

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

RAPPORT TECHNIQUE
PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
DANS LE CADRE DU PROJET DE FIN D'ÉTUDES
DU BACCALAURÉAT EN GENIE ELECTRIQUE

SYSTEME D'ALIMENTATION CONTINUE POUR DRONE DJI MATRICE 300

PAR
LALONDE, KEVIN (LALK13039805)
LEGAULT, TRISTAN (LEGT20039805)
MORAND, GUYAUME (MORG26089108)

MONTREAL, LE 15 AOÛT 2023

REMERCIEMENTS

Avant d'entrer dans le vif du sujet, nous aimerions faire quelques remerciements à des personnes sans qui ce projet n'aurait pas pu être à la hauteur de nos attentes. En premier lieu, nous aimerions remercier M Jean-François Boland, enseignant au département de génie électrique. En tant que superviseur et évaluateur du projet, nous sommes très reconnaissants du soutien continu et de la qualité des rétroactions données qui nous pousse à nous améliorer. Nous aimerions aussi remercier M Christian Belleau, enseignant au département de génie mécanique, qui a été d'une grande aide technique et qui nous a permis d'approfondir nos connaissances face à certains systèmes électroniques. De plus, nous aimerions remercier tous les enseignants du département de génie électrique de l'École de technologie supérieure pour leur encadrement continu. Finalement, merci à notre client WINDO qui nous a fait confiance tout au long du projet et qui est resté disponible en tout temps afin de nous aider à progresser.

SYSTEME D'ALIMENTATION CONTINUE POUR DRONE DJI MATRICE 300

LALONDE, Kevin

LEGAULT, Tristan

MORAND, Guyaume

RÉSUMÉ

Dans le cadre de notre projet de fin d'études, notre mandat était de concevoir un système d'alimentation continue pour drone DJI Matrice 300 pour l'entreprise de lavage de fenêtres WINDO. Le but principal étant de répliquer les performances de systèmes existants sur le marché à coût moindre afin de permettre à l'entreprise de développer leur propre système d'alimentation continu.

TABLE DES MATIÈRES

Page

INTRODUCTION	10
CHAPITRE 1 RAPPEL DU CONTEXTE, DE LA PROBLEMATIQUE ET DES OBJECTIFS	11
1.0 Mise en contexte	11
1.1 Objectifs	11
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE DE TRAVAIL	13
2.0 Établissement des requis	13
2.1 Communications	13
2.2 Idéation	15
2.2.0 Alimentation DC/DC au sol	16
2.2.1 Alimentation AC/DC sur le drone	16
2.2.2 Alimentation AC/DC au sol et DC/DC sur le drone	16
CHAPITRE 3 CONCEPTION DU SYSTEME.....	19
3.0 Spécification du système.....	19
3.1 Évaluation des possibilités	20
3.2 Composantes du système	20
3.2.0 Alimentation AC/DC	21
3.2.1 Alimentation DC/DC	21
3.2.2 Circuit de bascule d'alimentation	22
CHAPITRE 4 DOCUMENTATION TECHNIQUE DU PROTOTYPE	23
4.0 Composantes du système	23
4.0.0 Alimentation AC/DC	23
4.0.1 Alimentation DC/DC	24
4.0.2 Circuit de bascule d'alimentation	27
4.0.3 Transformateur 120V à 240V	31
4.0.4 Câble d'alimentation	32
4.0.5 Coût prévu du système	34
CHAPITRE 5 BANC DE TEST	35
5.0 Introduction des tests	35
5.1 Série de tests à effectuer	36
CHAPITRE 6 POURSUITE DU PROJET	39
6.0 Généralités de la poursuite du projet	39
6.1 Analyse du système conçu lors du cours	39
6.2 Option alternative à semiconducteurs et recommandations pour le futur du projet	41
6.2.1 Conceptions électriques	41
6.2.2 Conceptions mécaniques	41

CHAPITRE 7 CONCLUSION	43
7.0 Récapitulatif du projet et apprentissages	43
7.1 Cessation du projet et suite du projet pour WINDO	44
BIBLIOGRAPHIE.....	49

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1 Performances pour tension d'entrée 230V (Texas Instruments, 2017, p. 10)	23
Tableau 2 Caractéristiques du circuit de bascule d'alimentation.....	29
Tableau 3 Spécifications recommandées du transformateur	31
Tableau 4 Caractéristiques importantes pour différent câbles	32
Tableau 5 Coût associé à chaque composante du projet et coût total	34

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1 Arbre d'objectifs pour le projet de conception de système d'alimentation continue pour drone	12
Figure 2 Schéma initial de conception.....	15
Figure 3 Diagramme bloc du système	20
Figure 4 Efficacité en fonction de la puissance (Texas Instruments, 2017, p. 15)	24
Figure 5 Utilisation typique de module Vicor BCM® (Vicor Corporation, 2019, p. 2)	25
Figure 6 Puissance de sortie en fonction de la tension d'entrée (Vicor Corporation, 2019, p. 11)	26
Figure 7 Conception du boîtier pour le circuit d'alimentation DC/DC	27
Figure 8 Conception du boîtier pour le circuit de bascule d'alimentation	31

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ÉTS École de Technologie Supérieure

PFE Projet de fin d'étude

PFC Power Factor Correction

RoHS Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

UNITÉS DE MESURE

m	mètre (unité de longueur)
g	gramme (unité de masse)
A	ampère (unité d'intensité de courant électrique)
V	volt (unité de tension)
VDC	volt en courant continu (unité de tension)
VAC	volt en courant alternatif (unité de tension)
W	watt (unité de puissance)
°C	degré Celsius (unité calorifique)
s	seconde (unité de temps)
AWG	american wire gauge (unité de mesure de diamètre d'un câble électrique)

PUISSANCE DE 10 (peut précéder une unité de mesure)

n	nano	[10 ⁻⁹]
u	micro	[10 ⁻⁶]
m	milli	[10 ⁻³]
c	centi	[10 ⁻²]
k	kilo	[10 ³]
M	méga	[10 ⁶]

INTRODUCTION

Dans le cadre du programme de baccalauréat en génie électrique, nous devons accomplir un projet de fin d'études. Il consiste en un projet d'ingénierie visant à faire la conception d'un système devant remplir les besoins d'un client. Ce projet a pour but de nous préparer au métier d'ingénieur en nous offrant l'opportunité de travailler sur un projet d'ingénierie réel et d'interagir avec un client. Ce projet offre un contraste intéressant par rapport au cours offert au baccalauréat étant donné le besoin d'établir les requis avec le client, faire un suivi lors du déroulement du projet et effectuer des modifications selon la rétroaction reçue.

CHAPITRE 1

RAPPEL DU CONTEXTE, DE LA PROBLEMATIQUE ET DES OBJECTIFS

Ce chapitre présente le cœur du projet et son contexte. Il met en contexte l'origine du client et son besoin. Il explique le mandat requis et les contraintes à respecter afin de pouvoir démarrer le projet.

1.0 Mise en contexte

Le mandant qui nous a été donné par l'entreprise WINDO est de concevoir un système d'alimentation pour le drone DJI Matrice 300. WINDO est une start-up constituée de deux co-fondateurs, Sébastien Méthot-Thibault et Émile Normand, qui utilisent ce drone pour effectuer le lavage de fenêtres extérieur jusqu'à une hauteur de 100 mètres. Le principal avantage lié à l'utilisation d'un système d'alimentation continue est la possibilité d'utiliser le drone sans devoir perdre du temps à faire des changements de batteries ce qui agrandit l'horizon pour certains contrats. Bien que de similaires systèmes d'alimentation continues existent déjà sur le marché, par exemple ceux créés par ELISTAIR (ELISTAIR, s.d.), UAVForDrone ((UAVForDrone, s.d.) et Blue Vigil (OmniView Tech, 2023), leur coût est très élevé et prohibitif pour WINDO, dont les coûts peuvent aller de 10 000 \$ à 20 000 \$ par système dépendamment du modèle. WINDO désire donc faire la conception d'un système à moindre coût leur permettant d'équiper leurs drones d'un système d'alimentation continue pour environ 450 \$ par système.

1.1 Objectifs

Les objectifs sont fondés sur les requis ainsi que les contraintes du projet. Les requis du système conçu doivent permettre l'alimentation d'un drone jusqu'à 100 m en ajoutant un poids maximal de 1 kg spécifiquement au drone. Il n'y a pas de contrainte de poids pour ce qui est du poids associé au mécanisme au sol. Nous disposons d'un budget de 450\$, duquel 150 \$ provient du client et 300 \$ provient du département de génie électrique de l'ÉTS. Le client souhaiterait que le coût final du

Le système soit de 300 \$. Le système conçu doit utiliser une banque de batteries au sol afin d'alimenter le drone en plein vol de façon sécuritaire et doit aussi garder les batteries du drone accroché à celui-ci. La conception du système va prendre en considération l'achat des composantes et du matériel pour qu'il soit le plus possible local et respecte des normes environnementales, par exemple RoHS(« Directives RoHS », 2023) pour les pièces électroniques. La

1.1.0 Circuit de bascule d'alimentation

1.1.0.1 Généralités de conception

Nous avons dû concevoir le système de bascule d'alimentation en deux sections étant donné la tension relativement élevée d'alimentation du drone, il s'est avéré nécessaire de générer une tension de contrôle de 24 V afin d'alimenter les composantes du circuit de bascule. Afin d'assurer un fonctionnement continu le contrôle du circuit est alimenté à la fois du cordon d'alimentation et des batteries, voir ANNEXE II pour le schéma d'alimentation du circuit de contrôle. Le circuit de contrôle pour une batterie en ANNEXE I devrait permettre une alimentation constante au drone et retourner sur l'alimentation par batteries en cas de problème. Afin d'éviter une commutation constante si l'alimentation du système devient instable, lorsque l'alimentation bascule vers les batteries, l'opérateur devra poser le drone au sol et appuyer sur un bouton pour reconnecter l'alimentation du système.

Nous avons conçu les traces du circuit en fonction de l'information sur le temps de vol maximal avec charge maximale, étant de 31 minutes (DJI, 2023). Nous savons également que les batteries du client ont une capacité de 5935 mAh chaque (DJI, 2023), donc de 11870 mAh au total. Avec ces informations, nous pouvons calculer le courant moyen allant au drone :

$$\frac{31 \text{ minutes}}{60 \text{ minutes par heure}} = 0,5167 \text{ heures}$$

La batterie est donc vidée en 0,58 heures. Nous pouvons ensuite calculer le courant moyen pour vider la batterie lors de cette période :

$$\frac{11,870 \text{ Ah}}{0,5167 \text{ heures}} = 22.97 \text{ A}$$

Nous avons donc basé notre hypothèse sur le fait que le drone consomme 25A en moyenne afin de nous donner une marge de manœuvre, soit de 12,5A par circuit de bascule d'alimentation.

Pour le circuit imprimé conçu, il sera important d'utiliser un plaquage 2 oz au minimum lors de la fabrication afin d'éviter que le circuit imprimé surchauffe étant donné la demande en courant élevée du drone. Nous avons conçu le circuit imprimé en fonction d'un courant constant de 12,5 A afin de conserver l'augmentation de température sous 50 °C. Pour ce faire nous utilisons les équations suivantes afin de calculer une largeur adéquate pour les traces haute puissance du circuit imprimé (DigiKey, 2023) :

$$A = \left(\frac{I}{k * T_{Rise}^b} \right)^{\frac{1}{c}}$$

$$W = \frac{A}{t * 1.378}$$

Les coefficients b, c et k sont dérivés des normes de conceptions de circuits imprimés IPC-2221 (IPC-2221 Task Group, 2003). Selon nos paramètres d'entrées, une trace de largeur de 5,5mm est recommandée pour assurer la longévité du circuit imprimé. CHAPITRE 1

Tableau 2 Caractéristiques du circuit de bascule d'alimentation

Tension d'entrée (DC/DC)	50 VDC
Courant d'entrée (DC/DC)	25 A
Tension d'entrée (Batterie)	56 VDC

Courant d'entrée (Batterie)	25 A
Tension de sortie (DC/DC)	50 VDC
Courant de sortie (DC/DC)	25 A
Tension de sortie (Batterie)	56 VDC
Courant de sortie (Batterie)	25 A
Tension de contrôle	24 VDC
Temps de commutation	10 – 15 ms

1.1.0.2 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement du circuit est assez simple, un relais à deux positions permettant au circuit de changer entre les deux sources d'alimentation, alimente le drone. Lorsqu'il est dans sa position de base, aussi appelée normalement fermé, le drone est alimenté par la batterie. Par la suite, lorsque le bouton est appuyé, le relais change de position et vient prendre l'alimentation du câble, dans sa position normalement ouverte. Lorsque l'alimentation du câble est perdue, le relais retourne dans sa position normalement fermée.

Deux tensions de contrôle de 24 Volts sont présentes sur le circuit. Une provient de l'alimentation de la batterie, connectée en tout temps, et l'autre du câble. La tension d'alimentation du câble sert à alimenter le relais de commutation de l'alimentation au drone. Donc, lorsque l'alimentation du câble est perdue, l'alimentation de contrôle du câble s'écoulera inévitablement et le relais retournera dans sa position de base permettant le drone d'être alimenté par la batterie.

Par la suite, l'alimentation restera prise en charge par la batterie même si l'alimentation du câble revient, car un relais étant alimenté par le câble après que le bouton soit appuyé changera de position, ce qui fera en sorte que la tension de contrôle de la batterie fera changer un relais qui garde sa mémoire de position, venant déconnecter la tension de contrôle du câble tant que le bouton n'est pas appuyé de nouveau.

Un connecteur a été ajouté afin de pouvoir venir ajouter une lumière indicatrice, avertissant le pilote du drone si le drone est alimenté par la batterie. Cette lumière serait alimentée par la tension de contrôle à 24 Volts de la batterie. Nous recommandons d'ajouter une bande de diodes électroluminescentes (DEL) et de venir souder une résistance venant contrôler le courant dans les DEL à l'endroit prévu pour la résistance sur le circuit.

1.1.0.3 Boîtier

Le boîtier du circuit de bascule d'alimentation est conçu de sorte à interférer le moins possible avec le positionnement actuel de la batterie. Puisque ce circuit doit être connecté à une batterie du drone ainsi qu'au drone, le boîtier vient se positionner entre ces deux-ci. Cela fait donc reculer la batterie, ce qui peut avoir un impact sur le centre de gravité du drone, ce qui impacte ensuite sa stabilité.

En ajoutant un boîtier rectangulaire, cela impliquerait de reculer la batterie d'une distance égale ou supérieure à la longueur du circuit imprimé. Puisque la longueur du circuit imprimé est de huit centimètres, la batterie reculerait trop et il y aurait un impact sur la stabilité du drone. Nous avons donc opté pour une conception en L comme observé à la Figure 8. Cela permet de placer le circuit imprimé sur le côté de la batterie et de reculer la batterie de seulement trois centimètres, ce que nous considérons comme étant négligeable. Il est possible qu'il y ait tout de même un impact, mais il pourra être réglé en ajustant le boyau installé par le client comme celui-ci a mentionné lors de nos rencontres de suivi.

Tout comme le boîtier pour le circuit d'alimentation DC/DC, le boîtier pour le circuit de commutation devra être assemblé afin d'être résistant aux éclaboussures, nous recommandons l'ajout d'un sceau de silicone.



Figure 8 Conception du boîtier pour le circuit de bascule d'alimentation représente un schéma des objectifs du projet.

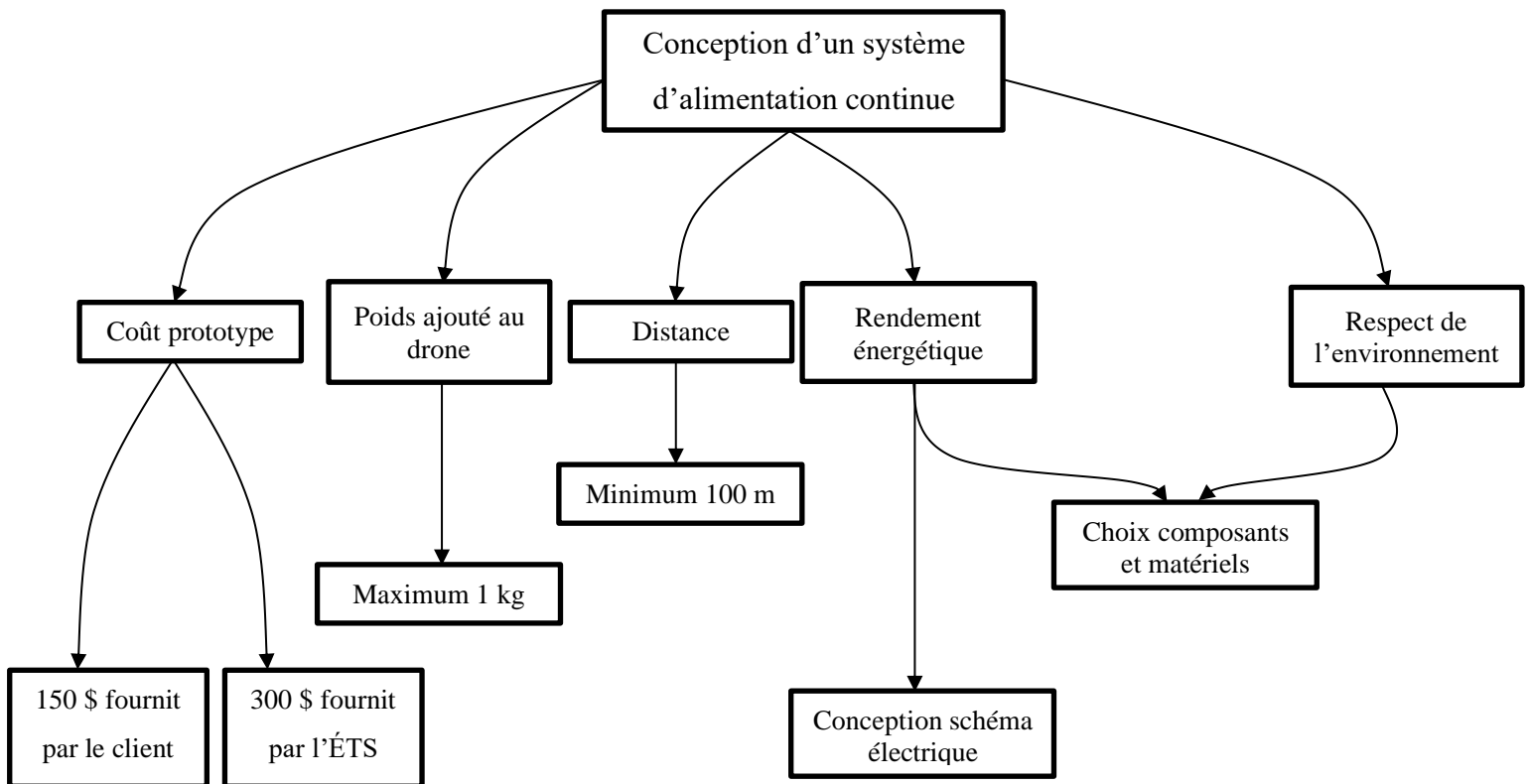


Figure 1 Arbre d'objectifs pour le projet de conception de système d'alimentation continue pour drone

La compagnie de nettoyage de fenêtre WINDO propose un projet qui vise à faire la conception d'un système d'alimentation continue pour leur drone. Nous avons dressé une liste d'objectifs à suivre qui s'en ligne avec le client. Pour être encore plus assidus, nous devons dresser une liste des requis spécifiques et développer une bonne méthodologie de travail.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE DE TRAVAIL

Dans ce chapitre, nous présentons la première phase de notre processus de conception suite au lancement du projet. Nous allons aborder brièvement les requis du client, la méthode de communication pour faciliter l'avancement du projet et les options analysées avant de faire le choix des composantes qui feront partie du prototype conçu.

2.0 Établissement des requis

Nous avons tout d'abord établi les requis du système avec le client afin de bien comprendre ses besoins pour nous permettre de concevoir un système qui allait pouvoir répondre au plus de requis possible. Suite à notre première rencontre, nous avons une liste de requis pour attaquer l'idéation et commencer à évaluer les options possibles afin de concevoir un système adéquat aux besoins du client.

Une liste préliminaire des requis principaux a été établie :

- Portée du système de 100 m.
- Alimentation continue fournie au drone.
- Alimentation primaire 120 VAC.
- Coût du système de 450 \$.
- Basculer à l'alimentation aux batteries en cas d'urgence.
- Ajout de 1 kg maximum au drone.

2.1 Communications

Afin d'obtenir une rétroaction constante avec le client, nous avons établi un serveur Discord permettant une communication constante si nous avons besoin de clarifications ou d'accès au drone

pour valider certains aspects de conception. Nous avons aussi fait des rencontres mensuelles afin de garder le client à jour avec les avancements.

Nous avons planifié rencontrer notre superviseur de projet mensuellement afin d'obtenir une rétroaction sur les avancements et sur la documentation. Il a aussi aidé à clarifier certains points liés à la structure du projet.

En ce qui concerne les trois membres de l'équipe, une discussion était en continu sur le serveur Discord. Malgré cette discussion, nous nous rencontrions de façon hebdomadaire pour quelques minutes pour clarifier le rôle de chacun pour la semaine qui suivait.

2.2 Idéation

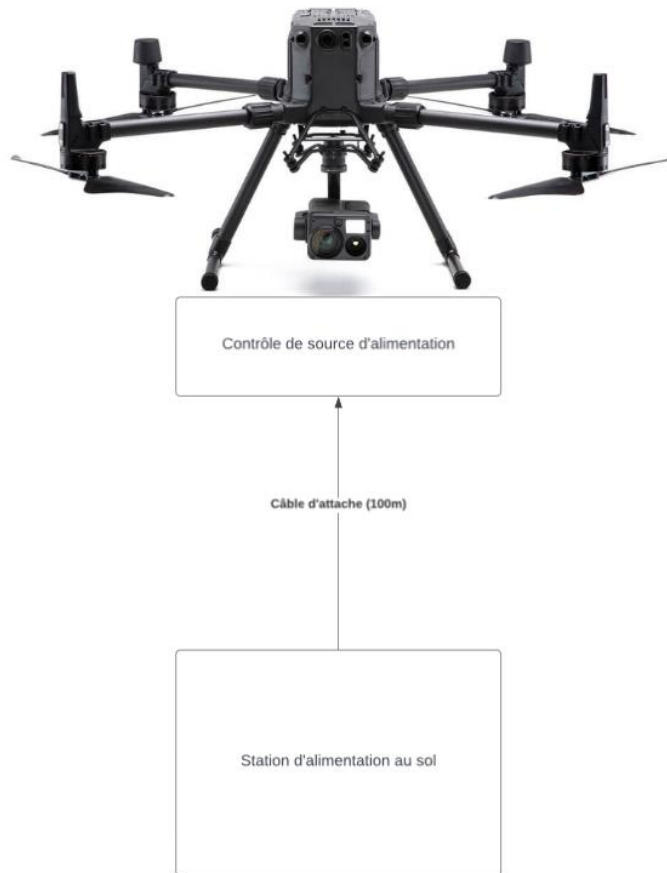


Figure 2 Schéma initial de conception

Suite à l'établissement des requis principaux, nous avons commencé à ébaucher les possibilités de solution pour concevoir un système de transfert d'énergie ayant les spécifications requises. Nous avons tout d'abord établi un schéma fonctionnel de base tel que vu à la Figure 2 et commencé à explorer les possibilités afin de concevoir un système fonctionnel.

2.2.0 Alimentation DC/DC au sol

Tout d'abord, l'approche la plus simple fut analysée, une alimentation DC fourni directement au drone qui ne nécessiterait qu'un module de contrôle d'alimentation sur le drone. Cette solution s'est toutefois avérée ne pas être viable dû à plusieurs facteurs. Étant donné les spécifications d'alimentation du drone requérant une puissance d'environ 1200 W à 1300 W à une tension d'environ 50 V, nous aurions dû fournir environ 25 A (voir 4.0.2.1) à travers le câble d'alimentation. Cette solution demanderait l'utilisation d'un câble d'énorme calibre ajoutant beaucoup trop de poids sur le drone ou d'accepter des pertes en puissance de 200 W à 400 W représentant une perte d'efficacité de 15 % à 30 %.

Nous avons conclu que l'utilisation d'une telle solution serait beaucoup trop difficile à implémenter et comporterait beaucoup trop de pertes en puissance pour être viable.

2.2.1 Alimentation AC/DC sur le drone

Une autre option fut alors envisagée afin de réduire le plus possible les pertes engendrées par le câble d'alimentation, il serait beaucoup plus efficace de transporter l'énergie à haute tension le long du câble et d'utiliser un convertisseur AC/DC sur le drone afin de fournir une alimentation adéquate. Toutefois, cette solution posait un problème au niveau du poids ajouté au drone, il est très difficile de concevoir une alimentation AC/DC effectuant du dévoltage à la puissance requise par le drone sans l'utilisation de transformateurs à cœur ferreux. Ces derniers sont non seulement assez coûteux, mais aussi ont un poids de trois à six livres, ce qui poserait problème aux capacités de vol du drone.

Cette solution a donc été écartée en faveur d'un système qui aurait un impact le plus négligeable possible sur le poids de vol du drone et son centre de gravité afin d'assurer un vol sécuritaire.

2.2.2 Alimentation AC/DC au sol et DC/DC sur le drone

Après avoir exploré quelques solutions disponibles sur le marché fournissant de la documentation technique telle qu'un système manufacturé par UAVForDrone (uavfordrone, 2022) et le système Blue

Vigil RS1000 (OmniView Tech, 2023), nous avons constaté un point commun à la plupart de ces systèmes, l'énergie est acheminée au drone à une tension d'environ 400 VDC et est convertie par un module d'alimentation sur le drone afin de fournir une tension d'alimentation adéquate pour le drone.

Nous n'étions pas très familiers avec la transmission DC haute tension, mais suite à nos recherches, nous avons trouvé plusieurs applications détaillées durant la conférence « Energy Week » (Roberto Rudervall, 2000), où les auteurs mentionnent plusieurs avantages de l'utilisation de cette technologie par rapport aux lignes de transmission AC :

- No limits in transmitted distance. This is valid for both OH lines and sea or underground cables.
- Very fast control of power flow, which implies stability improvements, not only for the HVDC link but also for the surrounding AC system.
- Direction of power flow can be changed very quickly (bi-directionality).
- An HVDC link don't increase the short-circuit power in the connecting point. This means that it will not be necessary to change the circuit breakers in the existing network.
- HVDC can carry more power for a given size of conductor
- The need for ROW (Right Of Way) is much smaller for HVDC than for HVAC, for the same transmitted power. The environmental impact is smaller with HVDC.
- VSC technology allows controlling active and reactive power independently without any needs for extra compensating equipment.
- VSC technology gives a good opportunity to alternative energy sources to be economically and technically efficient.
- HVDC transmissions have a high availability and reliability rate, shown by more than 30 years of operation.

Ces lignes de transmissions sont conçues selon les principes démontrés dans High Voltage Direct Current Transmission: Converters, Systems and DC Grids (Ahmed, 2015), bien que le système conçu dans le cadre de notre projet n'utilisera pas de tension de cet ordre de grandeur, les principes de

transmissions sont applicables et confirme que l'utilisation de haute tension DC pour le transport d'énergie offre plusieurs avantages.

Au cours du chapitre, nous avons déterminé les besoins spécifiques du client et établi un mode de communication avec celui-ci afin de faire des suivis sur l'avancement du projet fréquemment. En passant à travers les trois possibilités de conception, il y en a une qui sort du lot et se permet d'être approfondie.

CHAPITRE 3

CONCEPTION DU SYSTEME

Dans ce chapitre, nous abordons la conception du système et les raisons ayant poussé le choix des composantes utilisées.

3.0 Spécification du système

Tout d'abord, nous devons établir les spécifications requises avec le client. Suite à notre première rencontre, nous avons établi les besoins du client. Le système doit alimenter le drone jusqu'à une distance de 100 m avec un ajout de poids de maximum 1 kg au drone. Le système doit aussi permettre l'alimentation par batterie en cas de perte d'alimentation du sol pour permettre au drone de se poser en toute sécurité.

En plus des demandes du client, le système doit aussi répondre aux besoins d'alimentation du drone. Étant donné le manque de documentation technique sur le drone DJI Matrice 300, nous avons dû approximer certains aspects qui devront être revus avant la conception du produit final. Le système doit aussi fonctionner avec les batteries de vol TB60 qui alimentent présentement le drone.

L'alimentation du drone est séparée en deux canaux, le système devra simultanément remplacer l'alimentation des deux batteries. Chaque batterie fournie en moyenne 12 A à 14 A lorsque le drone est en marche, ne connaissant pas le courant de point maximal, nous estimons ce dernier à environ 25 A, ceci pourra être ajusté lors de la conception du produit final si notre estimation est incorrecte.

3.1 Évaluation des possibilités

Nous devons ensuite choisir la topologie de chaque module d'alimentation afin d'obtenir une bonne efficacité et concevoir un circuit approprié pour chaque étage du système. Pour ce faire, nous avons utilisé un guide de sélection fourni par RoHM Semiconductor (ROHM Semiconductor, 2023).

Nous avons établi que les technologies appropriées afin d'obtenir les conversions désirées seraient une alimentation de type « PFC Boost » pour l'alimentation AC/DC et un convertisseur de type « LLC » pour l'alimentation DC/DC.

3.2 Composantes du système

Le système proposé comporte 3 composantes majeures, premièrement, un convertisseur AC/DC au sol utilisé pour augmenter la tension afin de réduire les pertes ohmiques et permettre l'utilisation d'un calibre de câble plus petit. Ensuite un convertisseur DC/DC sur le drone afin d'abaisser la tension, cette alimentation serait l'alimentation primaire du drone. Finalement, un circuit de bascule d'alimentation qui contrôle l'alimentation utilisée par le drone selon les conditions établies.

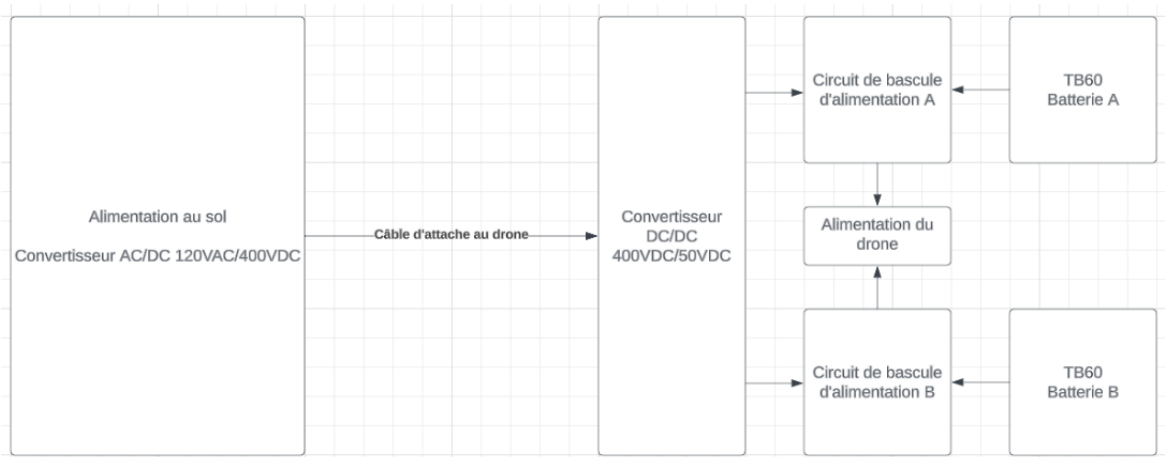


Figure 3 Diagramme bloc du système

3.2.0 Alimentation AC/DC

Pour le module d'alimentation AC/DC au sol, nous avons choisi une alimentation de type « PFC Boost ». Ce type d'alimentation est couramment utilisé afin d'obtenir une bonne efficacité lorsque la puissance requise va jusqu'à 3,5 kW. Nous avons utilisé la conception de référence de TIDA-00779 (Texas Instruments, 2017) pour concevoir l'alimentation au sol. Cette alimentation devra être validée en pratique afin de s'assurer du bon fonctionnement, mais nous devrions pouvoir l'utiliser avec une tension d'entrée de 85 VAC à 270 VAC. L'efficacité maximale est toutefois atteinte avec une tension plus élevée, il faudra donc valider le fonctionnement à 120 V pour assurer la validité du système avec une tension d'entrée de 120 V. Nous pouvons extrapoler une efficacité d'au moins 96 % pour une puissance de sortie de 1500 W, donc l'utilisation devrait être possible pour les tensions d'entrée disponibles au Québec, entre 120 V et 240 V. Afin de permettre la meilleure efficacité, un transformateur 120 V : 240 V est ajouté à l'entrée, une unité commerciale 2000 W est suffisante pour nos besoins et le coût est raisonnable.

3.2.1 Alimentation DC/DC

Pour le module d'alimentation DC/DC, nous avons opté pour une alimentation de type convertisseur à résonance LLC. Nous avons très peu d'options adéquates pour l'alimentation DC/DC étant donné la demande en puissance du drone et le poids maximal pouvant être porté par ce dernier, les convertisseurs à résonance LLC étaient la seule possibilité viable. Toutefois, elles ne peuvent respecter les contraintes budgétaires du projet. C'est à ce point que nous avons dû informer le client de l'impossibilité de respecter les contraintes budgétaires, mais que nous serions tout de même capable de concevoir un système qui serait beaucoup moins dispendieux que ceux déjà disponibles sur le marché, ce qui était satisfaisant pour le client.

Pour le module DC/DC, nous avons basé la conception sur un circuit intégré de Vicor (Vicor Corporation, 2019). Ce type de circuit intégré semble être la seule façon d'obtenir la densité de puissance requise par notre système afin de minimiser le poids ajouté au drone.

3.2.2 Circuit de bascule d'alimentation

Cette partie du système a pour but principal la protection du drone. Afin d'assurer le bon fonctionnement du circuit, le pilote doit activer l'alimentation manuellement avant le vol. Lorsqu'activé, l'alimentation du cordon est utilisée pour alimenter le drone, si un problème survient, un témoin lumineux est activé avertissant le pilote que l'alimentation provient désormais de la batterie. Pour réactiver l'alimentation du cordon, l'utilisateur devra poser le drone au sol et appuyer sur un bouton. Ceci empêche une alimentation intermittente de faire basculer la source d'alimentation à répétition et assure une alimentation stable.

Afin de garder le coût du circuit de bascule raisonnable, nous avons opté pour l'utilisation de relais pour effectuer la bascule d'alimentation. Ceux-ci ont un temps de commutation d'environ 10 ms à 15 ms, ce qui pourrait potentiellement être un problème pour l'alimentation du drone. Dans le cas où le délai de commutation est trop long, les relais pourraient être remplacés par des commutateurs à semi-conducteurs impliquant quelques modifications mineures du système. Le coût est toutefois beaucoup plus élevé pour chaque composante en comparaison avec les relais et doit être pris en considération, car ce remplacement pourrait facilement doubler le coût final du système. Pour ce remplacement, un commutateur « solid state » serait idéal, le délai de commutation serait réduit à environ 100 us, ce qui devrait être amplement suffisant pour assurer une alimentation constante du drone. Nous aimerions toutefois éviter le coût d'environ 100 \$ à 200 \$ par pièce en faveur d'utiliser des relais coûtant environ 5 \$ à 20 \$ par pièce si possible.

Suite à la conception sommaire de chaque bloc du système, nous allons valider les spécifications électriques du système afin de nous assurer que le prototype répond bien aux besoins d'alimentation du drone.

CHAPITRE 4

DOCUMENTATION TECHNIQUE DU PROTOTYPE

Dans cette section, nous allons présenter les caractéristiques de chaque module du système et fournir les requis de composants qui vont être à sélectionner par le client.

4.0 Composantes du système

4.0.0 Alimentation AC/DC

La configuration répondant le mieux aux besoins du système est une sortie fixe avec MOSFET. L'efficacité est optimale avec une tension d'entrée plus élevée, nous recommandons donc l'utilisation d'un transformateur si le système est alimenté à partir d'une prise murale 120 V. La puissance nominale du drone étant d'environ 1200 W à 1300 W nous permet d'utiliser ce module d'alimentation à sa meilleure efficacité. Ce module d'alimentation nous permet aussi d'assurer une tension stable à l'entrée du convertisseur DC/DC et il ne devrait pas crouler lorsque le courant de sortie varie.

Tableau 1 Performances pour tension d'entrée 230V (Texas Instruments, 2017, p. 10)

V_{INAC} (V)	I_{INAC} (A)	P_{INAC} (W)	PF	THDi (%)	V_{OUT} (V)	I_{OUT} (A)	P_{OUT} (W)	EFFICIENCY (%)	REG (%)
230	0.62	81.3	0.569	18.74	392.3	0.20	77.2	94.96	-0.05
230	0.90	165.6	0.802	22.51	392.3	0.41	160.2	96.75	-0.05
230	1.18	244.4	0.901	10.20	392.3	0.61	237.6	97.21	-0.05
230	1.49	322.4	0.941	6.39	392.3	0.80	314.8	97.65	-0.05
230	1.82	401.2	0.960	3.54	392.3	1.00	392.4	97.81	-0.05
230	3.52	799.0	0.987	4.88	392.3	2.00	784.6	98.20	-0.05
230	5.26	1198.0	0.990	4.00	392.4	3.00	1177.7	98.31	-0.03
230	7.00	1592.0	0.989	3.65	392.5	3.99	1565.4	98.33	0
230	8.78	1994.0	0.987	3.63	392.6	4.99	1958.5	98.22	0.03
230	10.56	2406.9	0.991	1.67	392.6	6.02	2363.8	98.21	0.03
230	12.30	2808.6	0.993	1.87	392.7	7.02	2755.2	98.10	0.05
230	14.04	3208.3	0.994	2.21	392.7	8.01	3145.9	98.06	0.05
230	15.78	3612.3	0.995	2.40	392.8	9.01	3537.6	97.93	0.08

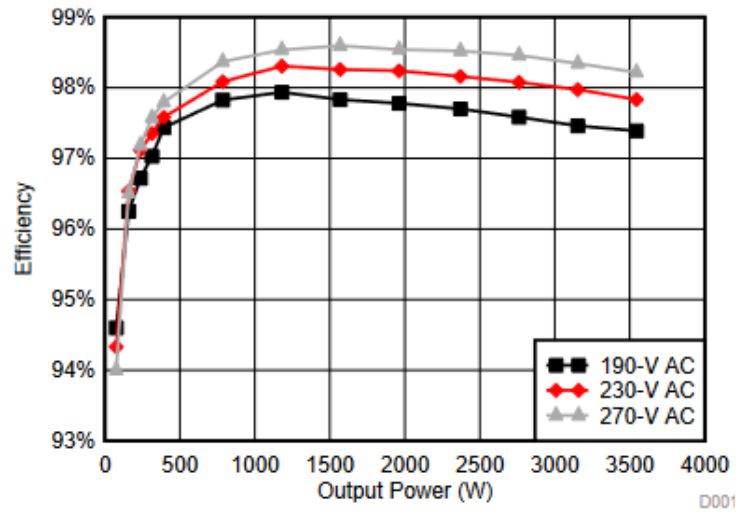


Figure 4 Efficacité en fonction de la puissance (Texas Instruments, 2017, p. 15)

4.0.1 Alimentation DC/DC

4.0.1.1 Circuit

Étant donné l'alimentation stable fournie par le module TIDA-00779, nous pouvons utiliser le module BCM indépendamment d'un circuit de contrôle afin de limiter l'ajout de poids et complexité du module d'alimentation DC/DC. Avec un courant nominal d'environ 25 A et assumant un courant de pointe de 35 A à 40 A, ce module devrait répondre aux besoins d'alimentation du drone sans problème. La densité de puissance élevée offerte par Vicor permet aussi de grandement limiter l'ajout de poids au système comparativement à une alimentation DC/DC plus standard. Le module ayant un poids de 41 g, en ajoutant environ 10 g pour le circuit imprimé et environ 75 g à 100 g pour le boîtier, le poids ajouté est minimisé au maximum pour réduire l'impact de l'ajout du système sur les capacités de vol du drone. L'isolation entre l'entrée et la sortie de plus de 4kV devrait protéger le circuit de contrôle d'alimentation et le drone en cas de problème avec l'alimentation provenant du système.

Il sera important de valider le fonctionnement du drone avec cette alimentation, car la tension nominale fournie par le système sera d'environ 49V en prenant compte des pertes ohmiques, cela ne devrait pas être un problème comme le drone est conçu pour fonctionner avec des batteries ayant une tension variable, mais il sera important de valider et de modifier le système au besoin. Toutefois, nous sommes confiants du fonctionnement basé sur les données fournies d'un système compatible avec le drone DJI Matrice 300 qui fournit une alimentation de 36.5 V à 52.5 V (uavfordrone, 2022)

Le circuit imprimé doit être conçu en fonction de la norme IPC-2221 (IPC-2221 Task Group, 2003) afin d'assurer la longévité et le bon fonctionnement du circuit.

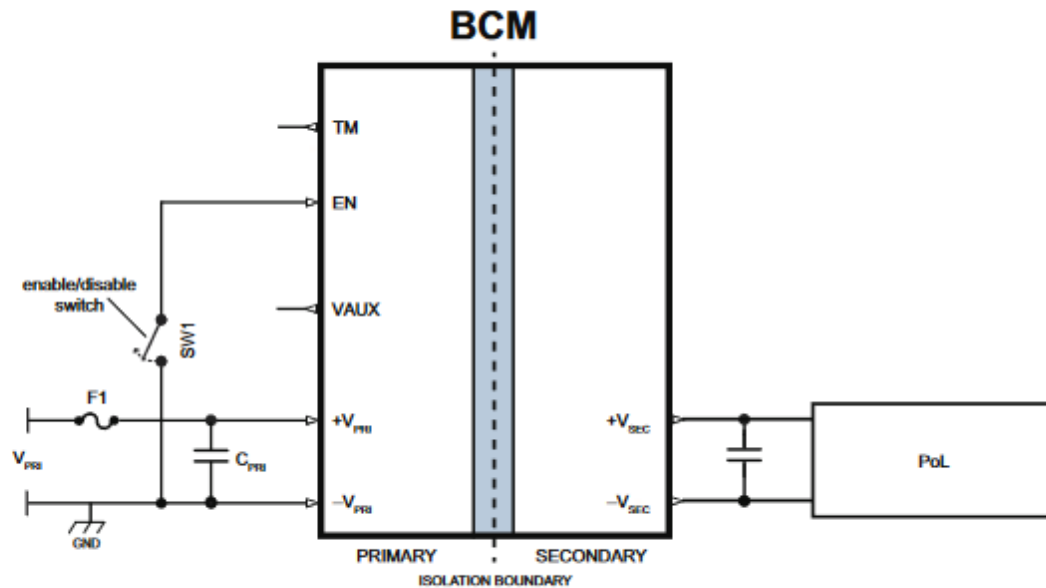


Figure 5 Utilisation typique de module Vicor BCM® (Vicor Corporation, 2019, p. 2)

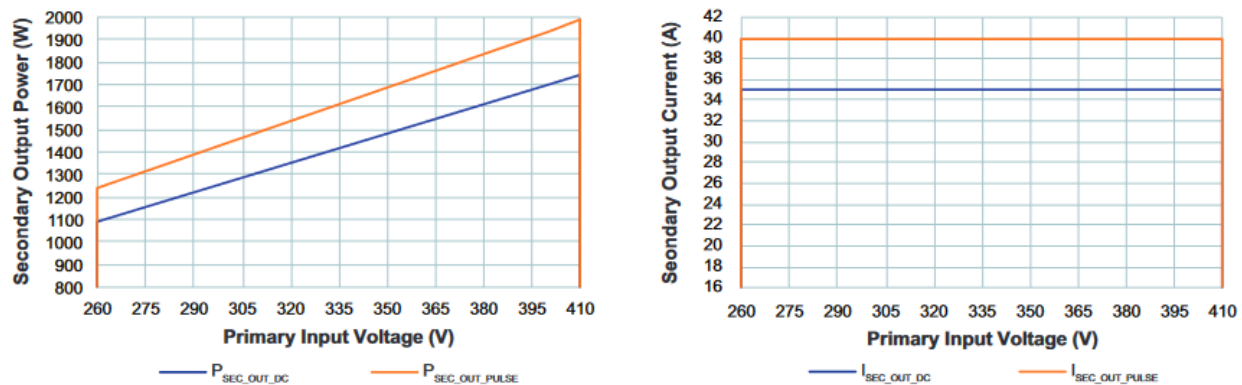


Figure 6 Puissance de sortie en fonction de la tension d'entrée (Vicor Corporation, 2019, p. 11)

Tension d'entrée	390 VDC
Courant d'entrée maximum	3.5 A
Tension de sortie	50 VDC
Courant de sortie maximum	35 A

4.0.1.1 Boîtier

Le boîtier pour le circuit d'alimentation DC/DC se positionne en dessous du boyau et s'attache aux pattes du drone. Il est placé à une certaine distance du sol afin de ne pas impacter l'atterrissage du drone.

Comme le circuit doit être monté sur le drone à proximité du boyau, le boîtier devra être assemblé afin d'être résistant aux éclaboussures, pour ce faire, nous recommandons l'ajout d'un sceau de silicone.

Si la dissipation thermique n'est pas suffisante à l'intérieur du boîtier, il devra être modifié afin de pouvoir ajouter un dissipateur de chaleur avec les ailerons à l'extérieur, ceci devrait pouvoir être fait sans compromettre la résistance aux éclaboussures.

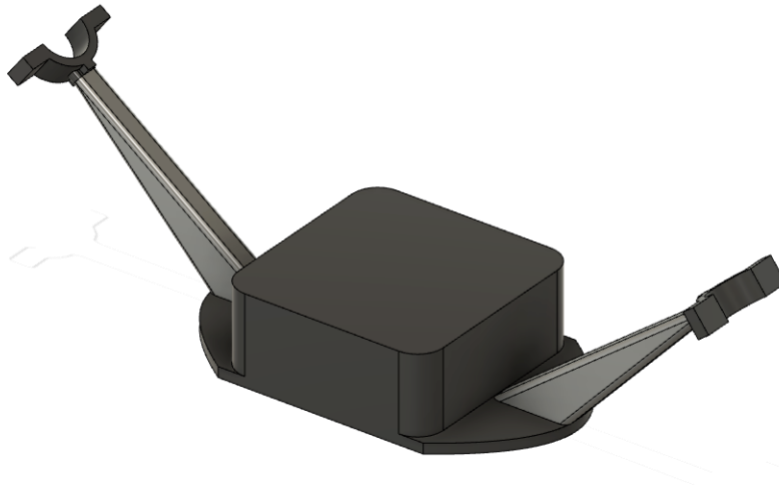


Figure 7 Conception du boîtier pour le circuit d'alimentation DC/DC

4.0.2 Circuit de bascule d'alimentation

4.0.2.1 Généralités de conception

Nous avons dû concevoir le système de bascule d'alimentation en deux sections étant donné la tension relativement élevée d'alimentation du drone, il s'est avéré nécessaire de générer une tension de contrôle de 24 V afin d'alimenter les composantes du circuit de bascule. Afin d'assurer un fonctionnement continu le contrôle du circuit est alimenté à la fois du cordon d'alimentation et des batteries, voir ANNEXE II pour le schéma d'alimentation du circuit de contrôle. Le circuit de contrôle pour une batterie en ANNEXE I devrait permettre une alimentation constante au drone et retourner sur l'alimentation par batteries en cas de problème. Afin d'éviter une commutation constante si l'alimentation du système devient instable, lorsque l'alimentation bascule vers les batteries, l'opérateur devra poser le drone au sol et appuyer sur un bouton pour reconnecter l'alimentation du système.

Nous avons conçu les traces du circuit en fonction de l'information sur le temps de vol maximal avec charge maximale, étant de 31 minutes (DJI, 2023). Nous savons également que les batteries

du client ont une capacité de 5935 mAh chaque (DJI, 2023), donc de 11870 mAh au total. Avec ces informations, nous pouvons calculer le courant moyen allant au drone :

$$\frac{31 \text{ minutes}}{60 \text{ minutes par heure}} = 0,5167 \text{ heures}$$

La batterie est donc vidée en 0,58 heures. Nous pouvons ensuite calculer le courant moyen pour vider la batterie lors de cette période :

$$\frac{11,870 \text{ Ah}}{0,5167 \text{ heures}} = 22.97 \text{ A}$$

Nous avons donc basé notre hypothèse sur le fait que le drone consomme 25A en moyenne afin de nous donner une marge de manœuvre, soit de 12,5A par circuit de bascule d'alimentation.

Pour le circuit imprimé conçu, il sera important d'utiliser un plaquage 2 oz au minimum lors de la fabrication afin d'éviter que le circuit imprimé surchauffe étant donné la demande en courant élevée du drone. Nous avons conçu le circuit imprimé en fonction d'un courant constant de 12,5 A afin de conserver l'augmentation de température sous 50 °C. Pour ce faire nous utilisons les équations suivantes afin de calculer une largeur adéquate pour les traces haute puissance du circuit imprimé (DigiKey, 2023) :

$$A = \left(\frac{I}{k * T_{Rise}^b} \right)^{\frac{1}{c}}$$

$$W = \frac{A}{t * 1.378}$$

Les coefficients b, c et k sont dérivés des normes de conceptions de circuits imprimés IPC-2221 (IPC-2221 Task Group, 2003). Selon nos paramètres d'entrées, une trace de largeur de 5,5mm est recommandée pour assurer la longévité du circuit imprimé. CHAPITRE 1

Tableau 2 Caractéristiques du circuit de bascule d'alimentation

Tension d'entrée (DC/DC)	50 VDC
Courant d'entrée (DC/DC)	25 A
Tension d'entrée (Batterie)	56 VDC
Courant d'entrée (Batterie)	25 A
Tension de sortie (DC/DC)	50 VDC
Courant de sortie (DC/DC)	25 A
Tension de sortie (Batterie)	56 VDC
Courant de sortie (Batterie)	25 A
Tension de contrôle	24 VDC
Temps de commutation	10 – 15 ms

4.0.2.2 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement du circuit est assez simple, un relais à deux positions permettant au circuit de changer entre les deux sources d'alimentation, alimente le drone. Lorsqu'il est dans sa position de base, aussi appelée normalement fermé, le drone est alimenté par la batterie. Par la suite, lorsque le bouton est appuyé, le relais change de position et vient prendre l'alimentation du câble, dans sa position normalement ouverte. Lorsque l'alimentation du câble est perdue, le relais retourne dans sa position normalement fermée.

Deux tensions de contrôle de 24 Volts sont présentes sur le circuit. Une provient de l'alimentation de la batterie, connectée en tout temps, et l'autre du câble. La tension d'alimentation du câble sert à alimenter le relais de commutation de l'alimentation au drone. Donc, lorsque l'alimentation du câble est perdue, l'alimentation de contrôle du câble s'écoulera inévitablement et le relais retournera dans sa position de base permettant le drone d'être alimenté par la batterie.

Par la suite, l'alimentation restera prise en charge par la batterie même si l'alimentation du câble revient, car un relais étant alimenté par le câble après que le bouton soit appuyé changera de position, ce qui fera en sorte que la tension de contrôle de la batterie fera changer un relais qui garde sa mémoire de position, venant déconnecter la tension de contrôle du câble tant que le bouton n'est pas appuyé de nouveau.

Un connecteur a été ajouté afin de pouvoir venir ajouter une lumière indicatrice, avertissant le pilote du drone si le drone est alimenté par la batterie. Cette lumière serait alimentée par la tension de contrôle à 24 Volts de la batterie. Nous recommandons d'ajouter une bande de diodes électroluminescentes (DEL) et de venir souder une résistance venant contrôler le courant dans les DEL à l'endroit prévu pour la résistance sur le circuit.

4.0.2.3 Boîtier

Le boîtier du circuit de bascule d'alimentation est conçu de sorte à interférer le moins possible avec le positionnement actuel de la batterie. Puisque ce circuit doit être connecté à une batterie du drone ainsi qu'au drone, le boîtier vient se positionner entre ces deux-ci. Cela fait donc reculer la batterie, ce qui peut avoir un impact sur le centre de gravité du drone, ce qui impacte ensuite sa stabilité.

En ajoutant un boîtier rectangulaire, cela impliquerait de reculer la batterie d'une distance égale ou supérieure à la longueur du circuit imprimé. Puisque la longueur du circuit imprimé est de huit centimètres, la batterie reculerait trop et il y aurait un impact sur la stabilité du drone. Nous avons donc opté pour une conception en L comme observé à la Figure 8. Cela permet de placer le circuit imprimé sur le côté de la batterie et de reculer la batterie de seulement trois centimètres, ce que nous considérons comme étant négligeable. Il est possible qu'il y ait tout de même un impact, mais il pourra être réglé en ajustant le boyau installé par le client comme celui-ci a mentionné lors de nos rencontres de suivi.

Tout comme le boîtier pour le circuit d'alimentation DC/DC, le boîtier pour le circuit de commutation devra être assemblé afin d'être résistant aux éclaboussures, nous recommandons l'ajout d'un sceau de silicone.



Figure 8 Conception du boîtier pour le circuit de bascule d'alimentation

4.0.3 Transformateur 120V à 240V

Pour assurer le bon fonctionnement et augmenter l'efficacité du système, nous recommandons l'ajout d'un transformateur si le système doit être alimenté sur le 120V. Une unité commerciale standard peut être utilisée et a pour seul requis de fournir jusqu'à 1500W à 2000W pour garantir une alimentation adéquate au système.

Tableau 3 Spécifications recommandées du transformateur

Tension d'entrée	120 VAC
Courant d'entrée	15A
Tension de sortie	240 VAC
Courant de sortie	7.5A

4.0.4 Câble d'alimentation

La sélection du câble d'alimentation dépendra de plusieurs facteurs, étant donné la gamme de prix possible pour les câbles de la longueur requise il devra être sélectionné par le client. Le câble utilisé doit remplir les critères suivants :

- Capacité de transport de courant d'au moins 5A
- Calibre AWG minimum 16 (cuivre) ou 14 (aluminium)
- Disponible en longueur de 100m
- Doit supporter une tension de plus de 400VDC

Il est à noter qu'un calibre plus gros réduira les pertes et améliorera la performance et l'efficacité du système.

Par exemple, voici la perte en tension encourue pour différents calibres de câbles pour une tension de 400V pour un courant de 4A :

Tableau 4 Caractéristiques importantes pour différent câbles

Calibre AWG (Matériel)	Résistance par 100m	Pertes ohmiques	Poids approximatif (2 conducteurs)
12 (Aluminium)	0.852	3.41V	356g
14 (Aluminium)	1.355	5.42V	224g
14 (Cuivre)	0.828	3.31V	744g
16 (Cuivre)	1.317	5.27V	468g

La résistance est obtenue avec la formule suivante : $R = \rho L/A$

Où ρ est la résistivité du matériel, L la longueur en mètres du conducteur et A l'aire de surface du conducteur en mètres carrés. (The Engineering ToolBox, 2008)

À noter, une perte d'environ 24W à 40W sur la longueur du câble, bien que la perte soit présente, elle est assez négligeable considérant qu'elle représente environ 2% de la puissance totale livrée par le système. Cette perte peut être réduite en augmentant le diamètre du câble au coût d'un ajout de poids sur le système.

Un autre aspect important pour la sélection du câble sera le matériel du conducteur. Un choix doit être fait entre le cuivre et l'aluminium, et bien que l'aluminium n'offre que 61 % de la conductivité du cuivre, la densité de 2.7 g/cm³ par rapport à celle du cuivre à 8.96 g/cm³ veut dire qu'un câble d'aluminium ayant la même résistance qu'un câble de cuivre aura un poids équivalent à la moitié du câble de cuivre correspondant. Par exemple, un câble de calibre 12 AWG d'aluminium ajouterait moins de poids au système qu'un câble de calibre 16 AWG de cuivre, mais permet un courant comparable à un câble de calibre 14 AWG de cuivre. Nous avons donc conclu que l'utilisation d'un câble d'aluminium serait plus appropriée pour le système et permet de minimiser l'ajout de poids sur le drone.

La durabilité du câble est plus ou moins importante étant donné la possibilité d'attacher le câble au boyau qui achemine l'eau à la buse, il serait seulement important d'utiliser un câble pouvant opérer dans un milieu avec possibilité d'éclaboussements.

En résumé, il reste à concevoir le circuit imprimé du module DC/DC, ce dernier devrait être assez simple avec seulement un peu de filtrage ajouté au circuit intégré de Vicor. L'aspect le plus important sera la dissipation de chaleur, un matériel de circuit imprimé métal pourrait être utilisé pour améliorer l'efficacité du transfert thermique.

Il faudra aussi sélectionner un câble répondant aux besoins du système ce choix sera laissé à la discrétion du client étant donné la grande variété de câbles disponibles et la gamme de prix très large selon le câble choisi (250 \$ à 1500 \$).

4.0.5 Coût prévu du système

Le Tableau 5 présente la prévision de l'ensemble des coûts associés au projet pour ce qui concerne le matériel. Chaque catégorie est présente son coût unitaire.

Tableau 5 Coût associé à chaque composante du projet et coût total

Transformateur (Optionnel)	• 150\$ - 200\$
Alimentation AC/DC	• 250\$
Alimentation DC/DC	• 600\$
Bascule d'alimentation	• 200\$
Câble	• 250\$ - 1500\$
Total	• 1450\$ - 2750\$

Le coût total du système dépasse grandement les attentes du client de 450\$, mais il est très important de considérer que nos prévisions démontrent tout de même un prix entre 10 et 20 fois inférieur aux prix des systèmes existants.

Maintenant que les composantes du système sont bien caractérisées et qu'une idée claire du coût relié au système est établie, nous allons aborder les tests à effectuer avant de concevoir le produit final, il sera important de valider les capacités du système avant de le connecter au drone pour éviter tout dommage au matériel.

CHAPITRE 5

BANC DE TEST

5.0 Introduction des tests

Avant de pouvoir brancher les circuits imprimés sur le drone et le faire voler à plusieurs mètres en hauteur, nous devons nous assurer que les parties critiques de notre circuit ont été testées dans les conditions les plus extrêmes auxquelles le drone sera exposé.

Électriquement, notre circuit d'alimentation devra prouver qu'il est capable de tolérer la tension de la batterie, ainsi que le fort courant demandé par le drone. Des tests devront être effectués pour démontrer que le circuit peut tolérer des courants en continu supérieurs au courant moyen consommé par le drone lors d'une séance de vol, afin de simuler l'ascension du drone. Le circuit devra également prouver qu'il est capable de changer de source d'alimentation tout en transportant un fort courant.

Puisque le drone de WINDO devra utiliser un tuyau à pression, le circuit devra également prouver qu'il est capable de subir de fortes accélérations dans tous les sens afin de simuler les ébranlements subis par les jets du boyau et les accélérations du drone. Le circuit devra finalement prouver qu'il est étanche.

La section qui documente la série de tests a été produite afin de pouvoir être imprimée et être utilisée comme feuille de suivi pendant les tests du circuit d'alimentation.

5.1 Série de tests à effectuer

ID de test	Nom du test	Description du test	Tests à effectuer	
T1	Test de continuité	Une fois le PCB assemblé, nous devons prouver qu'il n'y a aucun court-circuit entre les sources d'alimentation avant de brancher l'alimentation.	À l'aide d'un multimètre, faire des tests de continuité sur les points de tests du PCB, en s'assurant de vérifier la continuité entre chacun des points d'alimentation.	<input type="checkbox"/>
T2	Test d'alimentation de la batterie	Avant de brancher la batterie, il est important de pouvoir prouver que le PCB peut prendre la tension de la batterie et que la tension de contrôle fonctionne comme prévu.	Alimenter le PCB par le port de la batterie avec une source d'alimentation répliquant la tension de la batterie (environnant 60V) à faible courant (sous 250mA). Mesurer que la tension à l'entrée est la même que la tension de la source.	<input type="checkbox"/>
			Mesurer que la tension à la sortie (la tension allant au drone) est la même que celle à l'entrée.	<input type="checkbox"/>
			Mesurer la tension de contrôle de la batterie afin de s'assurer qu'elle est bien de 24 Volts.	<input type="checkbox"/>
T3	Test d'alimentation du câble	Avant de brancher l'alimentation DC-DC, il est important de pouvoir prouver que le PCB peut prendre la tension du câble et que la tension de contrôle fonctionne comme prévu.	Alimenter le PCB par le port du câble avec une source d'alimentation répliquant la tension de la batterie (environnant 60V) à faible courant (sous 250mA). Mesurer que la tension à l'entrée est la même que la tension de la source.	<input type="checkbox"/>
			Mesurer la tension de contrôle du câble afin de s'assurer qu'elle est bien de 24 Volts.	<input type="checkbox"/>
T4	Test de transfert de	Cette série de tests sert à prouver que l'alimentation peut être transférée entre les deux sources tel que prévu.	Alimenter le PCB par les ports d'alimentation de la batterie et du câble avec des sources d'alimentation tel que décrit aux tests T2 et T3. Appuyer sur le bouton et vérifier que l'alimentation au drone se fait bien transférer de la batterie au câble. On peut s'assurer que	<input type="checkbox"/>

	l'alimentation à faible courant		cela se fait bien en utilisant des tensions légèrement différentes aux deux sources et en mesurant la tension à la sortie.	
			Fermer la source d'alimentation du câble et vérifier que l'alimentation se fait transférer à celle de la batterie. Un oscilloscope peut aussi être branché à la sortie pour mesurer le temps de commutation entre les deux sources.	<input type="checkbox"/>
T5	Test d'alimentation à puissance nominale	Cette série de tests sert à prouver que le PCB peut transporter la puissance nominale étant consommée par le drone.	Alimenter le PCB aux ports prévus pour la batterie et pour le câble avec des sources d'alimentation de 60V limitées à un minimum de 15A et utiliser des fusibles pouvant tolérer un minimum de 20A. Appliquer une charge pouvant 12A, soit le courant nominal tiré par le drone. Cela peut être réalisé en utilisant une charge de 5 Ohms pouvant dissiper 720 Watts si 60V est appliqué à l'entrée. Une charge électronique peut aussi être utilisée. Alimenter la charge pendant 2 minutes et vérifier avec une caméra thermique, si disponible, ou par autres moyens que le circuit ne dépasse pas des températures de 75 degrés Celsius.	<input type="checkbox"/>
			Appuyer sur le bouton afin de transférer l'alimentation au câble et laisser le câble alimenter la source pendant 2 minutes. Vérifier que la température ne dépasse pas 70 degrés Celsius.	<input type="checkbox"/>
			Couper l'alimentation du câble et vérifier que la source se fait bien alimenter par la source simulant la batterie.	<input type="checkbox"/>
T6	Test d'alimentation à puissance élevée	Cette série de tests sert à prouver que le PCB peut transporter de la puissance supérieure à la puissance nominale du drone. Cela va servir à tester le PCB dans des conditions où le drone consomme plus que la puissance nominale, tel que quand il est en ascension.	Répéter le test T5 avec un courant de 20A pour les deux sources d'alimentation. Vérifier que les fusibles sont bien dimensionnés et que la charge peut dissiper autant de chaleur. Vérifier que la température du PCB ne dépasse pas 80 degrés Celsius.	<input type="checkbox"/>

T7	Test d'alimentation par la batterie	Cette série de tests sert à prouver que le PCB peut prendre la batterie faite par DJI du drone Matrice 300.	Répéter le test T5 avec la batterie du drone de DJI.	<input type="checkbox"/>
T8	Test de secousse	Ce test sert à prouver que le PCB pourra résister aux secousses subites par le drone lors d'un vol.	Secouer le PCB, puis inspecter visuellement les pièces du PCB et confirmer que les connections sont encore bonnes et que les pièces sont toujours en place.	<input type="checkbox"/>
T9	Test d'étanchéité	Une fois le PCB assemblé et scellé dans son étui, il sera important de pouvoir prouver que le circuit pourra tenir aux éclaboussements du jet d'eau de le boyau à pression.	Vaporiser l'étui du PCB avec un vaporisateur contenant de l'eau et confirmer visuelle qu'aucune eau ne peut entrer dans l'étui. Si possible, ouvrir le PCB et inspecter visuellement que le circuit est bel et bien au sec, sinon tester le PCB (le test T5 peut être effectué à nouveau) et confirmer que tout fonctionne comme prévu.	<input type="checkbox"/>
T10	Test de fonctionnalité sur le drone	Une fois le PCB testé en laboratoire, il faudra essayer le PCB sur le drone.	Connecter les PCB de droite et de gauche sur le drone. Allumer le drone sans le armer (partir les hélices). Vérifier que la puissance peut être transférée entre l'alimentation du câble et de la batterie.	<input type="checkbox"/>
			Armer le drone, et valider que le drone peut décoller et qu'il peut maintenir un bon équilibre en étant alimenté par la batterie.	<input type="checkbox"/>
			Appuyer le bouton pour alimenter le drone par la source d'alimentation du câble, puis déconnecter la source d'alimentation du câble et valider que le drone peut continuer son vol en étant alimenté par la batterie.	<input type="checkbox"/>

CHAPITRE 6

POURSUITE DU PROJET

6.0 Généralités de la poursuite du projet

Nous croyons fortement que la fabrication du système d'alimentation du drone par WINDO serait très bénéfique pour la compagnie, leur permettant de sauver plusieurs milliers de dollars sur les systèmes d'alimentations qui auraient autrement été achetés, et leur permettant de développer une expertise technique pouvant être commercialisée.

Dans le cadre du projet de fin d'études réalisé pour WINDO, nous avons élaboré une première version du système d'alimentation du drone, durant laquelle nous avons pu identifier des points pouvant être améliorés lors de la conception d'une deuxième version du système, ainsi que des recommandations lors de l'implémentation finale du système dans le drone. Ces points seront détaillés dans cette section du rapport afin d'augmenter les chances de succès d'une future conception par la compagnie WINDO.

6.1 Analyse du système conçu lors du cours

Dans le cadre de notre projet de fin d'études, nous avons pris la décision d'implémenter le circuit de sélection d'alimentation en utilisant un relais comme bascule d'alimentation afin de respecter le budget établi par le client. Un circuit permettant de couper l'alimentation de la batterie à l'aide d'un transistor aurait été une solution plus coûteuse, mais nous ne sommes pas parvenus à trouver un circuit intégré pouvant contrôler un circuit à une telle puissance, et même en utilisant les conseils d'experts mis à notre disposition lors de notre projet de fin d'études, nous n'avons pas pu trouver une solution utilisant des semi-conducteurs pouvant être complétés en respectant le temps nous étant offert et en respectant le budget du client.

Le risque principal d'utiliser des relais vient avec le temps de commutation du relais, étant de 10 millisecondes selon la fiche technique du relais que nous avons sélectionné. Lors de la conception, il n'y a pas de façon de savoir si ce délai, lors duquel le drone ne sera pas alimenté, sera de trop longue durée pour assurer la sécurité du drone. Cela cause un risque si un des contrôleurs du drone redémarre et que le drone perd l'information qu'il est en plein vol. Si le drone se rappelle qu'il est en vol, il y a également le risque que le temps de commutation soit trop long pour que le drone puisse se redresser à temps, et puisque le drone de DJI est un système dont la conception n'est pas à source ouverte, la seule façon de confirmer que ces risques ne posent pas de problème est de tester le système développé lors du PFE sur le drone.

Un relais peut également avoir une durée de vie plus courte que les semi-conducteurs tout dépendamment de l'utilisation. Le risque est que si le contact du relais change lors d'une forte demande en puissance, un arc électrique peut se produire pendant le changement de contact, ce qui peut endommager le relais après un grand nombre d'utilisations.

Cependant, utiliser un relais a ses avantages. Les relais électromécaniques sont plus simples d'utilisation, sont moins dispendieux, plus légers et beaucoup moins volumineux que les relais à semi-conducteurs « *solid state* » ayant des caractéristiques similaires. C'est pourquoi nous avons décidé de tester l'option à relais ; si elle fonctionne comme prévu, WINDO pourrait continuer le projet avec un design présentant beaucoup d'avantages.

6.2 Option alternative à semiconducteurs et recommandations pour le futur du projet

6.2.1 Conceptions électriques

Pour des raisons mentionnées plus haut, une option à semi-conducteurs serait bénéfique si l'option à relais ne fonctionne pas. Dans ce cas, un relais du type « *solid state* » pourrait être utilisé pour venir couper l'alimentation de la batterie. Une implémentation à logique inverse (à cause de son design normalement ouvert) du relais RM1D200D50 (DigiKey, 2023) pourrait être utilisée, ou bien une implémentation de la puce TPSI3050DWZR (DigiKey, 2023) avec des MOSFET P-Channel afin de donner une logique normalement-ouverte à la batterie.

Nous recommandons tester les circuits au sol en changeant de source d'alimentation entre la batterie et le câble et en observant le bon comportement des relais avant de faire décoller le drone. Nous recommandons également de faire la commutation entre la source d'alimentation au sol et la batterie pendant que le drone n'est pas armé (que les hélices ne peuvent pas tourner) pour limiter le courant pendant la commutation du relais afin de prolonger sa durée de vie utile.

Nous recommandons également d'installer des fusibles pouvant tolérer jusqu'à trois fois le courant maximum du drone, voire à court-circuiter les fusibles une fois le prototype testé, puisqu'un fusible qui se déclenche en plein vol entraînerait presque assurément la perte du drone.

6.2.2 Conceptions mécaniques

Les conceptions mécaniques devront être imprimés et attachés au drone afin de voir si les dimensions, les attaches et le mécanisme de glissement sont compatibles avec le drone.

Il serait idéal de réduire la distance le plus possible entre la batterie et le drone sur le boîtier de bascule d'alimentation (Figure 8) pour éviter que la batterie amène trop de poids vers l'arrière du drone.

En ce qui concerne le boîtier d'alimentation DC/DC, il y aurait la possibilité de faire une installation entre le drone et le boyau installé par le client. Une nouvelle conception devra être faite, mais il pourrait s'attacher aux mêmes vis utilisées pour tenir le boyau en place. Cette méthode nécessite un assemblage plus complexe, mais permettrait de minimiser les risques d'entrer d'eau due aux éclaboussures.

CHAPITRE 7

CONCLUSION

7.0 Récapitulatif du projet et apprentissages

Dans le cadre du projet d'alimentation en continu d'un drone pour WINDO, nous avons pu développer nos connaissances en alimentation électrique en concevant un système de traitement de l'alimentation électrique qui servira à transporter de la puissance sur une longue distance pour le drone de WINDO. Nous avons pu identifier les pièces qui serviront à élever la tension afin de diminuer les pertes ohmiques dans le câble, pour ensuite abaisser la tension pour donner une tension d'alimentation utile au drone.

Ce projet nous a été très utile afin de pouvoir identifier les points critiques d'un système d'alimentation. Du convertisseur au sol jusqu'au drone, nous avons dû faire des calculs en fonction des mesures de puissance nous ayant été donné par WINDO ainsi qu'avec des hypothèses qui devront être validées lors d'un essai plus en profondeur du circuit. Nous avons dû dimensionner chaque pièce tout au long de la chaîne d'approvisionnement en énergie, en nous assurant que chaque partie du système pouvait résister à la tension lui étant injectée ainsi qu'au courant en continu et au courant pic pouvant la traverser. Notre étude sur les points critiques du système nous a également emmenés à concevoir un circuit imprimé pouvant faire la commutation entre l'alimentation au sol et l'alimentation d'une batterie montée sur le drone.

Ce projet en collaboration avec la compagnie WINDO nous a permis de découvrir l'aspect légal d'un projet étant développé pour un client, ce qui nous a emmenés à discuter d'une entente de confidentialité et d'une entente de cession de droits avec le client. Le projet nous a également initiés à la documentation qu'un tel projet peut entraîner.

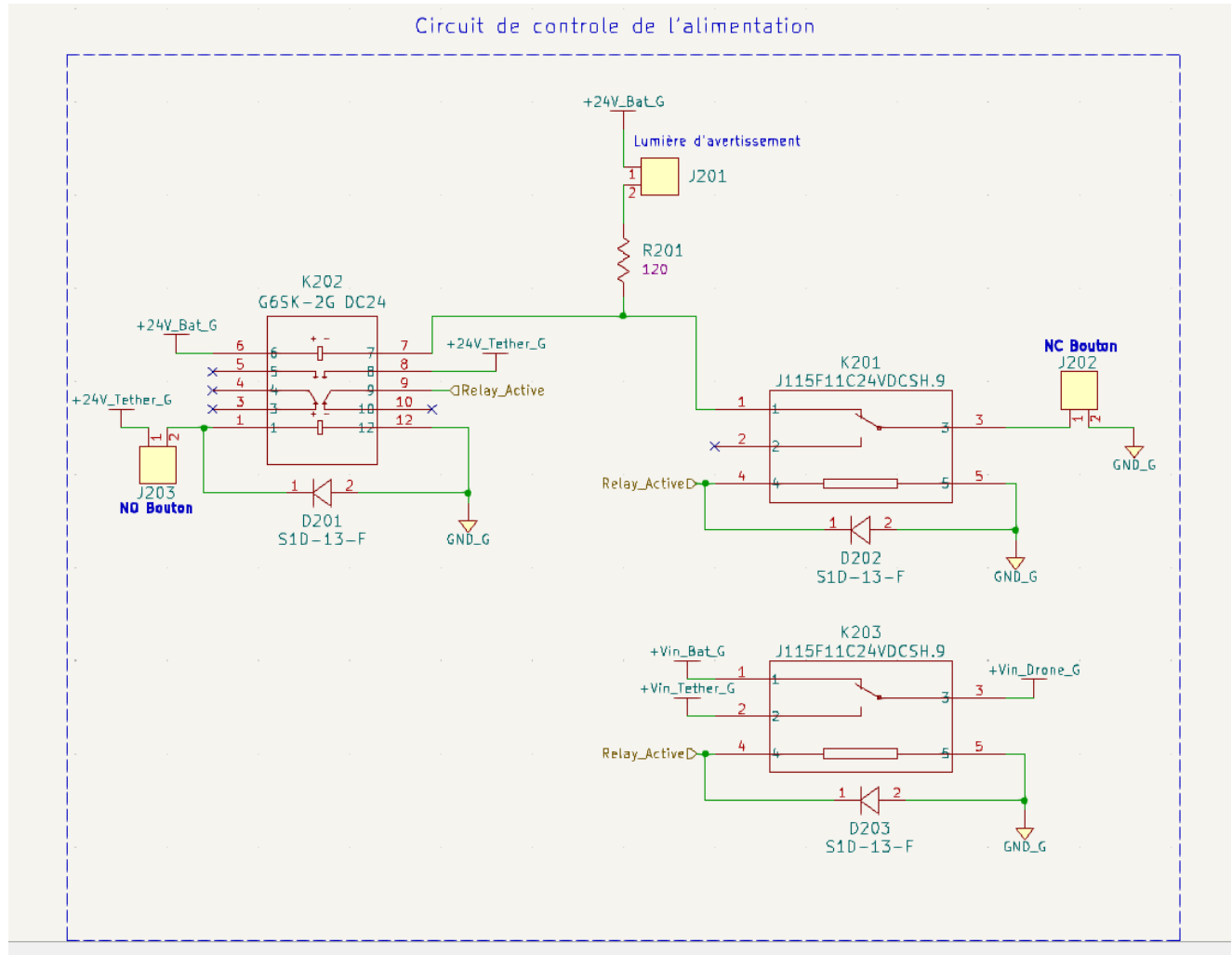
7.1 Cessation du projet et suite du projet pour WINDO

Lors de la fin du cours, nous cédonos nos recherches sur le choix de composantes électriques pour traiter les différentes parties de l'alimentation du système à WINDO, ainsi que la documentation et le circuit imprimé assemblé du circuit de commutation de l'énergie. Cependant, il reste beaucoup de travail à accomplir avant de pouvoir faire voler le drone à de grandes hauteurs sur un tel système. Sur les dix séries de tests devant être effectuées, nous n'avons pu en compléter quatre, donc les tests T5 à T10 seront à valider. Le circuit a réussi à passer les tests permettant de faire basculer l'alimentation entre les deux sources, mais l'utilisation du bouton pour faire basculer l'alimentation n'a fonctionné que la première fois que le circuit a été testé, c'est-à-dire que lorsqu'on déconnecte l'alimentation du câble, l'alimentation revient à la batterie comme on le voudrait, mais si l'alimentation du câble revient par la suite, l'alimentation du câble va reprendre le relai pour alimenter le drone, rendant le bouton inutile. C'est un aspect de sécurité qui pourrait être très utile si l'alimentation du câble est intermittente, c'est pourquoi nous recommandons à WINDO d'implémenter cet aspect du circuit.

Il restera également à acheter l'alimentation AC-DC au sol, de fabriquer le circuit d'alimentation DC-DC sur le drone et d'acheter le câble d'alimentation. Un deuxième circuit imprimé sera à assembler afin de pouvoir connecter la partie droite et la partie gauche du drone, lors de laquelle nous recommandons à WINDO de commander des circuits imprimés comportant un masque de soudure et des traces comportant 2 oz de cuivre par pouce carré (2 po/in²) pour une meilleure dissipation thermique.

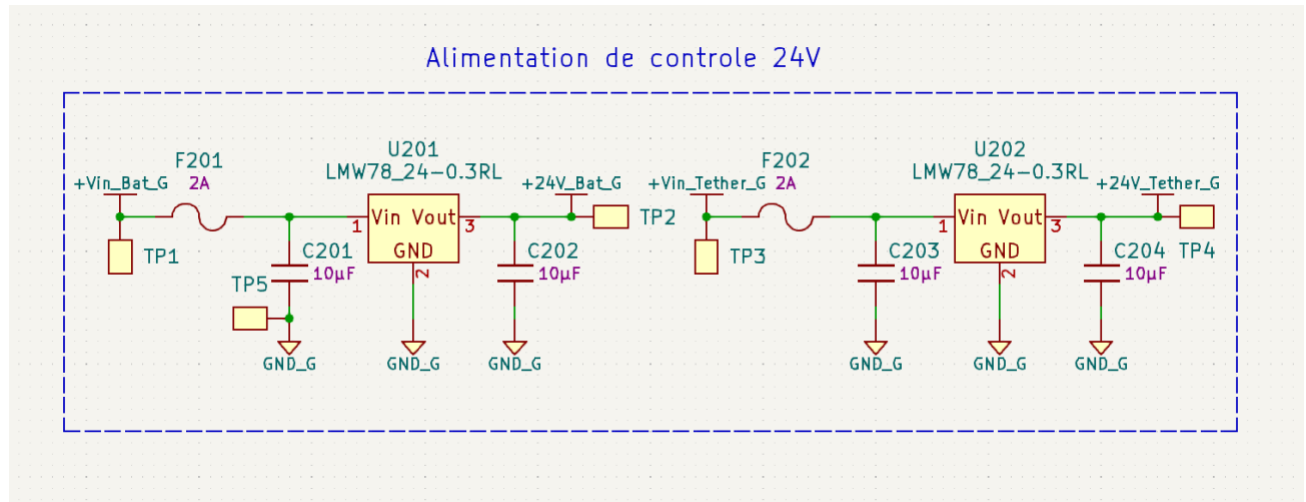
ANNEXE I

CIRCUIT DE BASCULE D'ALIMENTATION



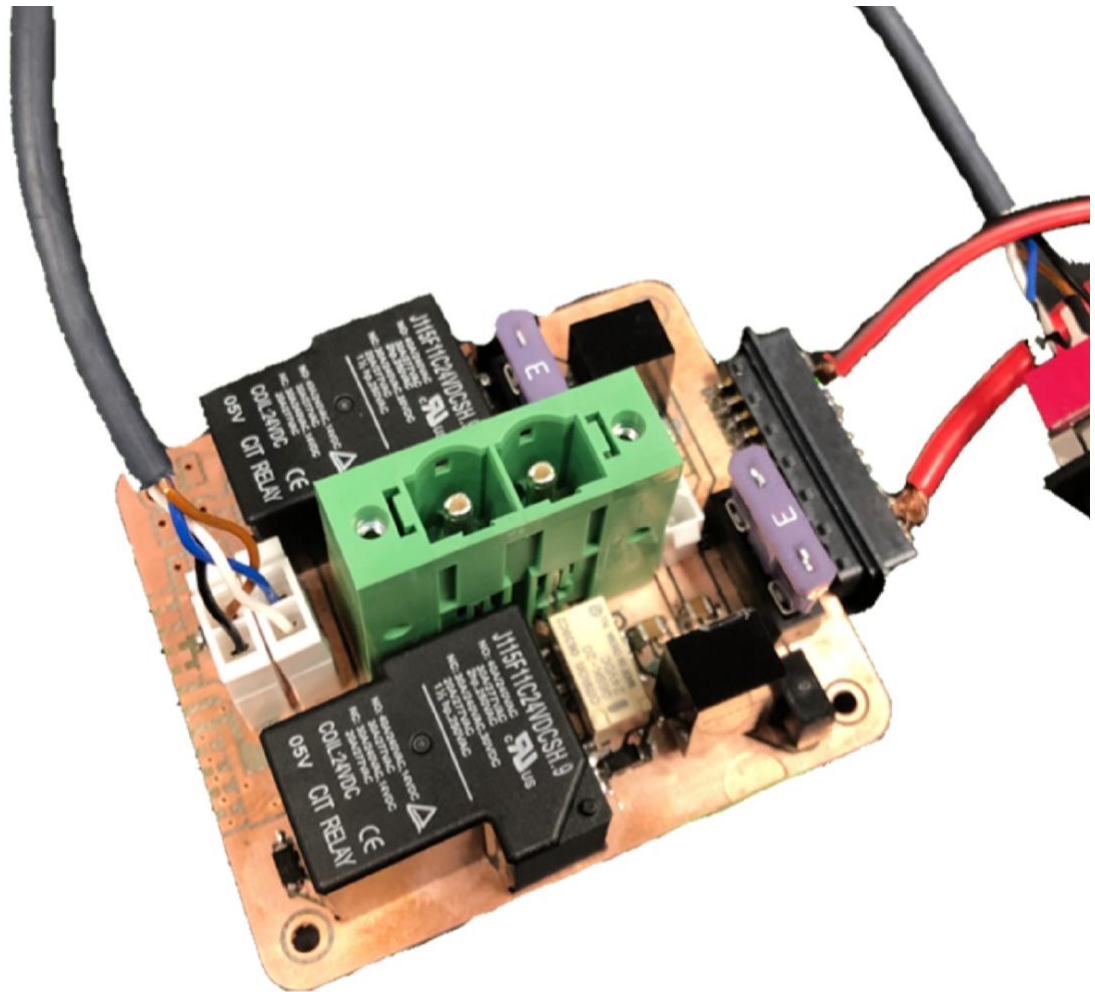
ANNEXE II

ALIMENTATION DE CONTROLE



ANNEXE III

PROTOTYPE DU CIRCUIT DE BASCULE D'ALIMENTATION



ANNEXE IV

DJI MATRICE 300 AVEC LES BOÎTIERS CONCEPTUALISÉS EN ORANGE



BIBLIOGRAPHIE

- OmniView Tech, 2023. « BLUE VIGIL DRONE TETHER SYSTEM WITH DJI INSTALL KIT » En ligne. Disponible : <https://omniviewtech.ca/products/blue-vigil-drone-tether-system-with-dji-install-kit>
- Directives RoHs. (2023, 6 août). *Directives RoHS*. [Wikipedia]. Repéré à https://fr.wikipedia.org/wiki/Directive_RoHS
- ELISTAIR. (s.d.). LIGH-T 4 Tether Station. *ELISTAIR*. Repéré à <https://elistair.com/solutions/tethering-station-ligh-t/>
- UAVForDrone. (s.d.). Tethered drone Power station system for DJI Matrice 300 RTK. *UAVForDrone*. Repéré à <https://www.uavfordrone.com/product/portable-backpackable-tethered-system-for-dji-m300-drone/>
- DJI, 2023. « Matrice 300 Series TB60 Intelligent Flight Battery » En ligne. Disponible : <https://store.dji.com/ca/product/m300-tb60-intelligent-flight-battery>
- DJI, 2023. « Matrice 300 RTK » En ligne. Disponible : <https://enterprise.dji.com/matrice-300>
- Sensata Technologies Inc., 2020 « 1-DC | SERIES Panel Mount Datasheet ». En ligne 7p. <https://www.sensata.com/sites/default/files/a/sensata-1-dc-series-panel-mount-datasheet.pdf>
- Texas Instruments, 2017 « TI Designs : TIDA-00779 ». En ligne 25p. <https://www.ti.com/lit/ug/tidube1c/tidube1c.pdf>
- Vicor Corporation, 2019 « BCM® Bus Converter, BCM6123xD1E5135yzz ». En ligne. 30p. https://www.vicorpower.com/documents/datasheets/ds_BCM6123xD1E5135yzz.pdf
- The Engineering ToolBox 2008 « Resistance vs. Resistivity ». En ligne Disponible : https://www.engineeringtoolbox.com/resistance-resisitivity-d_1382.html
- Digikey 2023 « PCB Trace Width Calculator ». En ligne disponible : <https://www.digikey.ca/en/resources/conversion-calculators/conversion-calculator-pcb-trace-width>

Digikey 2023 « SSR RELAY SPST-NO 50A 1-200V, RM1D200D50 ». En ligne disponible:
<https://www.digikey.ca/en/products/detail/carlo-gavazzi-inc/RM1D200D50/13277982?s=N4IgTCBcDaIEoFkCMARMAGdKCs6QF0BfIA>

Digikey 2023 « Isolated Switch Driver, TPSI3050DWZR ». En ligne disponible:
<https://www.digikey.ca/en/products/detail/texas-instruments/TPSI3050DWZR/17748420>

IPC-2221 Task Group, (2003). « IPC-2221A Generic Standard on Printed Board Design »

ROHM Semiconductor, (2023). « Topology Selection » En ligne Disponible :
<https://www.rohm.com/topology>

Jovicic, D. & Ahmed K., (2015). High Voltage Direct Current Transmission: Converters, Systems and DC Grids 456 p.

Rudervall R. Charpentier J.P. & Sharma R, (2000). « High Voltage Direct Current (HVDC) Transmission Systems Technology Review Paper » En ligne. Disponible :
<http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/hamerly1/docs/energyweek00.pdf>