + ROTAX 915 IS, il n'est pas souhaitable d'utiliser des batteries qui alourdiraient bien trop le Mini-Bee, ou diminueraient son autonomie. Nous pouvons malgré tout faire appel à des blocs capables de stocker une partie d'énergie électrique, en plus du réservoir et du ROTAX 915 IS.

Afin de stocker le courant continu en sortie de notre génératrice synchrone, nous pourrions utiliser des supercondensateurs. Il s'agit de condensateurs particuliers qui permettent d'arriver à une densité d'énergie plus faible que celle de batteries, de l'ordre de plusieurs Wh/kg contre plusieurs dizaines de Wh/kg pour les batteries, mais ils disposent d'une bien meilleure densité de puissance, de l'ordre de plusieurs milliers de W/kg contre une centaine de W/kg pour les batteries.

Ils peuvent de plus délivrer une tension et un courant de sortie élevés, et ce plus rapidement qu'une batterie, et c'est pour cette raison que leur utilisation se fait généralement en complément de batteries.

6) Association source triphasée + redresseur + contrôleur de tension

Nous avons alors cherché à associer les différents blocs que nous avons pu développer jusque-là. Nous sommes partis d'une source de tension triphasée, suivie d'un redresseur et d'un contrôleur de tension, comme représenté sur le schéma Simulink figure 31 pour éviter de surcharger la modélisation. Par la suite, nous ajouterons un moteur à courant continu à la place de la résistance puis nous remplacerons la source triphasée par une source hexaphasée avec le redresseur vu précédemment.

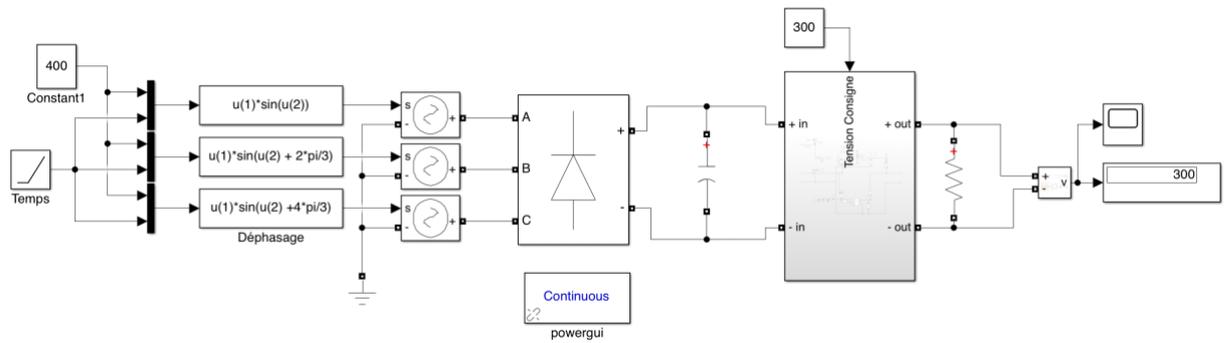


Figure 31 : Schéma Simulink de l'association source triphasée, redresseur et contrôleur de tension

Nous avons alors soumis ce modèle à une tension triphasée d'amplitude $U = 400V$, et à une tension de consigne $U_c = 300V$. Le redresseur permet de rendre la source de tension continue afin de pouvoir alimenter les moteurs, qui sont des moteurs à courant continu. La tension en sortie de notre modèle est donnée figure 32.

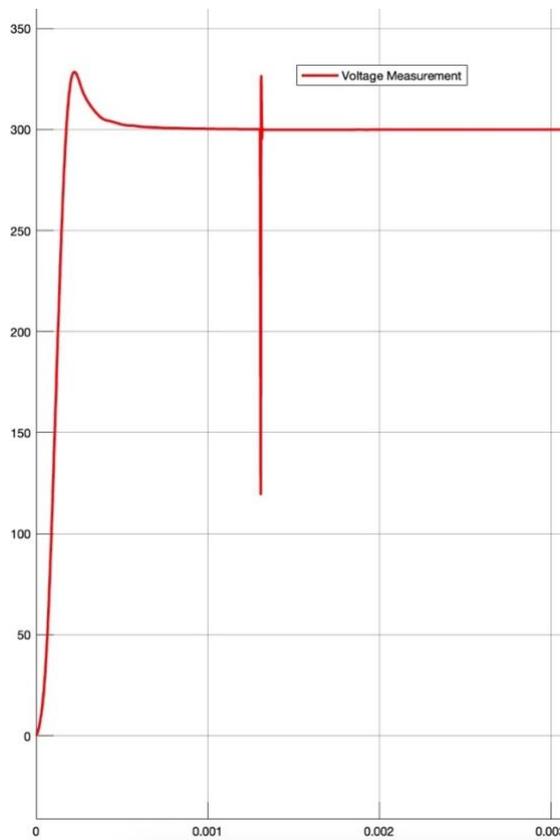


Figure 32: Tension de sortie (V) en fonction du temps (s)

On remarque que la tension obtenue en sortie est bien de 300V. Le système associé au redresseur et à une source de tension triphasée permet de générer n'importe quelle tension continue en sortie du système. Ceci nous permettra de contrôler les moteurs à courant continu.

On remarque néanmoins un changement de tension très abrupte vers 13ms. Ceci est dû au changement de connexion entre le boost et buck convertier. En effet avant 13ms, la tension en sortie du redresseur, donc en entrée du bloc de contrôle de tension, est inférieure à la tension de consigne qui vaut 300V. Donc comme nous l'avons décrit précédemment, c'est le boost convertier qui est

connecté. Or, une fois que la tension d'entrée dépasse la tension de consigne il faut alors utiliser le buck converter pour la réduire. Vu la très faible durée de cette événement, l'inertie plus importante des autres systèmes en aval devrait absorber cette perturbation.

VII – Modélisation de la chaîne de propulsion

Nos briques modèles ayant été créées et testées, nous cherchons alors à les mettre bout à bout afin de former la chaîne de propulsion globale du Mini-Bee. Les configurations présentées au début de ce rapport ont finalement été modifiées par notre client : la première configuration a été abandonnée par manque d'efficacité, et nous nous pencherons donc uniquement sur l'étude de la deuxième configuration. Cette dernière a également évolué : le moteur U12 KV90 a été remplacé par un U13 II KV130, et on note l'ajout d'une carte de contrôle pour commander les moteurs à courant continu sans balais (BLDC), et des hélices en carbone initialement prévues pour le moteur U15 placées sur chaque BLDC.

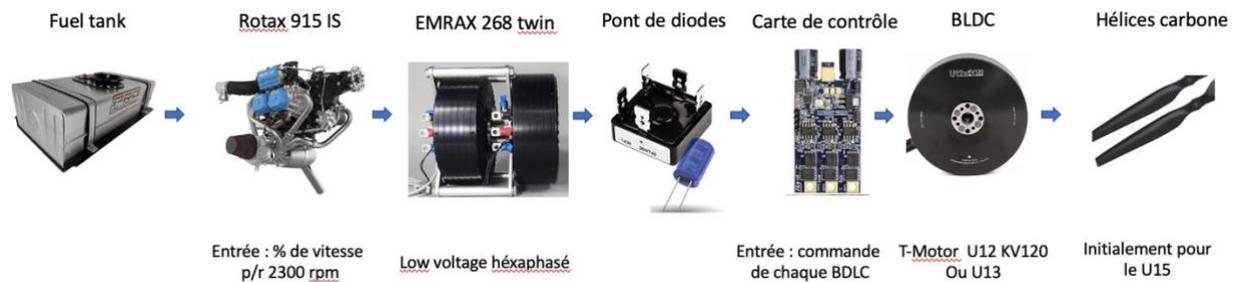


Figure 33 : Schéma de la configuration 2

1) Modélisation des BLDC

Les moteurs à courant continu que nous avons pu modéliser dans la première partie ont été remplacés par des moteurs à courant continu sans balais comme expliqué précédemment. Par conséquent nous avons dû prendre en compte cet aspect et mettre en place une nouvelle modélisation de moteurs.

Nous avons pu récupérer la fiche technique du moteur U13 II KV130 afin d'insérer les bons paramètres dans notre modélisation. Cependant il nous manque de nombreux paramètres : la forme du rotor (saillant ou rond), la forme de la fcm (sinus ou trapèze), l'inductance des armatures, la constante propre du moteur (flux linkage, voltage constant ou torque constant), l'inertie, le nombre de paires de pôles, le coefficient visqueux, et le couple sec.

Type	Voltage (V)	Propeller	Throttle	Thrust (g)	Torque (N*m)	Current (A)	RPM	Power (W)	Efficiency (g/W)	Operating Temperature (°C)
U13 II KV130	48	T-MOTOR G32*11" CF	50%	7700	3.1	20.40	2612	979	7.86	132 (Ambient Temperature: 24°C)
			55%	10000	4	30.80	3000	1478	6.76	
			60%	11500	4.7	38.40	3215	1843	6.24	
			65%	13500	5.5	46.70	3428	2242	6.02	
			75%	16700	6.9	65.40	3832	3139	5.32	
			85%	19700	8.1	83.70	4164	4018	4.9	
			100%	24300	10	117.90	4609	5659	4.29	

Figure 34 : fiche technique du moteur U13 II KV130

Nous avons alors dans un premier temps réalisé un modèle de BLDC qui prend en compte les paramètres par défaut de Simulink (sauf pour la résistance interne).

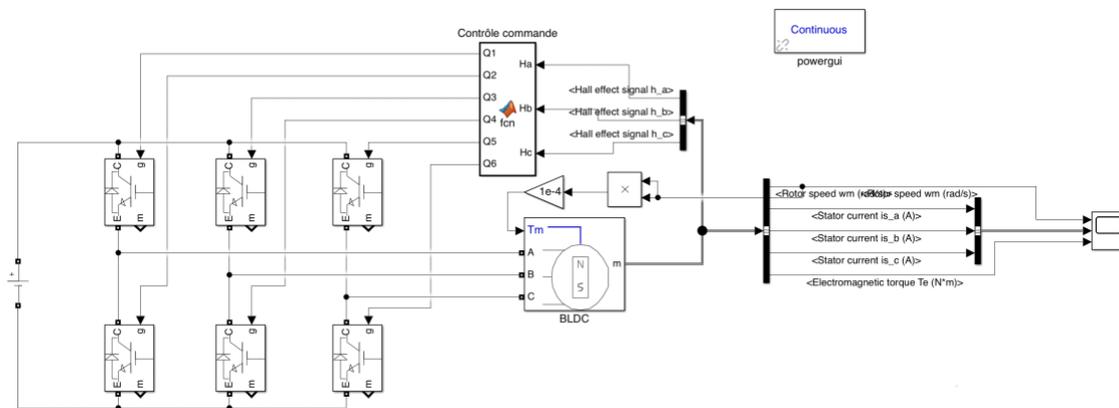


Figure 35 : Schéma Simulink du BLDC

Il faudra alors reproduire la simulation une fois les paramètres du moteur choisis intégrés. Avec une alimentation tension continue 100V et la commande du BLDC fait avec un capteur à effet Hall nous obtenons les résultats suivants :

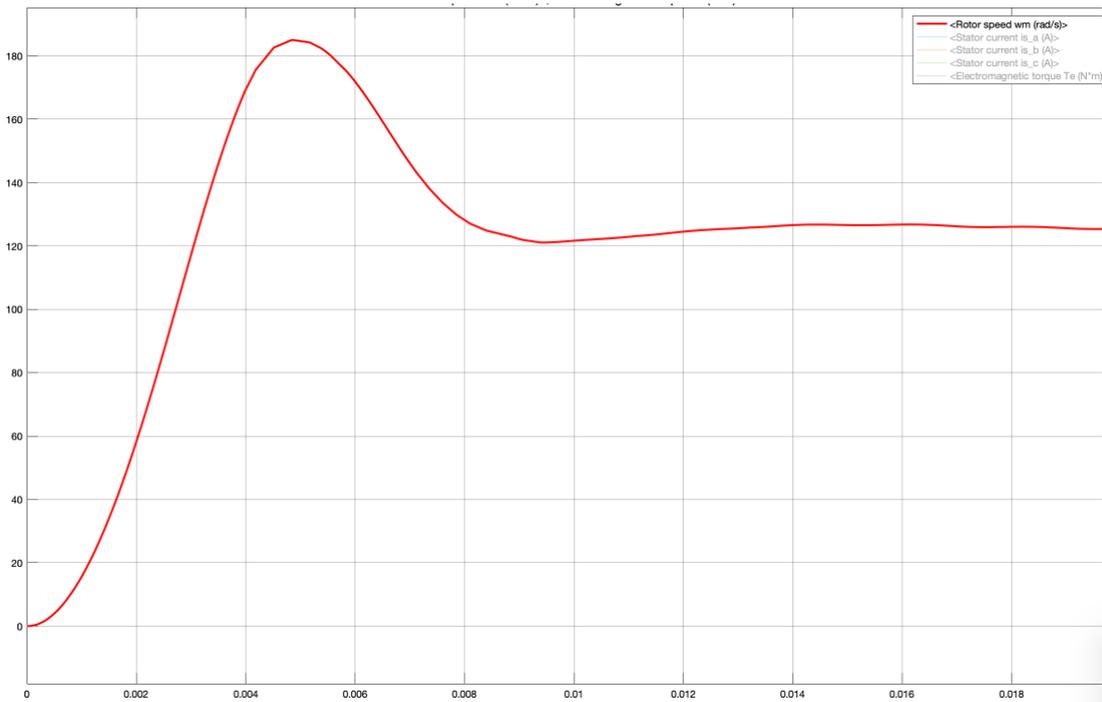


Figure 36 : Vitesse de rotation du rotor ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$) en fonction du temps (s)

On remarque que la vitesse de rotation finale est de l'ordre de $125 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, qui est trop faible par rapport à ce que l'on attend. Ceci est dû au fait qu'on a gardé les paramètres par défaut de Simulink et nous conforte dans l'idée de reproduire les simulations une fois les paramètres de moteur récupérés.

2) Machine synchrone génératrice hexaphasée EMRAX 268

L'EMRAX 268 dans la configuration 2 choisie par notre client agit comme une machine synchrone génératrice et a été modifié afin de délivrer une tension hexaphasée. On peut lui donner en entrée une vitesse de rotation, qui correspond à la vitesse de rotation du ROTAX.

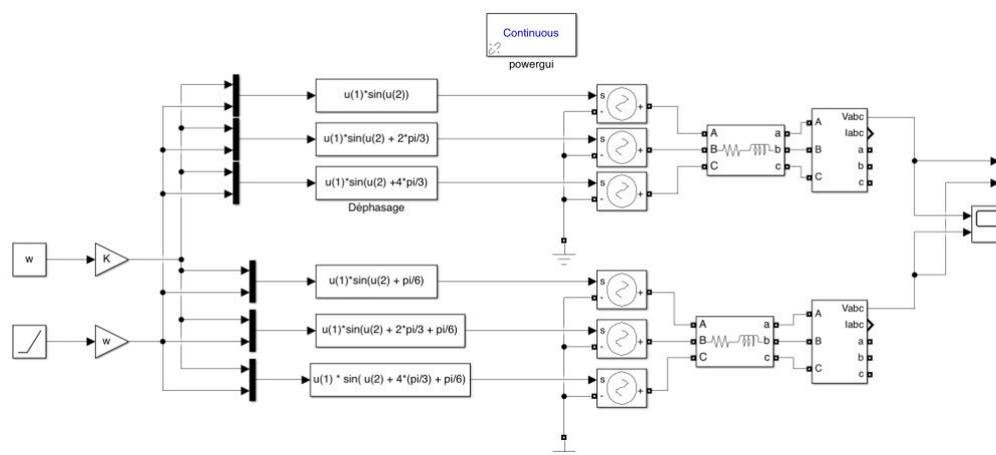


Figure 37 : Schéma Simulink de l'EMRAX 268

Nous choisissons spécifiquement de lui donner en entrée un pourcentage de vitesse du ROTAX, entre 50% et 100% de la vitesse maximale qui est de 2300 RPM. On obtient alors les résultats suivants :

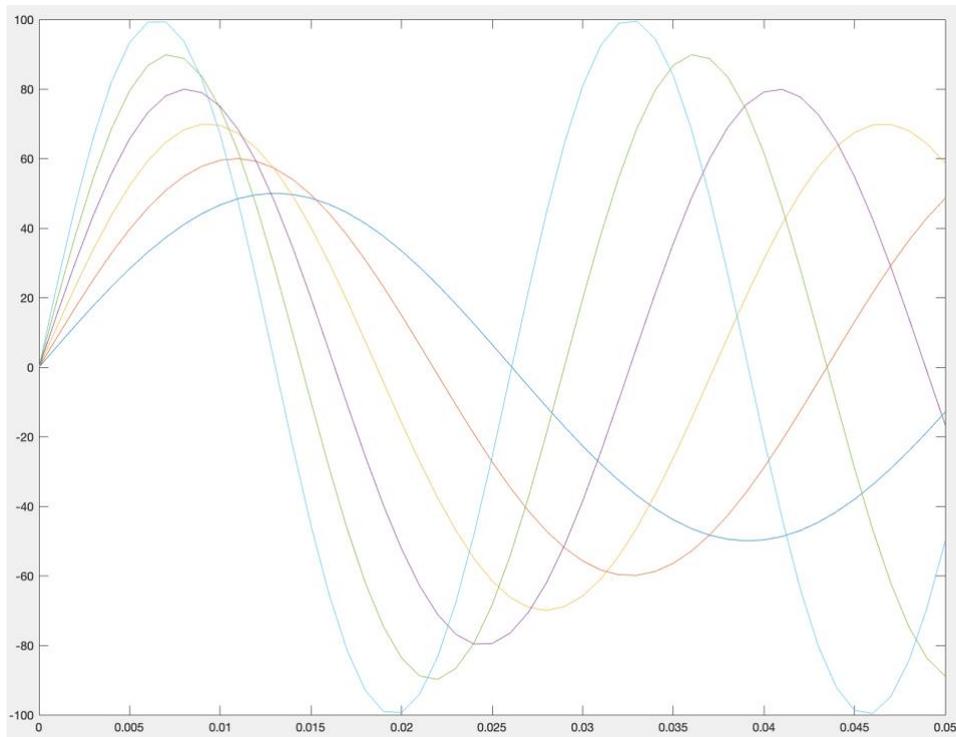


Figure 38 : Tension en sortie de l'EMRAX 268 (V) en fonction du temps (s) pour différentes vitesses de rotation d'entrée

On remarque que la fréquence des tensions de sortie varie car elle dépend de la vitesse de rotation de l'arbre. La tension diminue proportionnellement à la vitesse de rotation.

On va par la suite placer le redresseur hexaphasé en sortie de l'EMRAX 268 afin d'obtenir une tension continue. Pour une vitesse de rotation du ROTAX de 2300 RPM, une capacité $C = 0.1$ F et une résistance $R = 1000\Omega$, on obtient les résultats suivants :

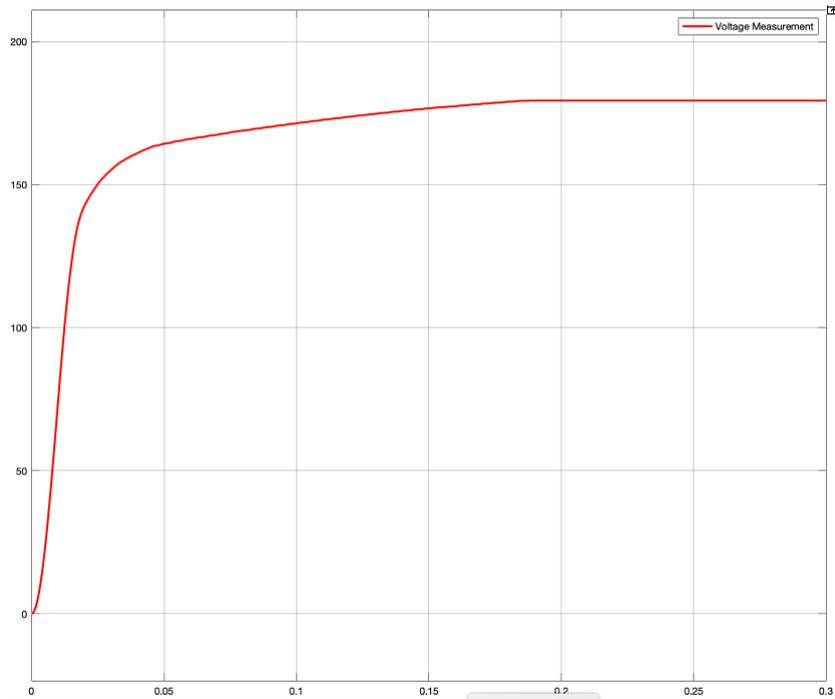


Figure 39 : Tension (V) mesurée en sortie du redresseur en fonction du temps (s)

On obtient assez en 0.2s une tension constante en sortie du redresseur qui va venir alimenter les moteurs BLDC. De plus les valeurs de C et R peuvent être optimisées.

3) EMRAX 268 + redresseur + 9 paires de U13 II KV130

Nous modélisons ici la chaîne de propulsion composée de l'EMRAX 268, du redresseur et de 9 paires de moteurs U13 II KV130 à partir des briques précédentes. Nous nous limitons ici à 9 paires pour avoir un temps de simulation raisonnable. Le schéma Simulink est alors le suivant :

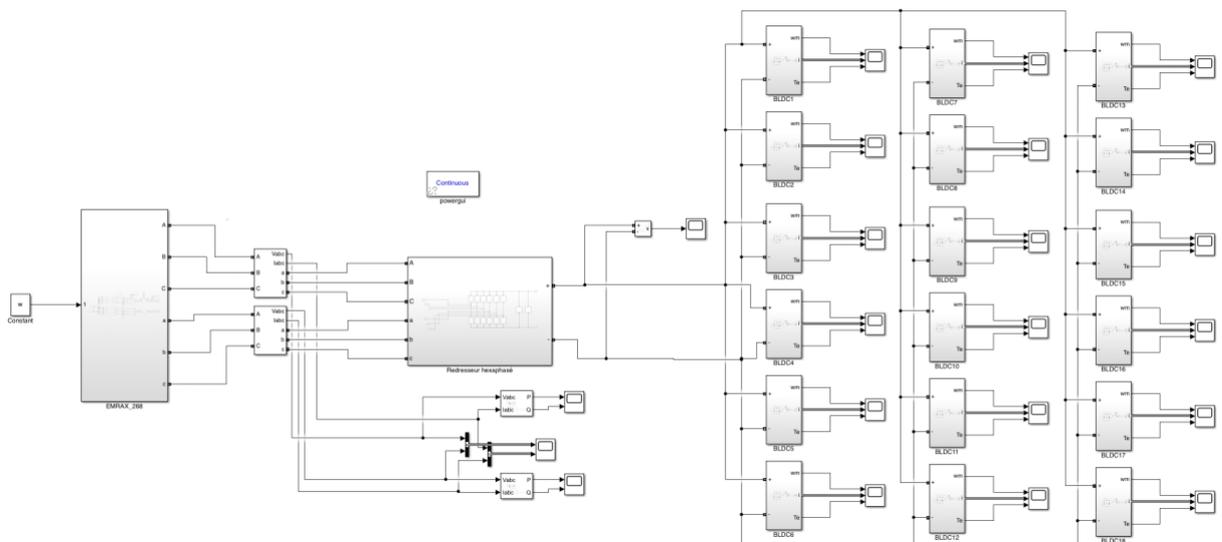


Figure 40 : Schéma Simulink de la chaîne globale

On soumet notre chaîne à une vitesse de rotation du ROTAX maximale, soit 2300 RPM. La tension qui alimente les BLDC est mesurée :

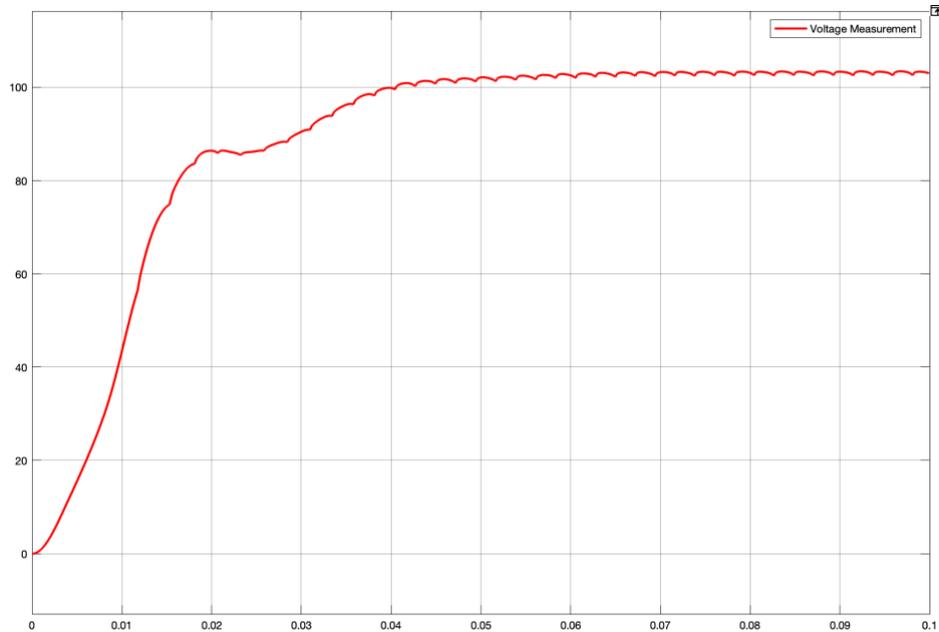


Figure 41 : Tension (V) d'alimentation des BLDC en fonction du temps (s)

Nous pouvons alors nous pencher sur la vitesse de rotation des différents BLDC :

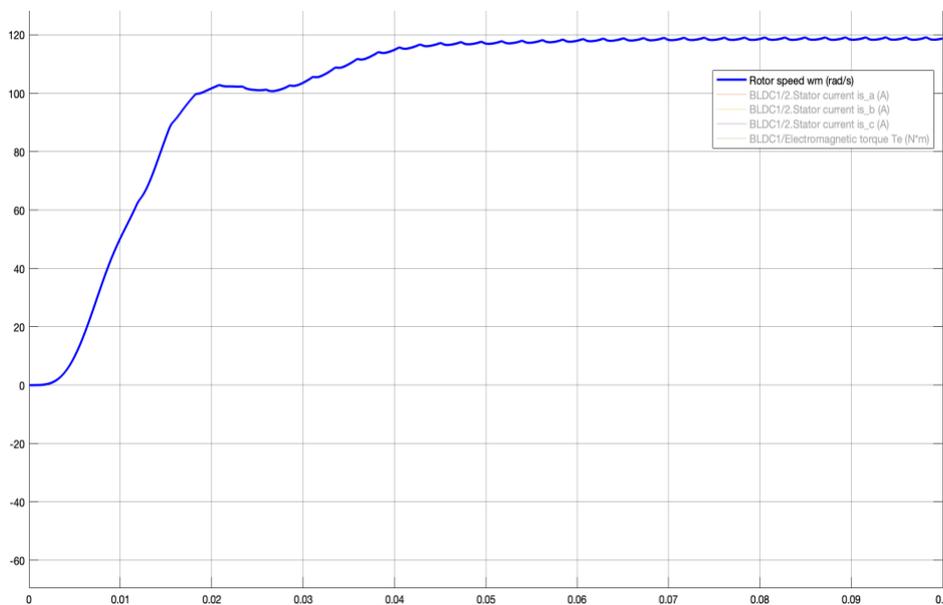


Figure 42 : Vitesse de rotation ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$) d'un BLDC en fonction du temps (s)

On remarque que la vitesse du BLDC atteint $120 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ soit 1145tr/min. Cette valeur ne correspond pas à la vitesse de rotation souhaitée car les paramètres de notre moteur ne sont pas ceux qui correspondent aux moteurs réels. On remarque de plus de fortes oscillations dans la valeur de la

tension d'alimentation des BLDC et de la vitesse de rotation des BLDC, ce qui est dû à une valeur de capacité du supercondensateur trop faible.

4) Amélioration de la chaîne globale

Pour résoudre le problème du manque de données, nous avons déterminé une relation entre la poussée (thrust) et la vitesse de rotation, et entre le couple (torque) et l'intensité du courant à partir de la fiche technique du moteur U13 II KV130 :

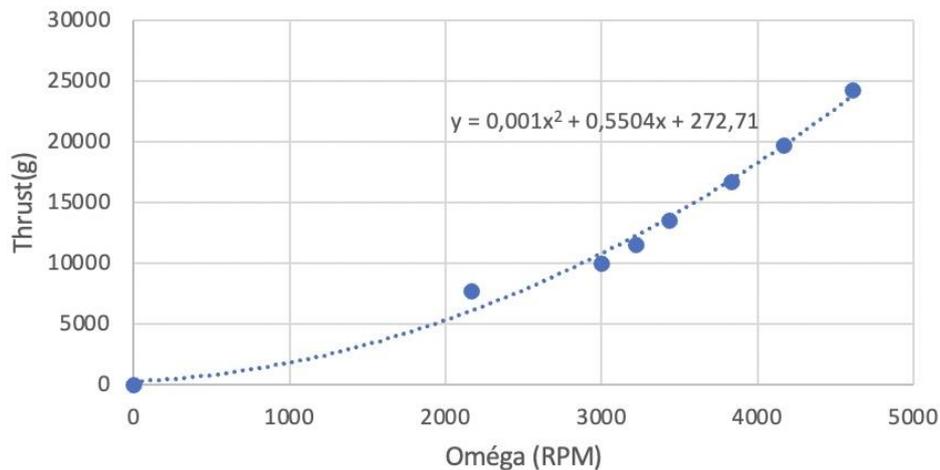


Figure 43 : Relation entre Thrust (g) et la vitesse de rotation (RPM)

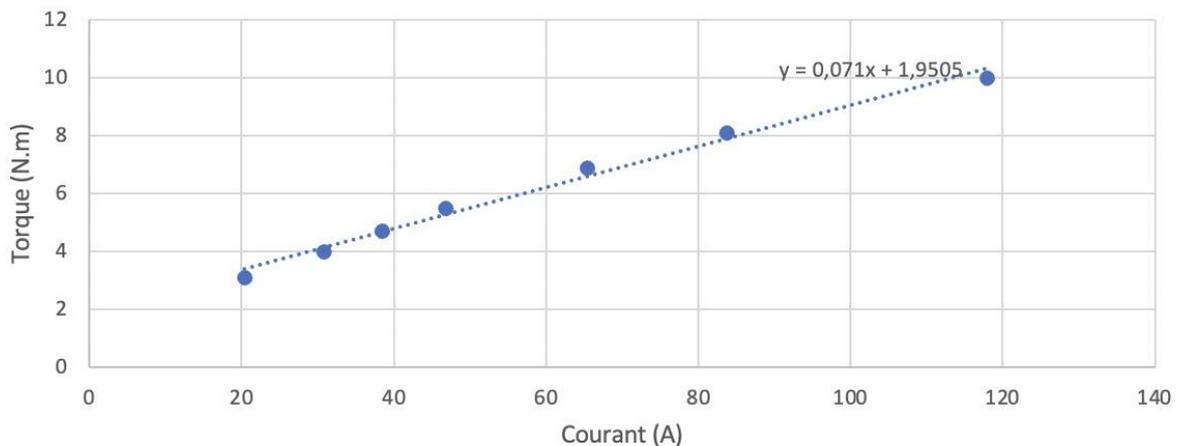


Figure 44 : Relation entre Torque (N.m) et l'intensité (A)

Nous trouvons ainsi une dépendance quadratique de la poussée avec la vitesse de rotation, et une dépendance linéaire du couple avec l'intensité du courant.

Nous pouvons désormais utiliser ces relations dans notre modélisation. Nous considérons alors en entrée la vitesse de rotation du ROTAX $\omega_R = 2300$ RPM, nous gardons le fait que les moteurs soient mis par paires, et nous considérons que le Mini-Bee est déjà en vol, les condensateurs sont donc non vides et les moteurs sont déjà en rotation. Nous pouvons dans un premier temps mesurer la tension et l'intensité en sortie du redresseur, qui alimenteront nos moteurs BLDC.

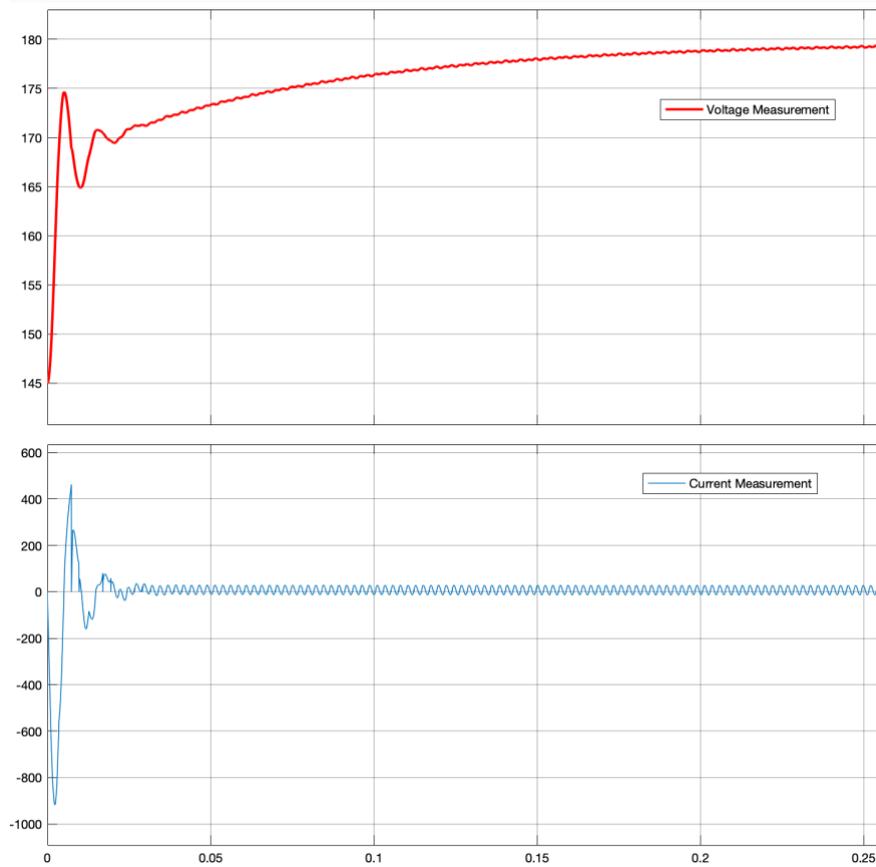


Figure 45 : Mesure de la tension (V) et de l'intensité (A) en sortie du redresseur

En ce qui concerne le comportement des moteurs :

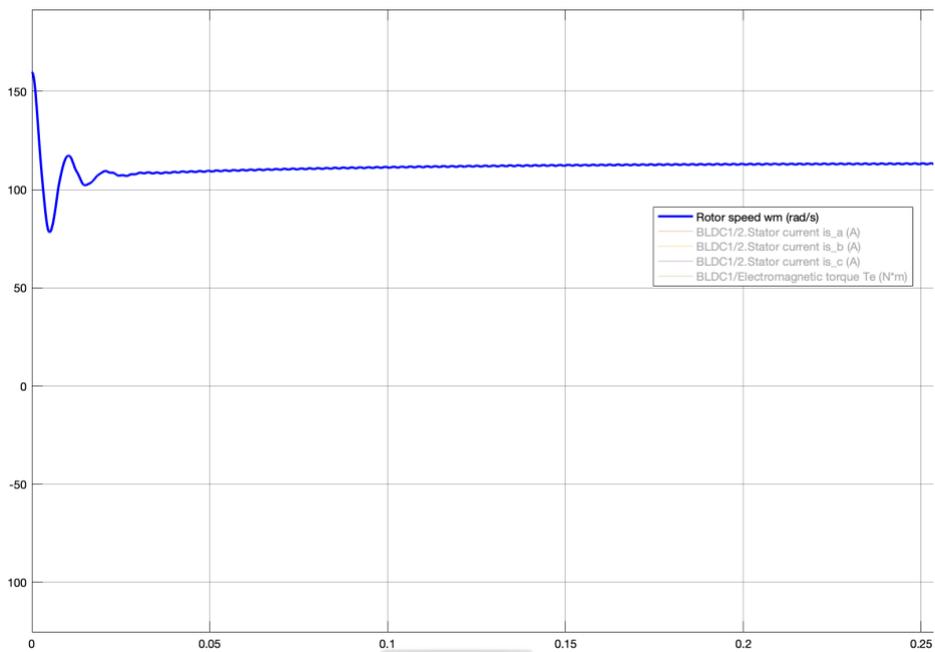


Figure 46 : Vitesse de rotation (rad.s-1) d'un BLDC en fonction du temps (s)

En utilisant la relation trouvée empiriquement, nous pouvons en déduire la poussée totale fournie par la chaîne de propulsion :

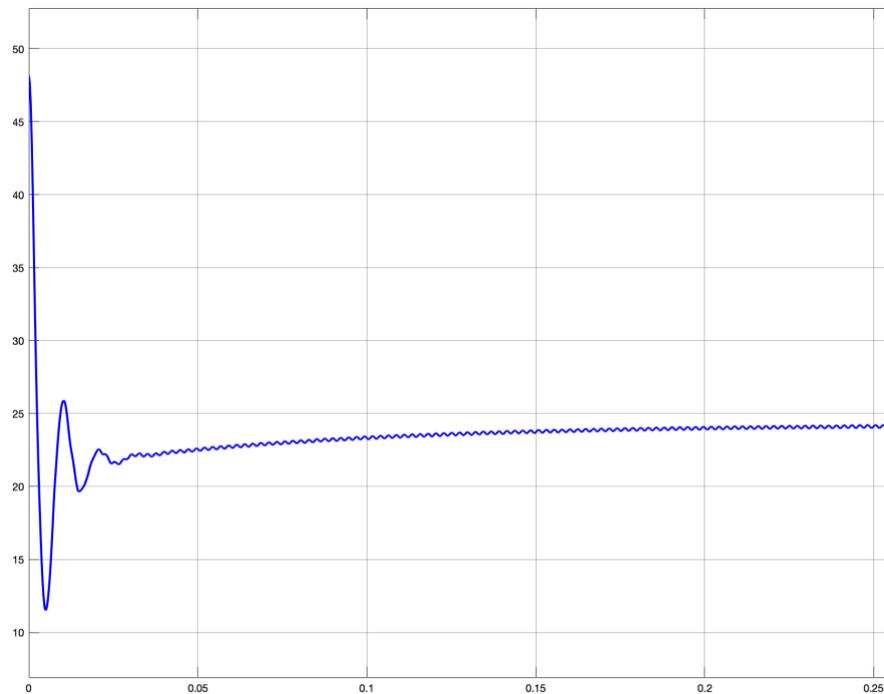


Figure 47 : Poussée totale (kg) fournie par la chaîne de propulsion en fonction du temps (s)

Ces résultats sont problématiques, car la poussée fournie est bien trop faible (de l'ordre de 25 kg, contre 750 attendus par notre client). Nous avons donc une erreur de facteur 30 à équilibrer. Nous avons identifié une première source d'erreur : nous considérons 9 paires de BLDC, soit 18 moteurs, là où le Mini-Bee en fait intervenir 36. Nous doublons donc notre poussée en considérant le double des moteurs, donc la poussée à obtenir dans notre modélisation est de 375kg, et l'erreur à corriger est de facteur 15.

Nous avons identifié un autre problème : la vitesse de rotation atteinte par les BLDC est trop faible (125 rad.s^{-1}) et ne correspond pas à la vitesse de rotation obtenue pour des U13 II KV130 car nous n'avons pas les paramètres de ce moteur. La poussée étant directement liée à la vitesse de rotation des BLDC, il nous faudra intégrer les paramètres des U13 II KV130 dans la modélisation.

Enfin nous observons des fortes oscillations de la poussée qui semblent étonnantes, après discussion avec notre client nous allons augmenter la valeur de notre supercondensateur d'un facteur 4.

5) Schéma équivalent

La modélisation précédente comportait 3 principaux problèmes : la faible valeur de capacité du supercondensateur, le manque de données techniques du U13 II KV130, et le temps de simulation trop élevé (10 min pour 1s de simulation alors que nous souhaitons réaliser des simulations de plusieurs minutes).

Après avoir augmenté la valeur de capacité nous avons cherché à réaliser un schéma équivalent afin de remplacer les moteurs, qui contribuent au temps de simulation élevé, par des résistances : à partir du tableau de données figure 34, nous déduisons la gamme de résistance pour chaque moteur à partir de la caractéristique U/I : $0.4\Omega < R < 2.4\Omega$.

A chaque courant I est alors associée une valeur de poussée pour les 2 moteurs, basée sur le tableau figure 34.

La chaîne globale est alors la suivante :

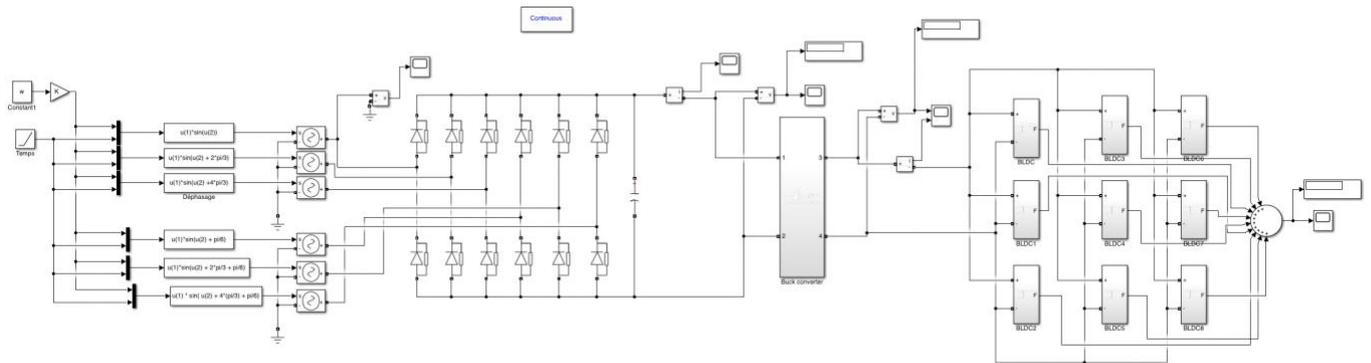


Figure 48 : schéma équivalent de la chaîne globale

Et les BLDC ont pour schéma équivalent :

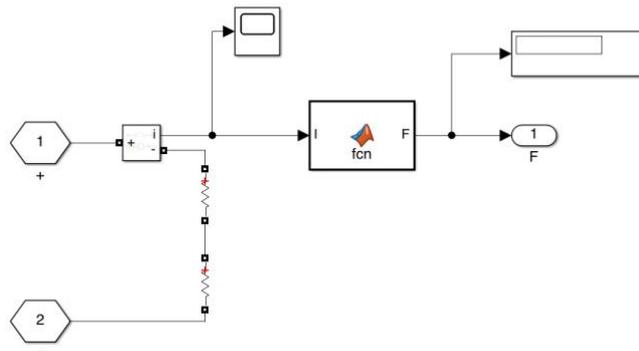


Figure 49 : schéma équivalent d'un BLDC

On peut alors soumettre la chaîne à une entrée en tension hexaphasée $U = 100V$, $f = 38.33Hz$, $C = 100F$ et $R = 44m\Omega$ et obtenir la tension suivante en sortie :

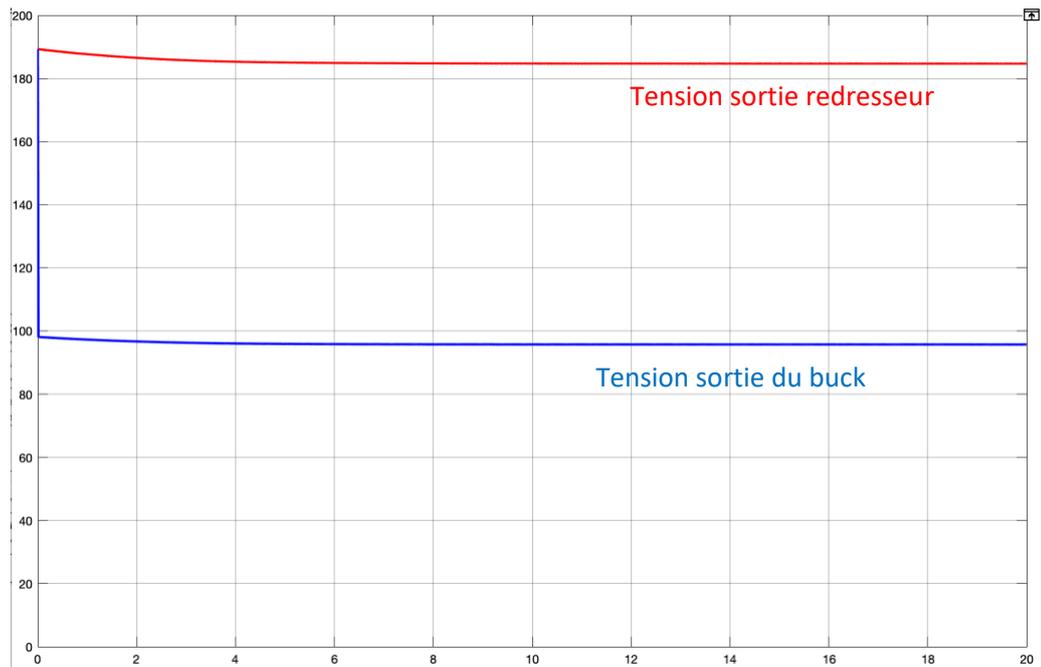


Figure 50 : Tension (V) d'alimentation des BLDC en fonction du temps (s)

La tension en rouge, obtenue en sortie du redresseur a une valeur finale de 176V, trop élevée pour alimenter les BLDC. Nous ajoutons alors un buck convertier après le redresseur afin de diminuer la valeur de la tension à 98V, en prenant $L_{\text{buck}} = 0.1\text{mH}$ et $C_{\text{buck}} = 10\text{nF}$. On remarque de plus que le temps de réponse est de l'ordre de la seconde, ce qui ne pose pas de problème étant donné les temps de réaction que notre système demande.

On peut alors déterminer la poussée obtenue par la chaîne de propulsion :

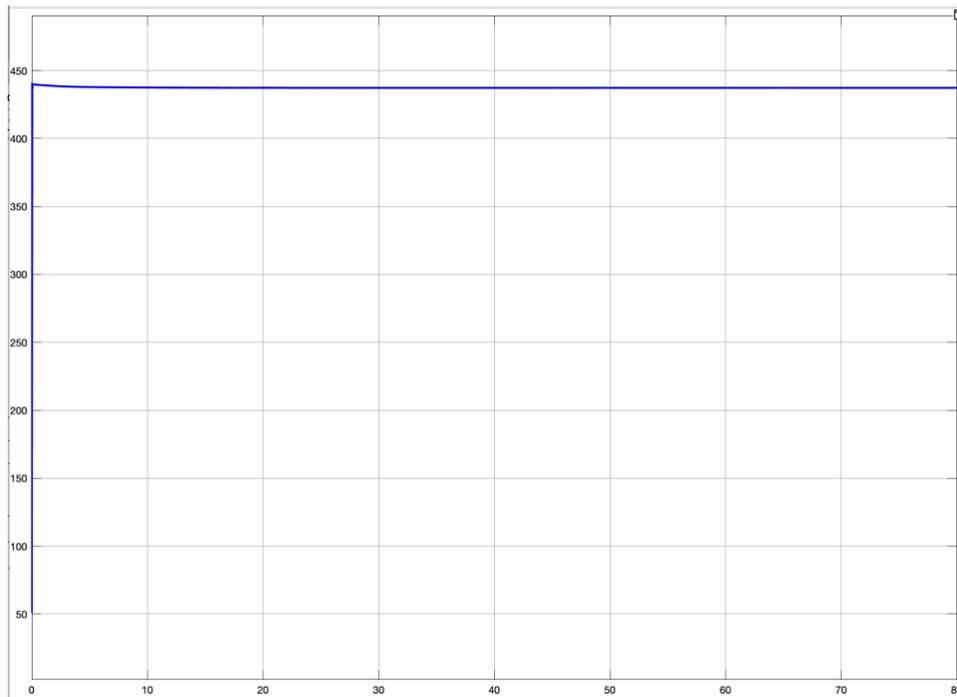


Figure 51 : Poussée (kg) en fonction de temps

La valeur finale de la poussée est de 435kg, ce qui est supérieur à $750/2 = 375\text{kg}$. Le Mini-Bee peut donc décoller et voler.

VIII – Tests de scénarii de vol

Afin de tester la pertinence de notre modèle, nous allons le soumettre à différents scénarii de vols, qui nous permettront de déceler d'éventuels problèmes, ou alors de valider le comportement du Mini-Bee.

1) Arrêt d'une paire de moteurs

Nous considérons que le Mini-Bee est en vol (condensateur non vide et rotation des moteurs), et on arrête une paire de moteurs au bout de 1.5s :

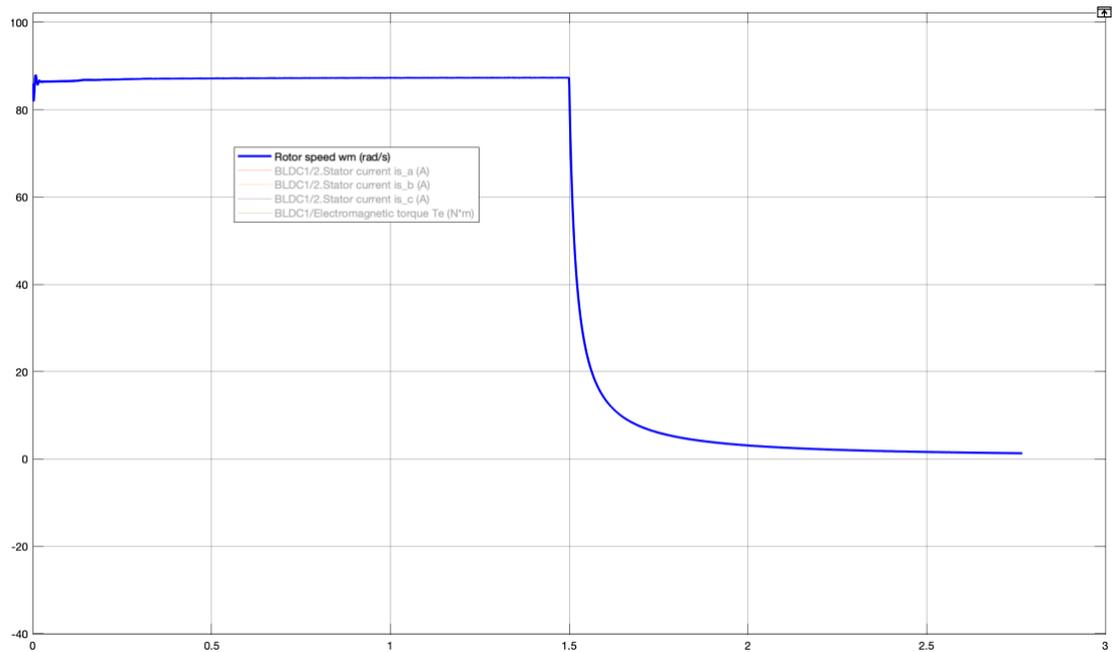


Figure 52 : Vitesse de rotation ($\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$) de la paire de moteur affectée en fonction du temps (s)

Comme attendu, on observe une décroissance rapide de la vitesse de rotation de la paire de moteurs. On peut alors observer l'influence de cet arrêt sur la tension et sur l'intensité mesurées en sortie du redresseur :

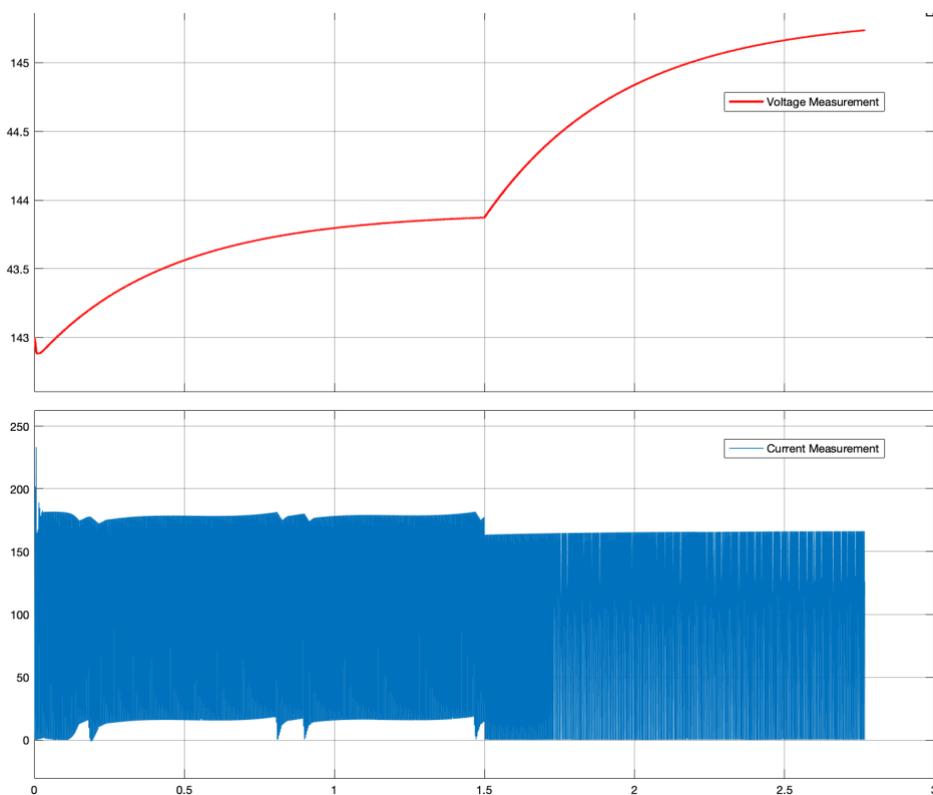
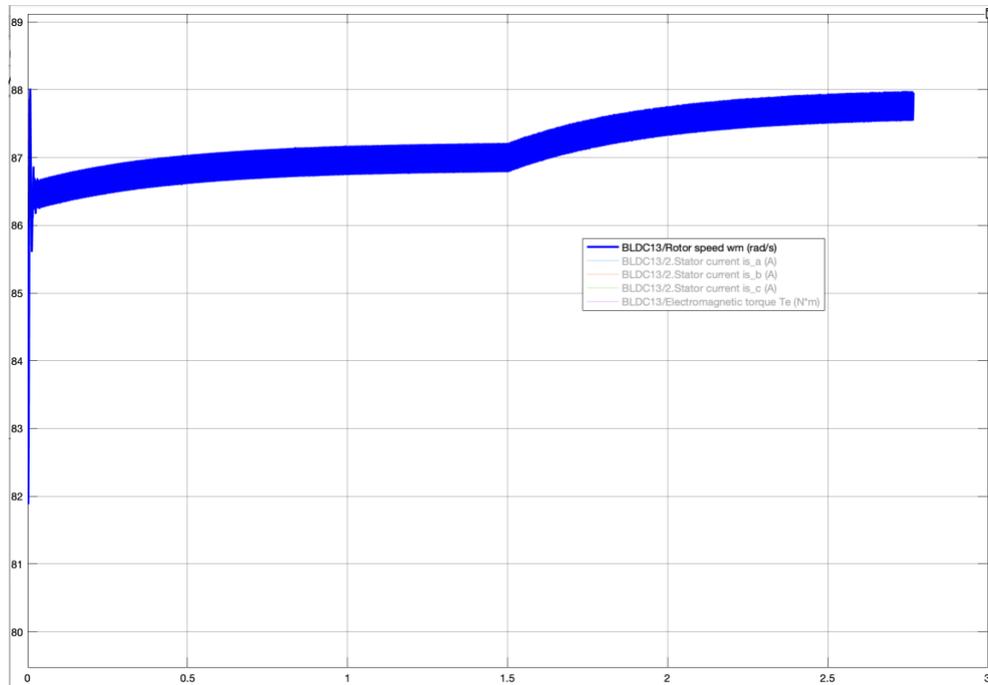


Figure 53 : Mesure de la tension (V) et de l'intensité (A) en sortie du redresseur

On remarque une augmentation de la tension sur le bus. L'intensité est oscillante à cause de la faible valeur de capacité du supercondensateur.

La réponse des autres BLDC est alors différente :



On remarque que la vitesse des autres moteurs augmente mais pas suffisamment pour contrer l'arrêt de la paire. On remarque de plus de fortes oscillations, qui sont probablement dues à une valeur trop faible de supercondensateur, nous allons monter la valeur du condensateur jusqu'à 500F.

On peut finalement observer l'évolution de la poussée pour ce scénario :

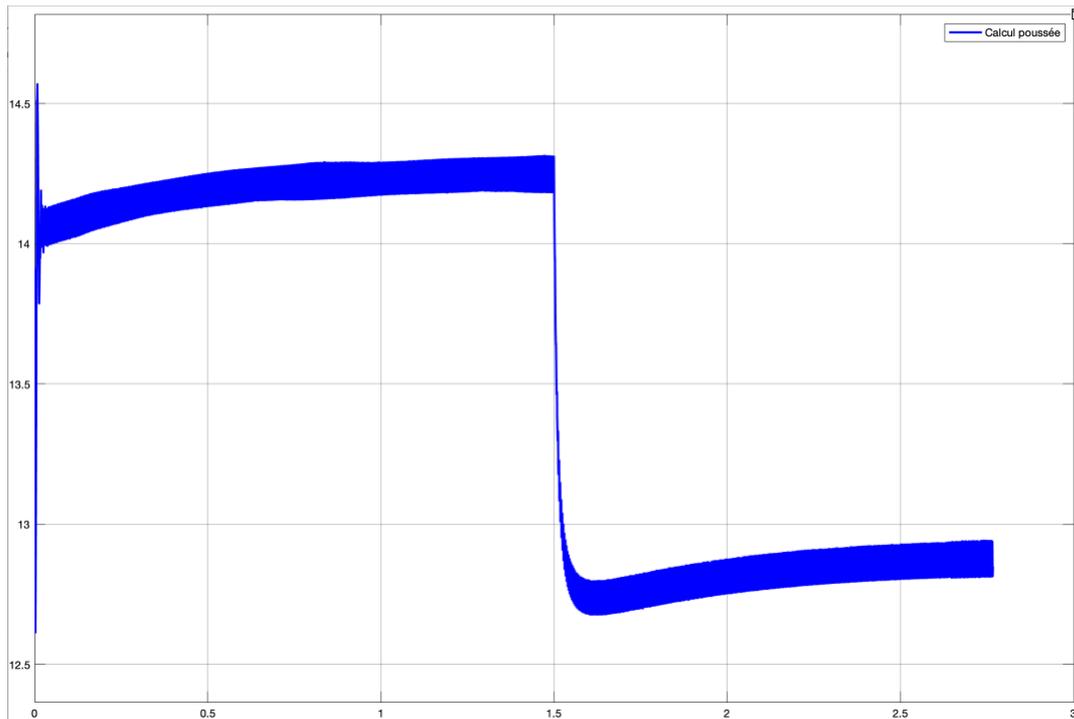


Figure 55 : Poussée (kg) en fonction du temps (s)

On observe une chute de la poussée après 1,5s ce qui est cohérent au vu des observations précédentes. La valeur initiale de poussée est toujours bien trop faible. La poussée – comme la vitesse de rotation – oscille fortement.

2) Scenario décollage

Le deuxième scenario que nous souhaitons tester après discussion avec le client est le suivant :

- Démarrage : phase de chauffe du moteur (huile, 7min) et charge du super condensateur. Les hélices sont au ralenti.
- Décollage (3min) vitesse de rotation : 100% du ROTAX
- Stabilisation (3min) vitesse de rotation : 80% du ROTAX
- Arrêt 1 paire hélice (2min) vitesse de rotation : 80% du ROTAX
- Accélération des autres paires (2min) : vitesse de rotation : 85% du ROTAX, toujours avec 1 paire arrêtée

L'entrée est donc la suivante :

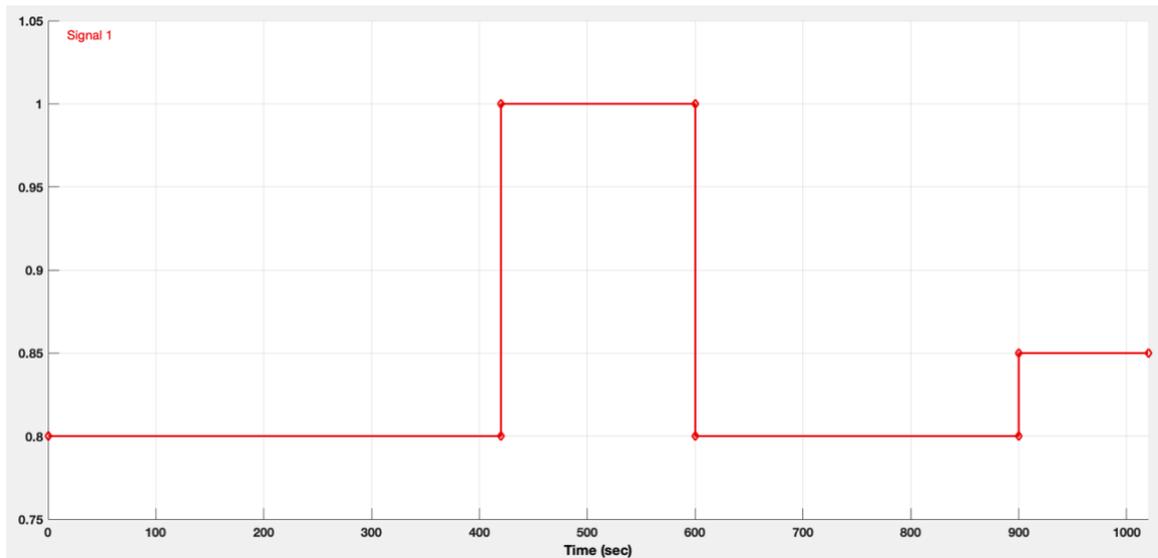


Figure 56 : Vitesse de rotation (%) en fonction du temps (s)

On peut alors regarder les valeurs de tension et d'intensité obtenues en sortie du redresseur :

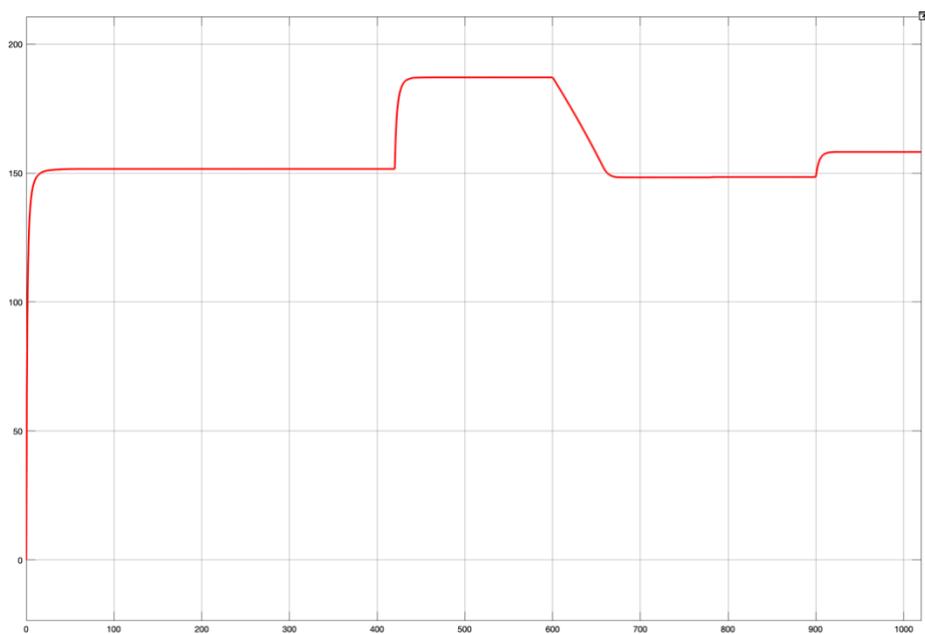


Figure 57 : Tension (V) en sortie du redresseur en fonction du temps (s)

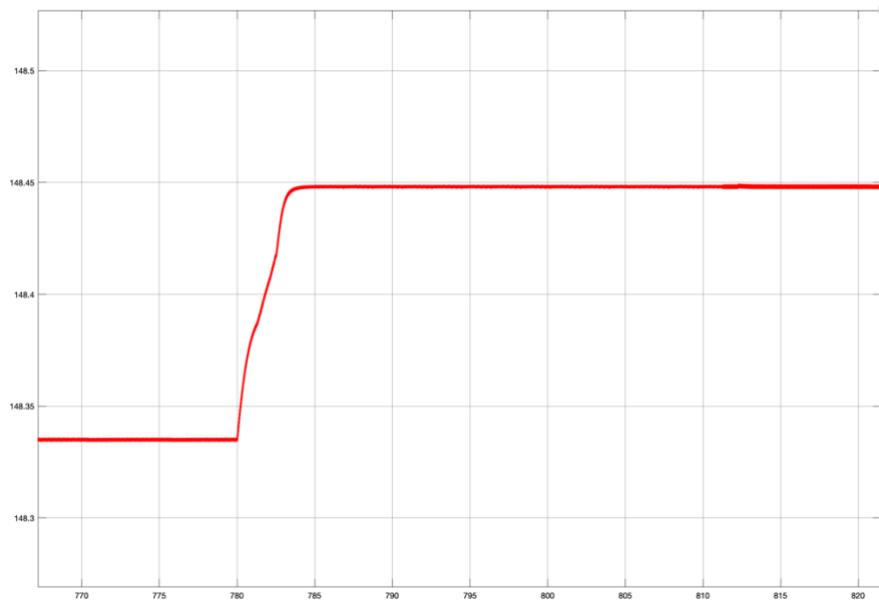


Figure 58 : Zoom sur la variation de tension (V) en sortie du redresseur au moment de l'arrêt du moteur en fonction du temps (s)

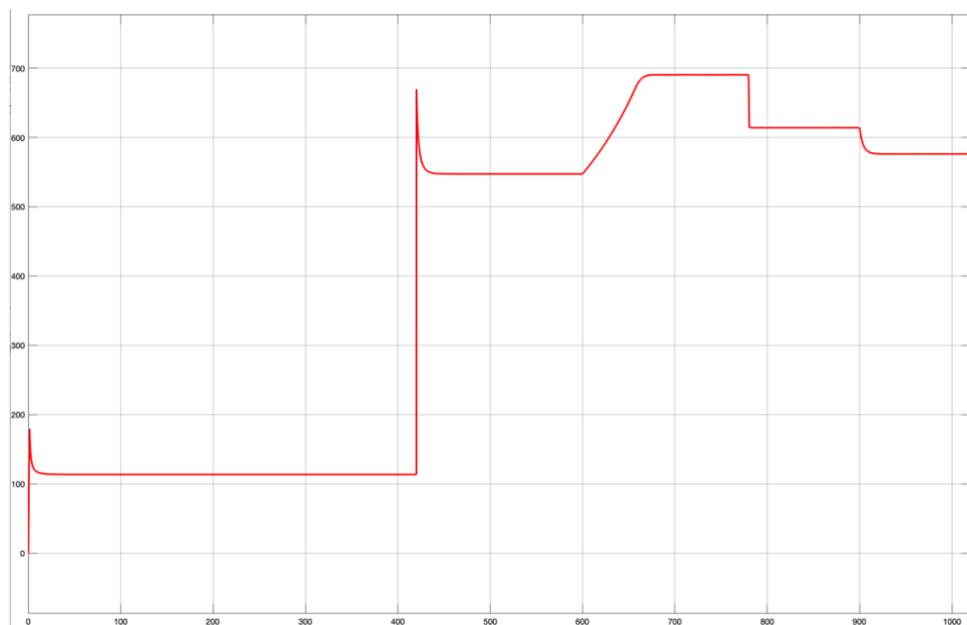


Figure 59 : Courant (A) en sortie du redresseur en fonction du temps (s)

La tension prend des valeurs trop élevées par moments, et nous devons alors utiliser un buck converter afin de l'abaisser, ce qui nous permet d'obtenir les tensions et intensité suivantes :

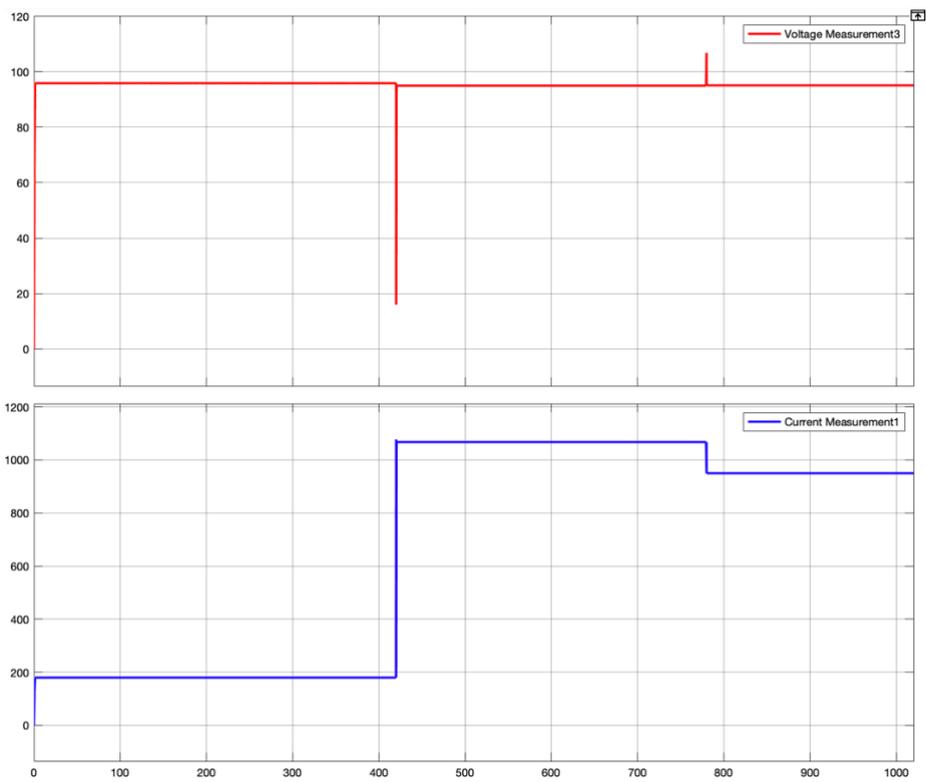


Figure 60 : Tension (V) et courant (A) en sortie du buck en fonction du temps (s)

On peut alors tracer l'évolution de la poussée durant les différentes phases du scenario :

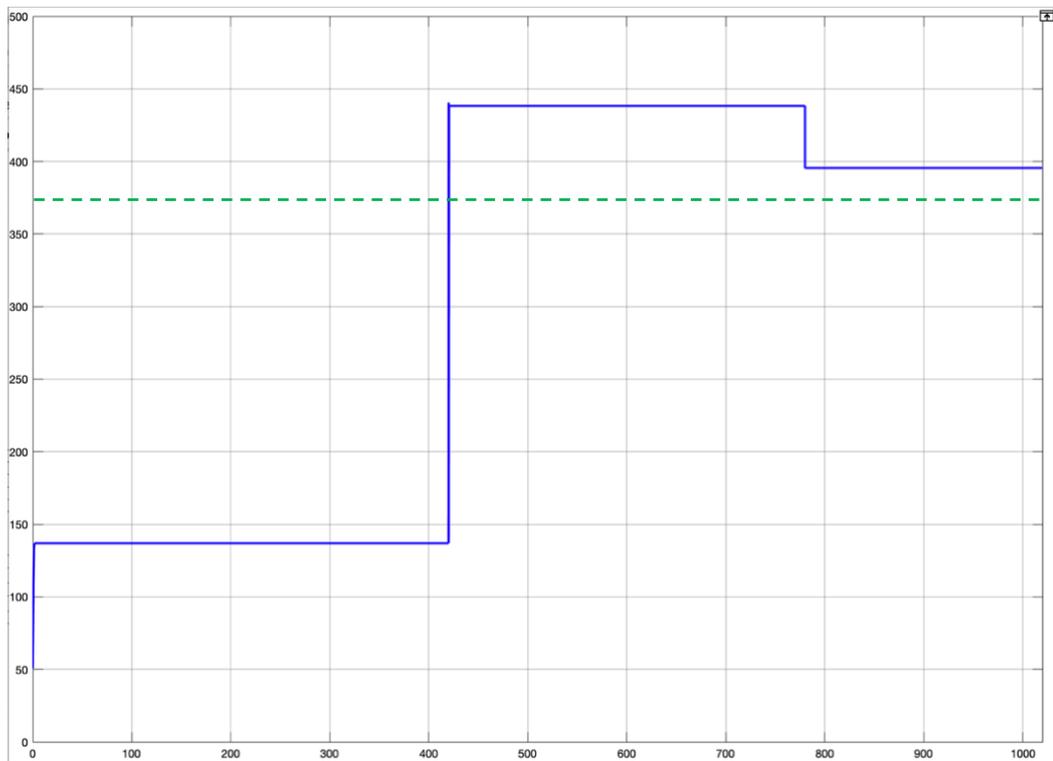


Figure 61 : Poussée (kg) en fonction du temps (s)

On remarque qu'après les 7 minutes de chauffe et de chargement des condensateurs, la valeur de la poussée reste au-dessus de 375kg, ce qui permet au Mini-Bee de voler.

IX – Conclusion

Ainsi la problématique de comparaison de configurations s'est effacée pour laisser place à une démonstration de la faisabilité d'un contrôle du Mini-Bee avec une électronique simple.

Nous avons pu commencer par modéliser différentes briques correspondant aux différentes parties de la chaîne de propulsion complète du Mini-Bee : moteur à courant continu, moteur asynchrone (qui sont désormais laissés de côté), moteur à courant continu sans balais, génératrice synchrone, électronique de puissance. Une fois ces briques modélisées et fonctionnelles, nous avons pu les assembler afin d'obtenir des premières modélisations de la chaîne de propulsion complète. Nous avons pu déceler des comportements inadaptés sur ces premières modélisations, et nous avons cherché à identifier les briques qui posent problème afin de les améliorer. Le temps de simulation étant assez long en considérant les 9 paires de moteurs, nous avons fait en sorte de l'accélérer en gardant les résultats cohérents. Finalement, nous avons pu tester le comportement de la chaîne globale en la soumettant à des scénarios de vols précis. Dans les deux scénarios testés, la poussée est suffisante pour que le Mini-Bee décolle.