

RAPPORT DE PROJET

Bachelor 3 – Systèmes Embarqués & Robotique – Session 2018

PROJET ROBOTIQUE : LA ROBOCUP

PARTIE PERSONNELLE

Les ESC

Et la mécanique

Coéquipiers :

*Samuel HUET
Thomas COUTANT
Antoine VENIER*

Encadrants :

*Steve N'GUYEN
Aloïs MICLO
Pierre AUBRY*

Remerciements

Tout d'abord je voulais remercier Le *Campus YNOV Bordeaux*, et *ESTEI / YNOV Aéronautique et Systèmes Embarqués* de m'avoir permis d'effectuer cette formation de *Bachelor 3 Systèmes Embarqués et Robotique* en son sein, et particulièrement M. Yannick Nay et M. David Coue qui représentent le groupe *YNOV*. M. Coue n'a d'ailleurs jamais hésité à donner un peu de son temps pour réexpliquer des points d'électronique mal compris.

Je tenais également à remercier l'équipe pédagogique, dont tous les professeurs que nous avons eu cette année, ainsi que M. Pierre Aubry, responsable pédagogique, pour avoir passé des heures à se creuser la tête à nos côtés. Un grand merci également à M. Aloïs Miclo pour son aide au quotidien durant ce projet, pour sa patience et ses petits tutoriels. Ma gratitude va également à M. Steve N'Guyen, Chercheur en robotique et membre de l'équipe double championne du monde *Rhoban* car il a été très présent pour nous, même hors de ses heures de présence et même parfois hors des heures de travail conventionnelles.

Merci à mes collègues de B3 pour leur aide et leur bonne humeur, spécialement à Matthieu Castets, Clément Millereux et Nicolas Gibaud, pour le travail en coopération, le temps passé à chercher ensemble des solutions à nos problèmes, et pour cette émulation qui nous a permis à tous de vouloir avancer, progresser et développer de nouvelles compétences. Enfin merci à mon équipe, Samuel Huet, Thomas Coutant et Antoine Venier, pour cette bonne ambiance, l'entraide, les coups durs et les frustrations, mais surtout pour avoir tous avancés ensemble, avec la fatigue, mais avec le sourire.

Sommaire

Remerciements.....	2
Sommaire	3
Introduction.....	5
1-Rappel du contexte	6
1.1-Formation.....	6
1.2-Intervenants	6
1.3-Le projet en général	6
1.4-Cahier des charges	8
1.4.1-Cahier des charges du projet.....	8
1.4.2-Cahier des charges, partie personnelle	9
1.4.3-Planification.....	10
2-Choix des éléments.....	10
2.1-Études préliminaires	10
2.1.1-Les roues et déplacements holonomes.....	10
2.1.2-Le moteur brushless.....	12
2.1.3-Le demi pont en H	14
2.1.4-L'encodeur.....	17
2.1.5-l'ESC	19
2.2-Choix des composants	20
2.2.1-Le moteur.....	20
2.2.2-L'ESC	23
2.3- Choix matériel et solutions techniques	25
2.3.1-Les roues holonomes	25
2.3.2-Les moyeux.....	26
2.3.3-Les supports moteurs	26
2.3.4-Le châssis.....	27
3-Conception.....	27
3.1-Conception électronique	27
3.1.1-Logiciel	27
3.1.2-Diagramme Fonctionnel	27
3.1.3-Schéma structurel	31
3.1.4-Typon	32
3.1.5-Représentation 3D	32
3.2-Conception 3D.....	32
3.2.1-Logiciel	32
3.2.2-Support Moteur.....	33
3.2.3-Le châssis.....	34

4-Production de la carte électronique	37
4.1-Matériel à disposition	37
4.2-Protocole de production d'une carte à partir du matériel	37
4.3-Plan de perçage et overlays	38
5-Tests, bugs, recherche de solutions.....	40
5.1-Première Carte	41
5.2-Comparaison avec l'ESC d'un collègue.....	42
5.3-Deuxième carte	43
5.4-Troisième carte	44
6-Gestion de projet.....	45
6.1-Bon de commande	45
6.2-Calendrier	46
Conclusion	47
Annexe 1 : Datasheet Du Driver A4931	48
Annexe 2 : Moteur Brushless.....	1
Annexe 3 : Moteur Brushless.....	2

Introduction

Ce rapport de projet a été réalisé dans le cadre du *Bachelor 3 Systèmes Embarqués et Robotique*, diplôme donnant lieu à 60 crédits ECTS, réalisé au sein de l'école *ESTEI / YNOV Aéronautique et Systèmes Embarqués*. Dans le cadre de ce projet de fin d'études, il nous a été demandé de concevoir un prototype fonctionnel correspondant à un cahier des charges, et dont le but est de participer en 2020 à la *RoboCup* à Bordeaux, catégorie SSL (*Small Size League*).

Pour cela nous avons été regroupés en équipes de 4 personnes. Mes coéquipiers ont été Samuel Huet, Thomas Coutant et Antoine Venier.

1-Rappel du contexte

1.1-Formation

L'ESTEI, École Supérieure des Technologies Électronique, Informatique et Infographie, forte d'une expérience de plus de 70 ans dans l'enseignement supérieur, propose deux cursus complets dans les domaines de l'Infographie et des Sciences : la filière Infographie/Multimédia et la filière Informatique/Systèmes Embarqués. En 2017/2018, l'ESTEI intègre le *Campus YNOV de Bordeaux*, groupement d'écoles d'envergure nationale.

La formation *YNOV Aéronautique et Systèmes Embarqués*, et plus précisément le *Bachelor 3*, donnant lieu à 60 crédits ECTS, intitulé "*Systèmes Embarqués et Robotique*", permet de maîtriser les aspects logiciels et matériels des systèmes à microcontrôleur et des dispositifs communicants sans-fil. Cet enseignement en systèmes embarqués est accessible à tout étudiant d'un niveau Bac+2 dans le domaine de l'informatique et de l'électronique. Finalisé par un projet robotique, ce diplôme offre de solides bases pour une poursuite d'étude ou une entrée dans la vie active avec des compétences adaptées à la réalité du marché.

C'est dans le cadre du projet robotique et de la validation du diplôme que ce rapport de projet a été réalisé.

1.2-Intervenants

Durant ce projet, nous avons eu le concours de l'équipe pédagogique, et en particulier de M. Aloïs Miclo, Apprentis au sein de *YNOV Aéronautique et Systèmes Embarqués*, chargé de la supervision de nos séances et de M. Pierre Aubry, responsable pédagogique de la formation.

Nous avons également reçu l'aide d'un intervenant extérieur, M. Steve N'Guyen, chercheur en robotique, membre de l'équipe Rhoban, qui a été notre référent technique tout au long du projet.



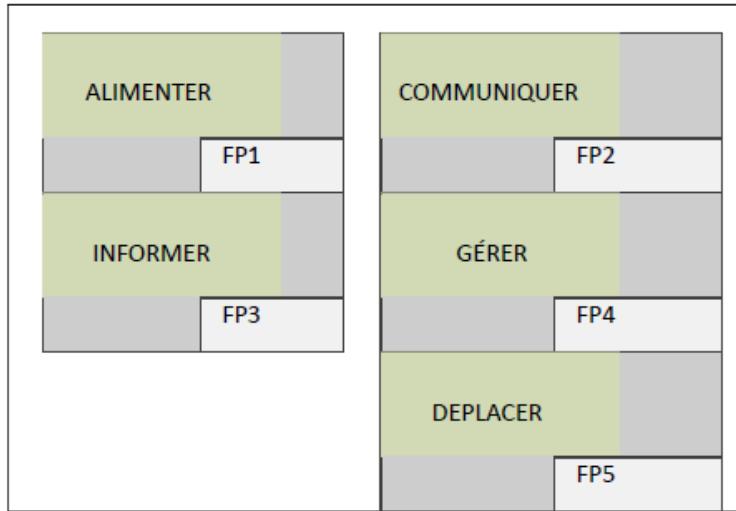
1.3-Le projet en général

En résumé, le but principal de ce projet était de réaliser un robot motorisé, dans le cadre des règles fixées pour la *RoboCupSoccer*, dans la catégorie *Small Size League* (F180 League).

La *Robocup* est une compétition internationale, conçue pour mettre en évidence les progrès en robotique et en intelligence artificielle. Elle se divise en plusieurs catégories allant des robots humanoïdes de différentes tailles, jusqu'à de petits robots holonomes. Les robots possèdent un microcontrôleur lié à divers capteurs et actionneurs leur permettant de conserver la balle et de l'envoyer à un autre robot ou de marquer un but. Les règles sont précises et données sur le site officiel parmi lesquels on retrouve des problématiques de dimension, mais également de vitesse. Cependant dans le cadre de notre prototype, le cahier des charges est légèrement amoindri afin de nous faciliter la tâche. Le robot final quant à lui devra respecter toutes les règles du jeu pour avoir éventuellement la chance de participer à la *Robocup 2020* à Bordeaux.

Globalement, la ligue robotique consiste en des équipes de 6 robots s'affrontant dans un match de football. Les robots sont holonomes (capables de se déplacer dans toutes les directions) et sont contrôlés par un ordinateur distant. Le PC distant a une vision parfaite de la position des robots et de la balle, donnée par des caméras positionnées au-dessus du terrain. Les robots doivent être cylindriques, de diamètre et de hauteur 25 cm maximum.

La promotion est constituée de seize étudiants. Nous avons été séparés en quatre groupes, chargés de réaliser un robot par groupe. Pour réaliser ce robot nous avions à disposition un dossier étudiant, fournissant diverses informations, et notamment le découpage fonctionnel des tâches à accomplir suivant :



➤ **FP1 :**

Assure l'alimentation autonome et complète de l'ensemble de l'objet technique avec une autonomie de 20/35 min. Elle fournit tous les courants et tensions nécessaires à l'ensemble des cartes présentes dans le boîtier. Assure la mesure de l'énergie disponible ou de l'autonomie du robot. Assure également la charge et la gestion de l'état de la batterie.

➤ **FP2 :**

Assure la communication sans fil :

- des informations de l'état de l'objet technique,
- la restitution des ordres transmis par l'utilisateur.

➤ **FP3 :**

Assure la mesure et l'affichage d'informations sur l'état et l'activité du véhicule et permet l'entrée des commandes utilisateur de manière intuitives.

➤ **FP4 :**

Basé sur un microcontrôleur, elle assure la gestion des différentes entrées/sorties des cartes présentes sur le robot et les appels à l'ensemble des fonctions : assure l'ordonnancement des différentes parties du robot.

➤ **FP5 :**

Assure la mobilité omnidirectionnelle du robot.

➤ **FP6 :**

Assure la capture de la balle ainsi que son tir.

Ces tâches ont été réparties en quatre parties à répartir entre chaque élève du groupe. Cette répartition a permis une double collaboration. Tout d'abord une collaboration verticale, car la relation de groupe était primordiale pour l'intégration de chaque partie et les liens entre chaque élément du robot, mais aussi une collaboration transversale car nous avons pu travailler en étroite collaboration avec les membres des autres groupes chargés de la même partie du projet que nous.

La répartition des tâches a été effectuée de la manière suivante :

Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4
Samuel Thomas Antoine Jean-Gabriel	Clément C Pierre-Louis Clément M Vincent	Axel Jean Nicolas Clément L	Joris Yassine Éric Mathieu

Fonctions	Détails	Etudiant (Groupe 1)	Etudiant (Groupe 2)	Etudiant (Groupe 3)	Etudiant (Groupe 4)
FP5	Brushless (fournis) + roues (non-fournies) + Encodeur + ESC « home made » (x4)	MASSICOT Jean-Gabriel	MILLEREAUX Clément	GIBAUD Nicolas	CASTETS Mathieu
FP3	Gestion moteur haut niveau (PWM + PID) + Calcul du déplacement + capteurs optiques (type souris)	VENIER Antoine			
FP6	Dribleur (capteur + méca) + Kicker (solénoïde + électronique + méca)	COUTANT Thomas			
FP1 + FP2 + FP4	Com RF (contrôle PC + Visio) + Carte-mère (gestion batterie puissance)	HUET Samuel			

Ainsi dans mon groupe, Samuel Huet était chargé de la partie alimentation et carte mère, Thomas Coutant était chargé de la partie *kicker* et *dribbler*, Antoine Venier était chargé de la partie calcul du déplacement, des capteurs optiques, et de la gestion du moteur (PWM, PID), et j'étais chargé de la chaîne de mouvement roue-moteur-ESC-encodeur.

Dans les autres groupes, les étudiants chargés de la même partie que moi sont Clément Millereux, Matthieu Castets et Nicolas Gibaud.

1.4-Cahier des charges

1.4.1-Cahier des charges du projet

Un dossier nous a été remis, nous expliquant les problématiques à étudier, ainsi que certains points du cahier des charges, comme par exemple un budget de 500€ pour l'ensemble du projet et pour l'ensemble du groupe.

Le cahier des charges proposé est le suivant :

- ✓ Fournir une étude complète pour la conception des cartes électroniques embarquées avec des microcontrôleurs de la famille CISC. Ces cartes embarquées dans un/des boîtiers doivent assurer la mobilité du véhicule dans les modes autonome et radiocommandé ;
- ✓ Déterminer l'IHM permettant l'envoie de commande ainsi que le monitoring de l'état du système ;
- ✓ Déterminer la loi de contrôle permettant un déplacement omnidirectionnel du véhicule ;
- ✓ Déterminer le système de communication directionnel entre objet technique et console ;
- ✓ Déterminer le système de prise et de tir de la balle ;
- ✓ Produire des systèmes autonomes tant en termes d'alimentation que de développement.

Conformément au cahier des charges, il est demandé la création d'un prototype afin de parvenir à un système global satisfaisant.

Les travaux demandés seront réalisés par groupe.

Aussi, le travail au sein d'une équipe devra être coordonné entre les étudiants. Les tâches confiées doivent à minima respecter les contraintes du cahier des charges. Toutefois, une amélioration de la solution (technologique et/ou économique) peut être proposée par l'étudiant. Les étudiants devront compléter, au travers d'une série de questions, les éléments du cahier des charges manquants.

La répartition matérielle et logicielle est établie lors de la présentation du présent projet. Une fois affecté, cette répartition est définitive.

Les choix technologiques et matériels sont définis, en conformité avec les contraintes imposées par le cahier des charges et validé par le corps enseignant. En revanche, ces choix devront être strictement justifiés, en particulier lors de l'épreuve orale.

Il est demandé à chaque équipe de fournir :

- une étude détaillée des contraintes données par le cahier des charges et d'obtenir une définition plus précise de celui-ci ;
- une analyse fonctionnelle détaillée de la réalisation projetée ;
- une analyse structurelle précise des schémas proposés ;
- une justification précise et détaillée des choix technologiques effectués pour la réalisation demandée ;
- une analyse logicielle sous forme d'algorithme en liaison avec la structure proposée ;
- des documents de fabrication (schémas, PCB, schémas d'implantation...) de qualité professionnelle ;
- des listings de programmes correctement annotés ;
- des procédures de réglage et de mise au point ;
- des procédures de test de conformité ;
- une notice d'utilisation avec éventuellement une notice technique complémentaire ;
- une réalisation complète en état de fonctionnement (sous forme de maquette, éventuellement sous forme de prototype si le travail est suffisamment avancé).

1.4.2-Cahier des charges, partie personnelle

-Possibilité pour le robot de se mouvoir de façon holonome.

-Le robot doit être équipé de quatre roues holonomes montées directement sur des moteurs brushless.

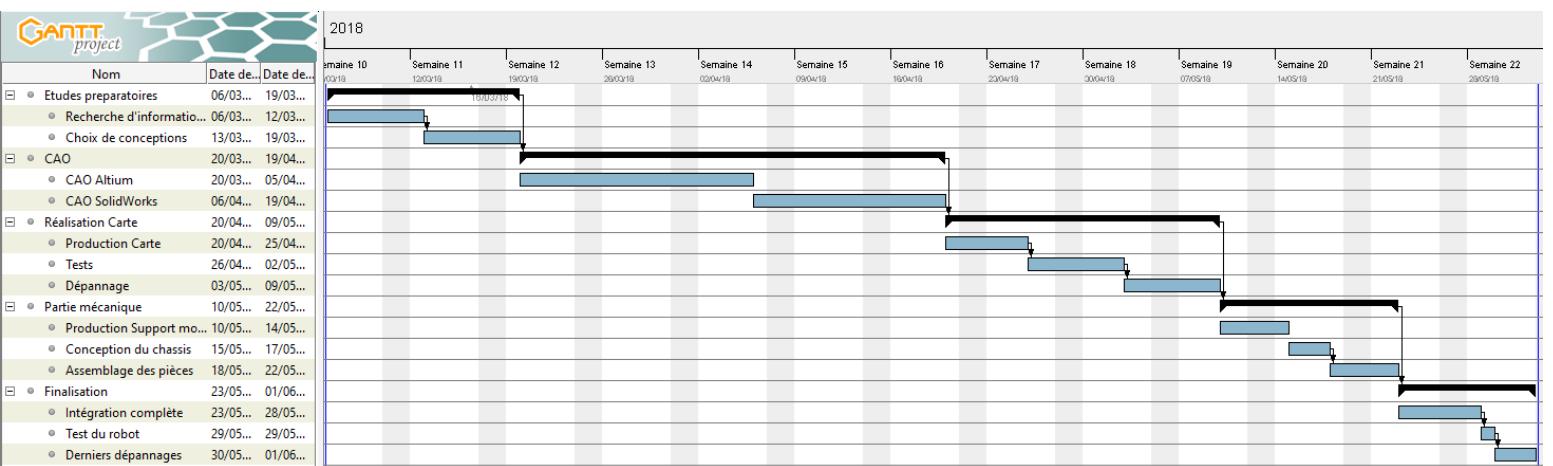
-Le robot sera de forme cylindrique (diamètre et hauteur 25cm).

- Le robot sera équipé de capteurs à effet Hall ainsi que d'un capteur angulaire magnétique (encodeur).
- Le modèle du moteur est imposé
- Le modèle des encodeurs est également imposé, mais en deux versions possibles selon le bus de communication choisis par les équipes.

Pour cela il est demandé la création de prototypes et de fournir les éléments demandés dans le cahier des charges général du projet.

1.4.3-Planification

Pour le bon déroulement du projet, il a fallu faire une planification prévisionnelle. J'ai donc établi cette planification à l'aide du logiciel *GanttProject*, et en concertation avec les autres membres du groupe. Voici donc le diagramme de Gantt de la planification prévisionnelle :



Ce diagramme de Gantt sera à comparer avec la planification réelle.

2-Choix des éléments

2.1-Études préliminaires

2.1.1-Les roues et déplacements holonomes

Une plateforme robotique ou un engin de manutention est dit holonome s'il est capable de se diriger non seulement sur deux axes, mais aussi autour d'un troisième axe vertical. Cela lui permet de pouvoir bouger dans toutes les directions avec un minimum de mouvements et une surface de manœuvre minimale. Il possède une translation avant/arrière, une translation gauche/droite, et une rotation horaire/anti-horaire.

Il existe plusieurs possibilités pour la partie motrice pour réaliser un robot holonome. Par exemple un robot peut posséder des « pattes », ou dont toutes les roues seraient directrices. Plus original, il existe également des robots rampants. Mais nous nous intéresserons d'avantage aux roues holonomes.

Une roue holonome est un mécanisme constitué d'un moyeu disposant d'un chapelet de galets répartis sur sa périphérie. Utilisée pour les plateformes robotiques ou les engins de manutention, elle confère au véhicule des possibilités de déplacements dans un espace plus compact. Sur de tels engins, les axes de roues sont fixes : le mouvement global du chariot dépend uniquement de la combinaison des mouvements de rotation de chaque roue. Les lois de commandes dépendront du nombre de roues, de leur disposition, et de la configuration des axes de galets. La partie sur les lois de commande a été traitée dans la partie de mon collègue, Antoine Venier.

Il existe deux architectures de roues principales : en hélice, autrement appelée « roues mecanum », ou en tangentialles. Les roues mecanum sont plutôt utilisées pour une disposition parallèle par paires de roues. Les roues tangentialles sont, elles très utiles pour une disposition en X.

Un exemple de roue mecanum :



Crédit : aliexpress.com

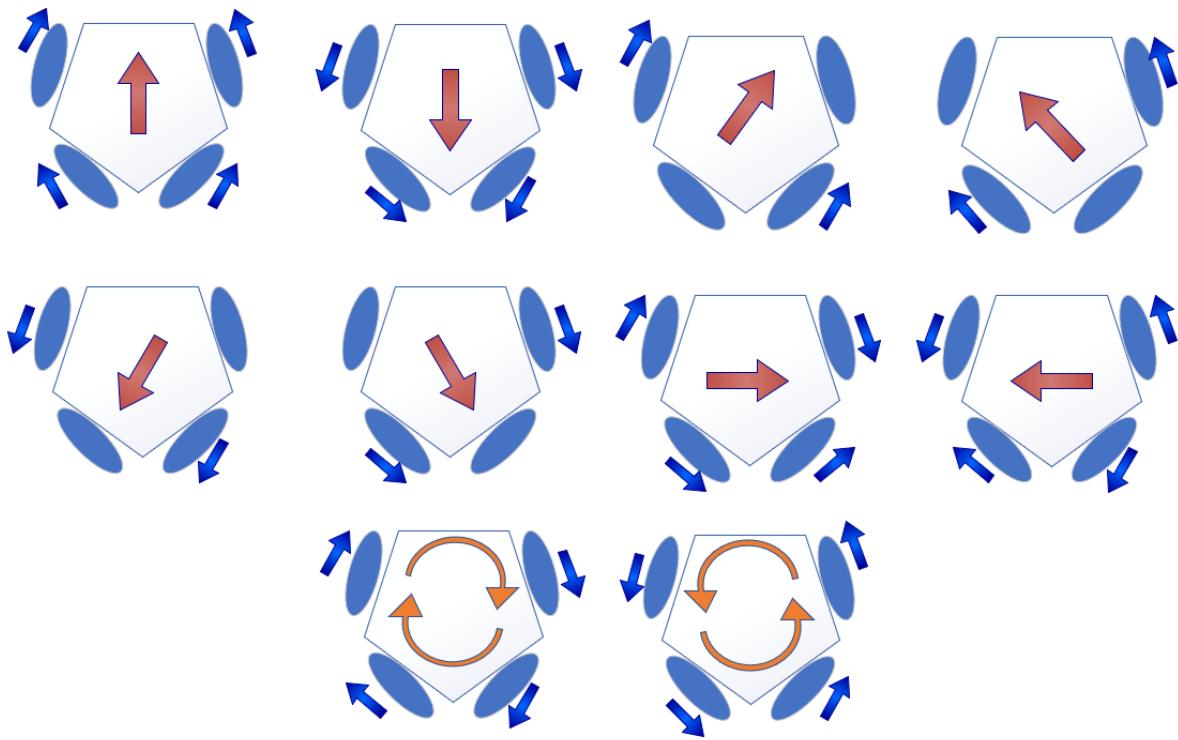
Une roue holonome :



Crédit : robotshop.com

Pour une disposition en X, comme pour un robot de Small Size League classique, les déplacements du robot, dépendant du sens de rotation des roues, suivra le principe suivant :

Déplacements d'un robot holonome



Cependant il est à noter qu'il ne s'agit là que d'une représentation pour permettre une meilleure compréhension des déplacements holonomes, et non du résultat des calculs aboutis que mon camarade a réalisé, et qui sont également fonction de l'angle des roues.

2.1.2-Le moteur brushless

A la différence d'un moteur électrique classique, le moteur brushless ne possède pas de charbons. Dans un moteur à courant continu avec balais, la commutation dans l'alimentation des bobines en fonction de l'angle du rotor est assurée mécaniquement. Or la partie de contact, le charbon, entraîne des frottements parasites et s'use limitant la durée de vie du moteur. Dans un moteur brushless, cet élément n'existe plus, il faut donc créer la commutation électroniquement.

Le moteur brushless est un moteur synchrone, c'est-à-dire qu'il tourne à la même vitesse que le système de tensions qui l'alimente. Tant que le couple moteur est supérieur à la charge à entraîner, la rotation du rotor est synchronisée avec le champ magnétique. Si le couple résistant devient supérieur au couple moteur, et que la tension d'alimentation n'est pas ajustée en conséquence, il y a un risque de décrochage, c'est-à-dire que le rotor risque de ne plus suivre le champ magnétique. A partir de ce moment-là, le rotor va se mettre à osciller, sans pouvoir se resynchroniser avec le champ magnétique, ce qui peut provoquer sa destruction. Pour éviter cela, le système d'asservissement doit être en mesure de réagir si le couple résistant augmente, et ajuster la tension d'alimentation en conséquence.

Le même problème se pose pour le démarrage du moteur brushless, car le rotor ne peut pas atteindre instantanément la vitesse de rotation du champ. Le système de contrôle électronique doit donc assurer un démarrage progressif, l'objectif étant toujours de reproduire la fonction du collecteur. La fréquence des tensions d'alimentations sera donc très basse au départ, puis augmentée progressivement en tenant compte de la réaction du moteur.

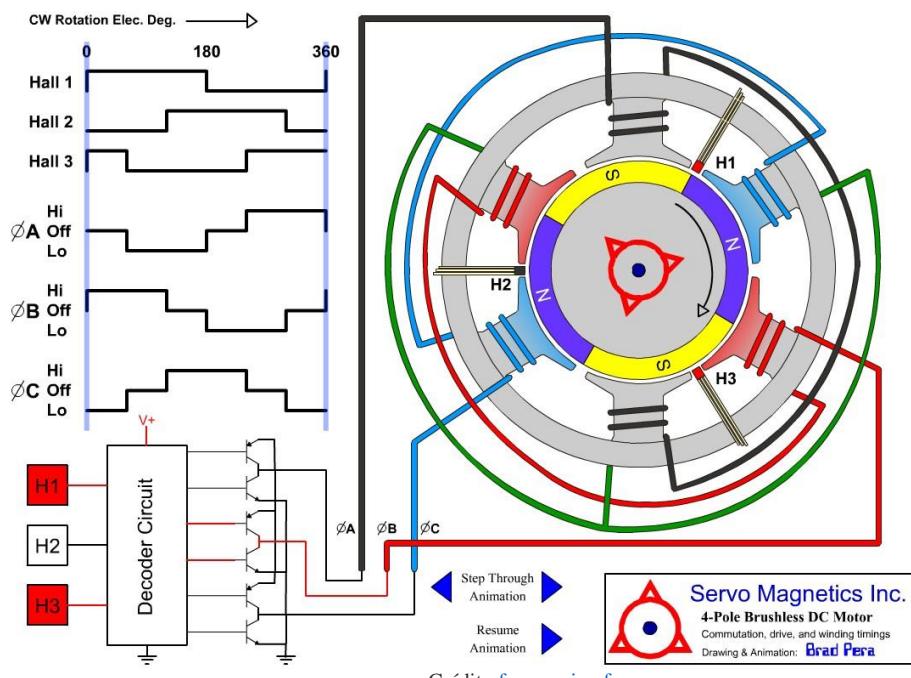
Pour notre projet les moteurs brushless comprennent des capteurs à effet Hall. Dans ce type de moteur brushless, des capteurs à effet hall (3 en général) sont utilisés pour connaître à tout moment la position du rotor, et adapter en conséquence l'alimentation des bobines et le champ magnétique. Le capteur va détecter le passage d'un pôle magnétique, et à partir de cette information le circuit de commande électronique assurera la commutation des bobines. L'utilisation de capteurs à effet hall dans les moteurs brushless permet une excellente régulation, cependant l'ajout de ces composants, et le fait qu'il faille les placer très près du rotor entraîne un surcoût et un risque de panne.

supplémentaire. Cette solution est cependant la plus employée dans les moteurs brushless utilisés en industrie. En pratique, les contrôleurs de moteurs brushless les plus performants peuvent intégrer les deux fonctions : commutation des bobines en fonction des données des capteurs à effet hall, et régulation de la vitesse en PWM sur l'alimentation de chaque bobine.

On appelle « outrunner », ou moteur à cage tournante, les moteurs brushless dont le rotor est autour du stator. Cette configuration est intéressante en termes de couple moteur, car les aimants sont disposés sur un diamètre important, ce qui crée un bras de levier très intéressant. De plus, cette disposition permet de placer facilement plusieurs séries d'aimants (jusqu'à 32 pôles sur certains moteurs brushless outrunners) et de bobines. Les bobines sont toujours câblées par groupes de 3, et les aimants sont soit collés par groupes de 2, soit constitués d'une partie magnétique comprenant plusieurs pôles. Comme pour un moteur pas à pas, les moteurs brushless outrunners comprenant plus de 3 bobines et 2 pôles ne font qu'une fraction de tour lorsque le champ a tourné de 180°. Leur fréquence de rotation est donc plus faible mais le couple très élevé. Ces moteurs brushless outrunners sont souvent utilisés dans des applications qui nécessitent un fort couple, car ils peuvent être reliés à la charge sans nécessiter de dispositif de réduction. Leur coefficient Kv est relativement faible par rapport aux autres types de moteurs brushless. Les principales applications des moteurs brushless outrunners sont les suivantes : ventilateurs, moteurs de disques durs, Cd-rom, moteurs de vélos électriques (intégrés dans le moyeu), bateaux ou avions radios commandés. Notre moteur est un moteur brushless outrunner.

Principe de fonctionnement :

La photo suivante montre le principe de fonctionnement d'un moteur brushless comportant des capteurs à effet Hall. Ici H1 et H3 détectent le passage des pôles Nord, et le courant circule de la phase rouge vers la phase bleue, la phase noire étant inactive.

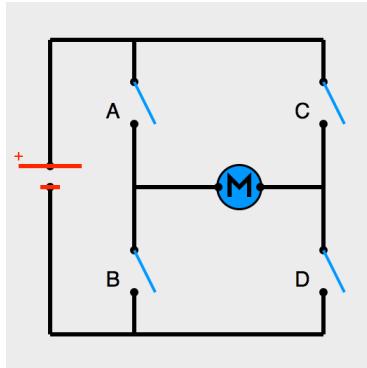


Le courant passe d'une phase du moteur à une autre en fonction des transistors activés. Pour expliquer cela nous allons maintenant expliciter le fonctionnement du « pont en H » et du « demi pont en H ».

2.1.3-Le demi pont en H

Voici ce qu'on appelle le pont en H. Il tient son nom de la forme circuit autour du moteur.

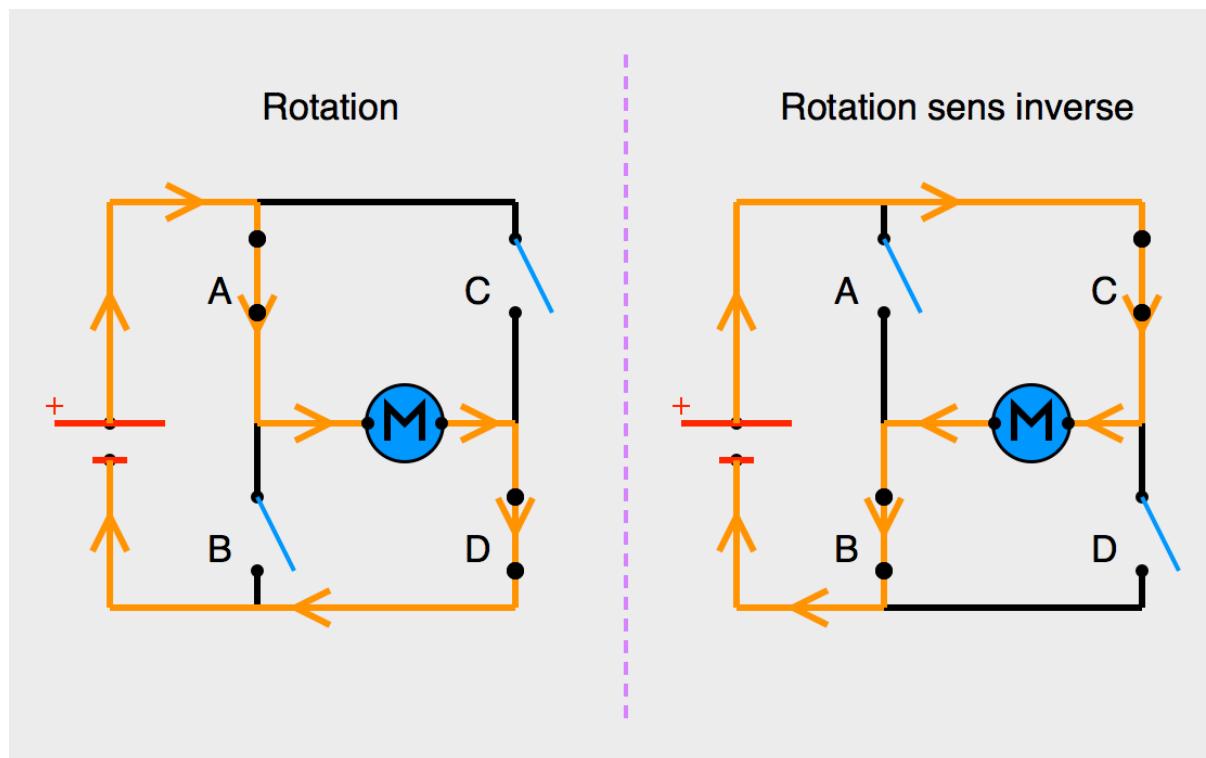
Ce circuit (ici réalisé avec des interrupteurs) permet d'alimenter le moteur. Les interrupteurs fonctionnent deux par deux. Le A est associé au D et le B est associé au C. Dans le schéma ci-dessus, rien ne se passe car tous les interrupteurs sont ouverts. Le moteur est arrêté.



en H du moteur. le B est

crédit : [OpenClassrooms](#)

Lorsqu'on actionne en même temps les interrupteurs A et D (schéma de gauche ci-dessous), ou les interrupteurs B et C (schéma de droite) :

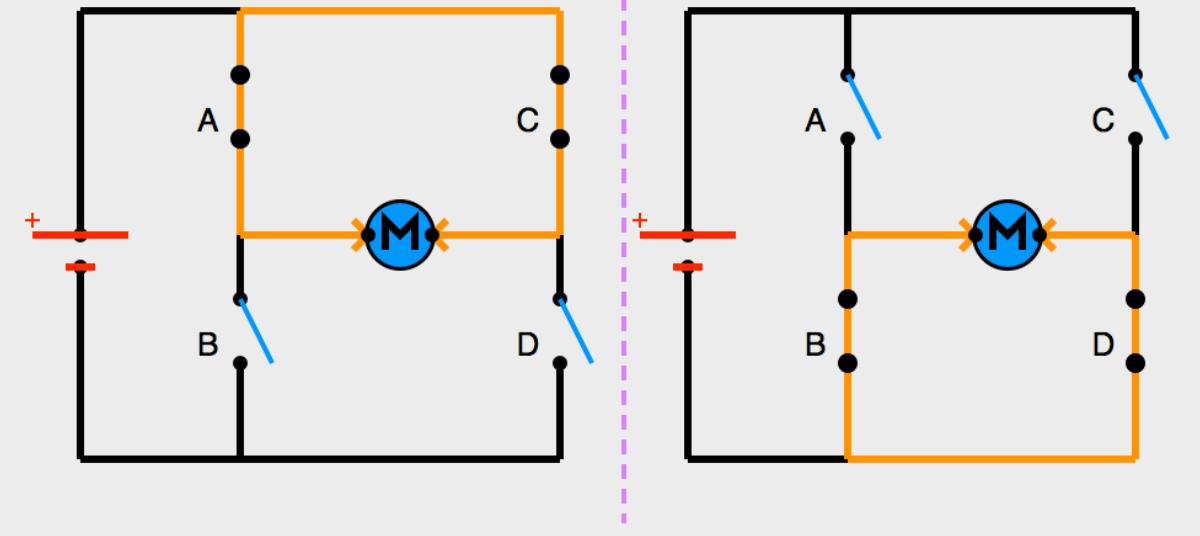


crédit : [OpenClassrooms](#)

- Sur le schéma de gauche : les interrupteurs A et D sont fermés. Le courant entre par la patte gauche du moteur et sort par sa droite. Le moteur tourne.
- Sur le schéma de droite : les interrupteurs B et C sont fermés. Le courant entre par la patte droite du moteur et sort par sa gauche. Le moteur tourne donc dans le sens inverse.

On peut aussi associer le A au C et le B au D. Lorsqu'un moteur est en roue libre (c'est-à-dire qu'il tourne à cause de sa force d'inertie mais pas à cause du courant), il génère un courant. Ce courant peut être réutilisé dans le pont en H comme frein électro-magnétique. Le moteur s'envoie son propre courant à l'envers. Cela permet de contrôler l'arrêt du moteur plutôt que de le laisser en roue libre.

Frein électro-magnétique

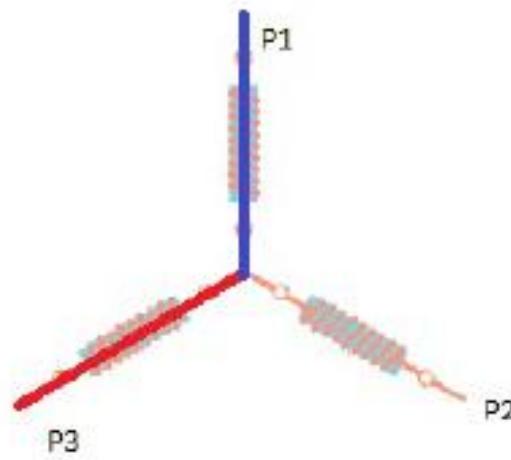
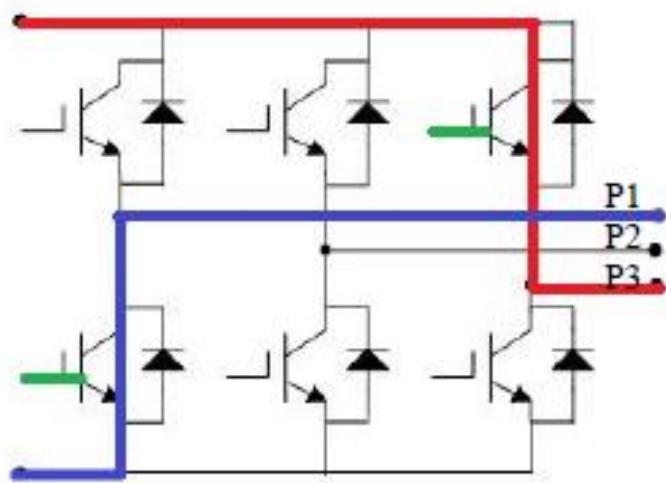
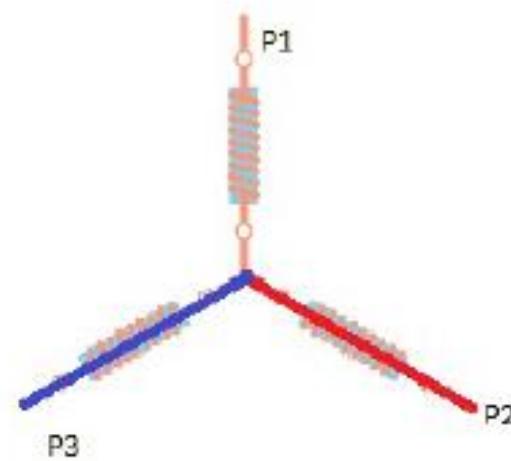
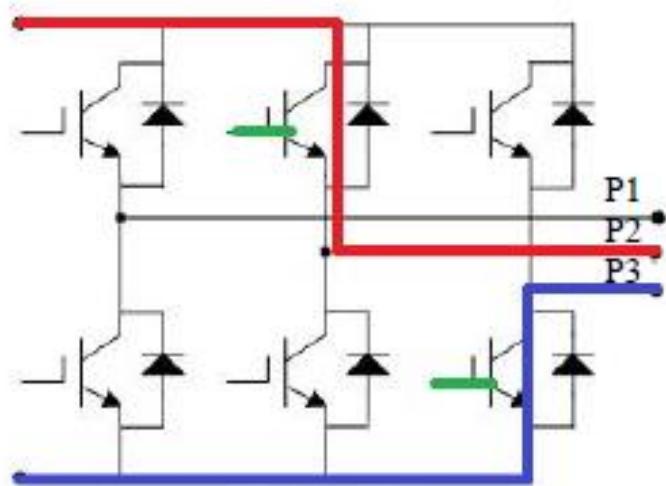
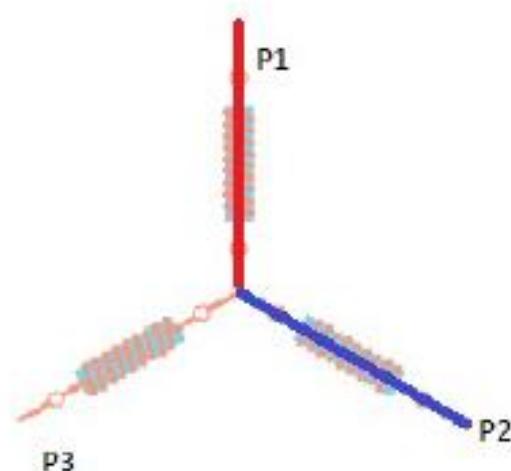
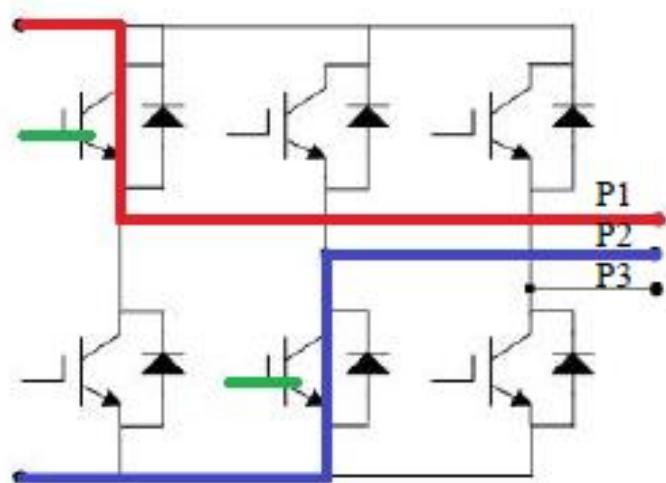


crédit : [OpenClassrooms](#)

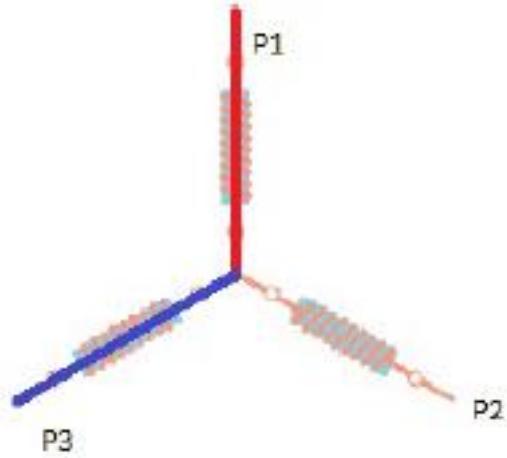
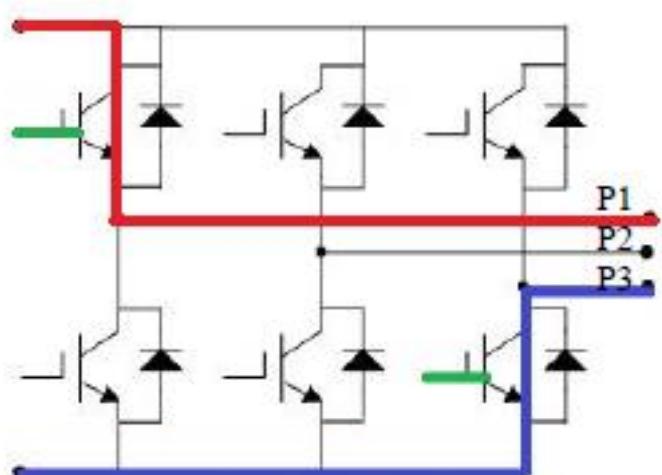
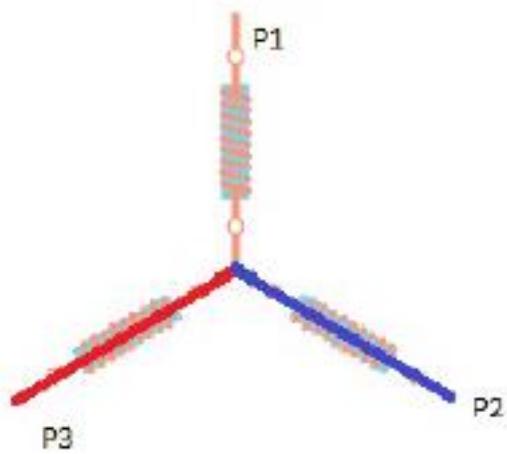
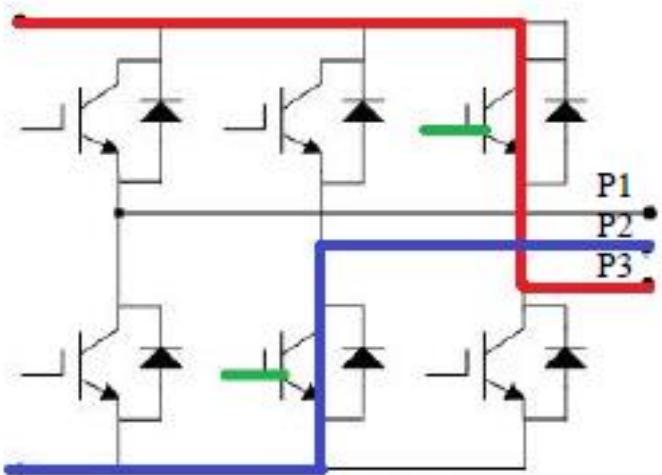
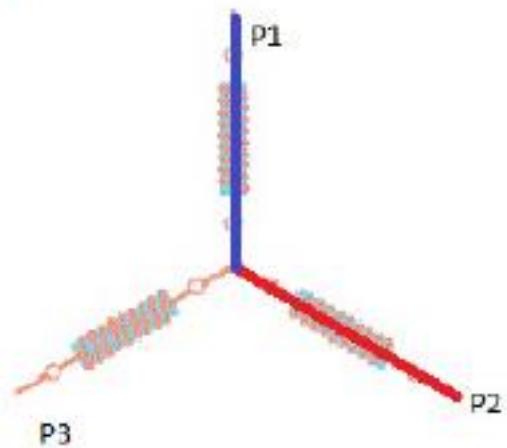
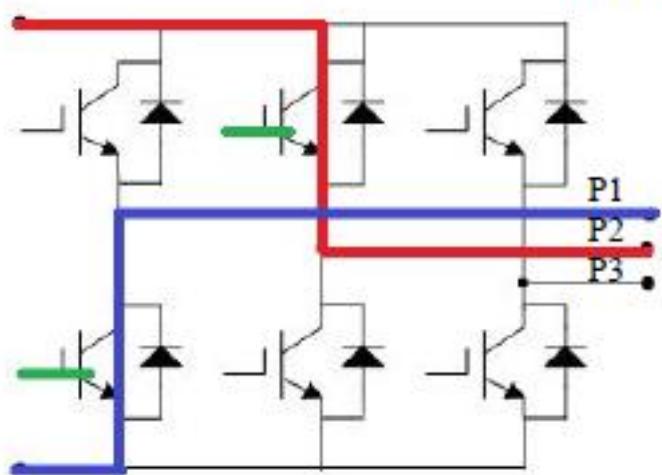
Cependant comme nous avons vu ci-dessus, nos moteurs brushless fonctionnent légèrement différemment. En effet ils disposent de 3 phases qui servent successivement d'entrées et de sorties. Pour permettre un tel montage, il faut utiliser un « demi pont en H » par phase. Le principe est cependant sensiblement le même. Les deux tables ci-dessous montrent le fonctionnement de ce montage. La phase rouge est celle d'où arrive le courant alors que la bleue est celle où le courant repart (par rapport au moteur). Le trait vert indique quel transistor est fermé, les autres étant ouverts.

Chaque étape de la deuxième table représente le sens de rotation inverse par rapport à chaque étape de la première table. Cependant pour avoir une réelle rotation en sens inverse, il faudra que les étapes 2 et 3 de la deuxième table soient inversées.

Sens de rotation 1



Sens de rotation 2



2.1.4-L'encodeur

Un encodeur est un dispositif électromécanique qui génère un signal électrique en fonction de la position ou du déplacement de l'élément mesuré. En robotique mobile, les encodeurs rotatifs sont utilisés pour mesurer le

déplacement (sens et vitesse de rotation) de chacune des roues du robot. Un encodeur permet d'obtenir une information en quasi temps réel sur la position et vitesse du moteur et donc d'appliquer des corrections (on parle de boucle de contrôle ou encore d'asservissement) si le comportement du moteur n'est pas conforme à l'ordre qu'on lui a transmis, ce qui arrive fréquemment en fonction de la pente, de la capacité de la roue à adhérer au sol (la roue tourne plus vite si elle patine), de la charge utile...

Sur un robot mobile à deux roues (conduite différentielle), la mesure effectuée permet de déduire le déplacement du robot, on parle d'odométrie. L'odométrie est utilisée en conjonction avec d'autres capteurs pour réaliser des algorithmes de SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), largement étudiés en robotique mobile.

On distingue deux grands types d'encodeurs : incrémentaux et absolus. Un encodeur incrémental génère un signal permettant de déterminer sens et vitesse de rotation tandis qu'un encodeur absolu génère une information absolue indiquant la position du capteur.

Fonctionnement d'un encodeur incrémental :

La plupart des encodeurs pour robots mobiles utilisent des capteurs optiques (mais il existe des encodeurs utilisant une information mécanique ou magnétique). L'idée est de placer un disque alternant des zones transparentes et opaques devant un capteur de lumière et de rendre le disque solidaire de l'axe de rotation de la roue. La fréquence d'apparition des zones blanches et noires (ou de tout autre principe offrant un contraste suffisant) devant le capteur de lumière va indiquer la vitesse de rotation. Le schéma suivant présente le principe de fonctionnement basique de l'encodeur :

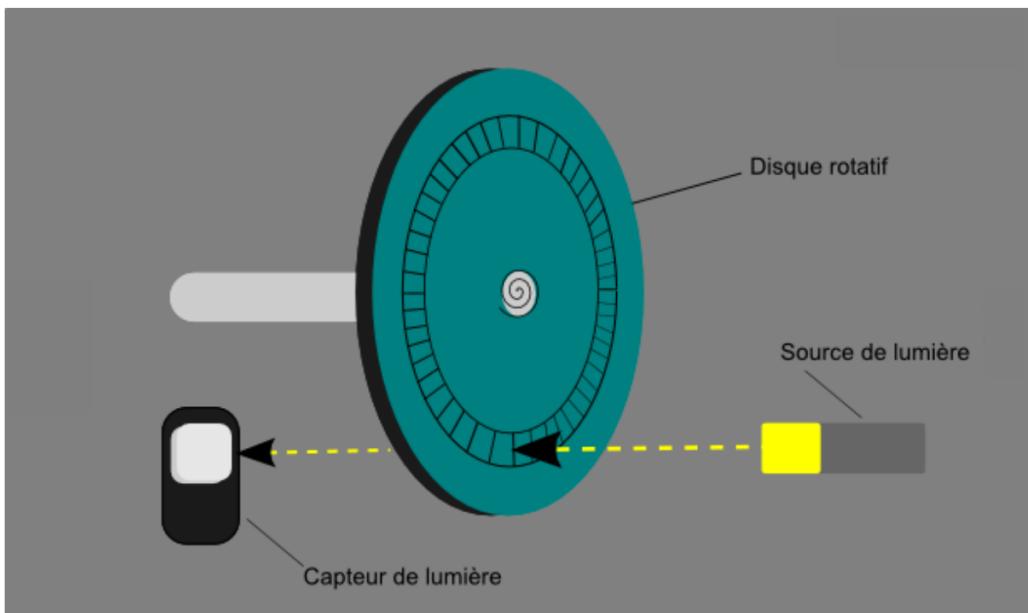


Schéma de fonctionnement d'un encodeur incrémental

Crédit : www.generationrobots.com

Lorsque le disque tourne, les segments opaques bloquent la lumière alors que les segments transparents la laissent passer. Ceci génère des impulsions d'onde carrée qui peuvent ensuite être interprétées comme position ou mouvement. Si le fonctionnement précédent indique la vitesse de rotation, il n'indique pas le sens de rotation. Ce problème est résolu par l'encodeur en quadrature. L'encodeur en quadrature comporte deux pistes de code dont les secteurs sont décalés de 90 degrés d'une piste à l'autre. Ces deux pistes génèrent deux signaux de sortie. Si le premier signal devance le second alors le disque tourne dans le sens des aiguilles d'une montre et dans l'autre sens dans le cas contraire. Par conséquent, en mesurant à la fois le nombre d'impulsions et les phases relatives des deux signaux on peut mesurer la position et la direction de la rotation des roues du robot.

Fonctionnement d'un encodeur absolu :

La structure d'un encodeur absolu est proche de celle d'un encodeur incrémental. Il y a le disque, la source de lumière et le capteur. La différence réside au niveau du disque. Au lieu de 2 ou 3 voies sur le disque comme dans l'encodeur incrémental, l'encodeur absolu utilise un disque possédant de nombreux cercles concentriques chacun comportant un motif différent. La lecture de toutes les voies par un scan radial (c'est-à-dire partant du centre du disque vers l'extérieur) donne une information unique correspondant à l'orientation du disque.

L'encodeur imposé est un encodeur magnétique. L'élément clé du capteur magnétique est un système basé sur un capteur à effet Hall qui détermine la position angulaire de l'arbre suivant la direction du champ magnétique d'un aimant. Cet aimant est fixé à l'arbre et produit un champ magnétique qui pénètre le capteur à effet Hall.

2.1.5-l'ESC

Un ESC, comme *Electronic Speed Control*, est comme son nom l'indique, l'élément électronique permettant la gestion des moteurs en vitesse et en direction.

Les moteurs et contrôleurs brushless (BESC) occupent désormais une place incontournable dans l'arsenal des modélistes. Ils sont de plus en plus puissants, abordables, fiables mais aussi complexes. Car il ne suffit plus de faire tourner le moteur, on peut maintenant paramétrier une foule d'options allant du frein-moteur à la mélodie de mise en route. Et comme souvent le mode d'emploi comporte des abréviations obscures, il est parfois difficile de s'y retrouver.

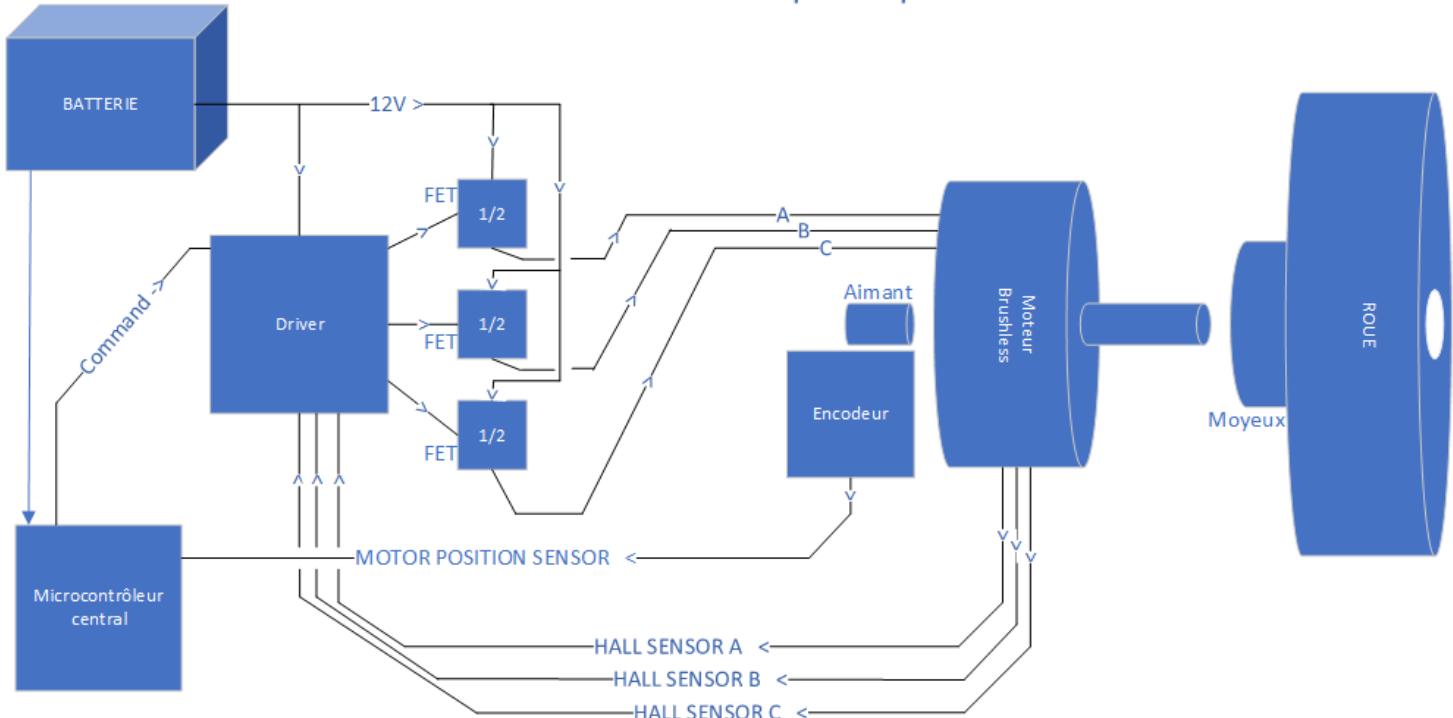
Les moteurs à balais pouvaient parfaitement être connectés directement à la batterie. Ils tournaient alors à pleine vitesse. Pour faire passer plus ou moins de courant et modifier le régime du moteur on utilisait un "variateur". Cet accessoire jouait en fait le rôle d'une grosse résistance variable.

Les moteurs "brushless" (littéralement "sans balais") ont par contre absolument besoin d'être pilotés par un contrôleur. L'indispensable contrôleur se charge d'envoyer le courant qu'il faut au bon moment sur les trois fils du moteur afin que celui-ci tourne selon les ordres du pilote. L'ESC comporte donc tous les éléments nécessaires au bon fonctionnement du moteur.

Pour faire correctement tourner le moteur brushless, l'ESC comporte trois demi-ponts en H afin d'alimenter successivement les trois phases du moteur. Il récupère les informations fournies par les capteurs à effet Hall inclus dans le moteur (ou rajoutés à l'extérieur le cas échéant) pour savoir à quel moment switcher le courant entre ces phases. Il relaie le signal renvoyé par l'encodeur soit vers un contrôleur interne soit vers un contrôleur général, afin de déterminer le sens et la vitesse de rotation, pour effectuer un asservissement. l'ESC contrôle le sens et la vitesse de rotation d'un moteur. Il en faut donc quatre, un par moteur, chacun étant indépendant, pour qu'en fonction de l'ordre envoyé par la carte mère le robot effectue un déplacement holonome.

Ma partie, l'ESC, suivra donc le schéma de principe ci-dessous et devra faire l'objet d'une intégration électronique, mais également mécanique et pratique.

Schéma de principe



2.2-Choix des composants

2.2.1-Le moteur

2.2.1.1-Critères de choix

Pour choisir un moteur, il existe différents critères. Tout d'abord il fallait un moteur brushless équipé de capteurs à effet Hall. Ensuite nous avions une taille de robot limitée, donc la taille du moteur était très importante. D'autant qu'à l'étage des roues doit être prise en compte la place que prennent les éléments des autres membres de l'équipe, comme, pour ne citer que les plus volumineux, le *kicker* et le *dribbler* de Thomas Coutant, ou encore les capteurs optiques d'Antoine Venier. Il faudra aussi prendre en compte la place prise par les supports moteurs, les fixations des divers éléments, et même les roues, qui doivent elles aussi rentrer dans le diamètre de 25cm imposé. Il faut donc trouver des moteurs compacts. Enfin, il a fallu se renseigner sur les critères mécaniques. Une formule va nous être très utile pour comprendre que choisir :

$$P(\text{Puissance en Watt}) = C(\text{Couple en N.m}) * w(\text{Vitesse de rotation})$$

$$P = Cw$$

Comme la puissance est fixe, avec la conservation de l'énergie, le couple et la vitesse vont être inversement proportionnels. Si l'un augmente, l'autre diminue. Il s'agira de trouver le rapport le plus adapté à l'utilisation qu'on en a.

Le couple

Il s'agit, pour faire simple de la force et du rendement du moteur, ou plus exactement sa capacité à

transformer l'énergie électrique en énergie mécanique et à ne pas la gaspiller en énergie thermique. Les drones à hélice ont besoin d'un faible couple. En effet la résistance de l'air est minimale. Dans notre cas, le robot sur roues doit avoir une bonne capacité d'arrachement (passage de l'arrêt à un mouvement établi) et une bonne adhérence sur le gazon synthétique des terrains officiels, et il faut pouvoir mouvoir le poids du robot.

Les KV

Les KV d'un moteur sont le nombre de tour par minute que peut effectuer un moteur alimenté avec 1 Volt à vide. Un moteur de 1760 KV alimenté en 12V va théoriquement tourner à 21120 tours/min.

$$12 \times 1760 = 21120 \text{ tr/min}$$

Il est inversement proportionnel au couple. Pour un moteur de drone volant, on a une vitesse de rotation stable, car soumise à peu de résistance. L'aérodynamique entre également dans l'équation, mais pour faire simple on aura besoin de moins de couple et de plus de vitesse. De plus les drones volants sont souvent compacts et doivent être légers et donc alimentés par des batteries délivrant moins de tension. Ce type de drone aura donc besoin de plus de KV pour maintenir le drone en l'air que pour un objet roulant holonome, où la vitesse de rotation est soumise à la résistance du sol, à sa texture et à son matériau, et où souvent le volume et le poids sont plus importants. Il vaut donc mieux privilégier un KV faible au profit d'un couple plus important. 1760KV est considéré comme un KV assez faible. Il n'est pas rare de trouver des moteurs en 5000KV.

La puissance

La puissance est la capacité d'accélération d'un moteur. Comme nous avons pu le constater ci-dessus, plus la puissance est grande, plus on pourra avoir une vitesse et/ou un couple important. Il nous a été spécifié qu'il nous faudrait un moteur dépassant les 30 Watts.

2.2.1.2-Choix

Le moteur devait nous être imposé, cependant il nous a été donné la liberté d'étudier la question. En effet le premier moteur proposé ne satisfaisait pas les superviseurs du projet. Nous avions donc pour mission de trouver un meilleur moteur dans la première semaine du projet, moteur qui entrerait dans les éléments imposés et fournis par l'école.

Le premier moteur que l'on nous a proposé était un moteur de la marque *HobbyKing*, à savoir le *X-car 17.5 turn* de 1760 KV comportant des capteurs à effet Hall et une puissance maximum à 350 Watts, avec un poids de 172g, et qui coûte 31,49€ sur le site HobbyKing.com.



Un des problèmes majeurs sur ce moteur, par ailleurs correspondant aux spécifications, était sa taille soit 5,5cm de large pour 15,5cm de long. Or nous avons fait le choix avec les autres membres du groupe et selon le cahier des charges, de mettre les roues en direct sur les moteurs (sans engrenages). Avec une disposition des roues en X, il était inconcevable que quatre moteurs de cette taille rentre dans l'espace imparti. Les autres étudiants chargés de la même partie que moi, Nicolas Gibaud, Matthieu Castets et Clément Millereux étaient dans la même configuration. Clément Millereux a fait le choix de déporter ses moteurs avec des engrenages de précision, mais même dans cette configuration, il a estimé qu'il ne pouvait pas utiliser ces moteurs non plus. Nous nous sommes donc mis en recherche d'un autre moteur, plus compact, à défendre auprès de l'administration.

Notre choix s'est porté sur un moteur suisse : le 17-EN-265 de chez *Maxon motor*. Alimenté en 12V, comportant des capteurs à effet Hall, il consomme un courant nominal de 2,02A. Il a 374KV et une puissance de 30W. Pour ses dimensions : 1,65cm d'épaisseur pour un diamètre de 4,32cm et pour 75g, donc extrêmement plus compact.



Moteur	<i>HobbyKing X-car</i>	<i>Maxon motor 17-EN-265</i>
Tension d'alimentation	11V	12V
KV	1760	374
Vitesse théorique	19360 tr/min = 2027,37 rad/s	4488 tr/min = 469,98 rad/s
Puissance	350W	30W
Couple	172,6 mNm	63,8 mNm (54,9 mNm nominal d'après le constructeur).
Poids	172g	75g
Diamètre	5,5cm	4,32cm
Longueur	15,5cm	1,65cm
Prix	31,49€	64,36€ (commandés par 20)
Calculs	$V_{\text{théorique}}(\text{tr/min}) = U * KV$ $V_{\text{théorique}}(\text{Rad/s}) = V(\text{tr/min}) \frac{2\pi}{60}$ $C = \frac{P}{w} = \frac{350}{2027,37}$	$V_{\text{théorique}}(\text{tr/min}) = U * KV$ $V_{\text{théorique}}(\text{Rad/s}) = V(\text{tr/min}) \frac{2\pi}{60}$ $C = \frac{P}{w} = \frac{30}{469,98}$

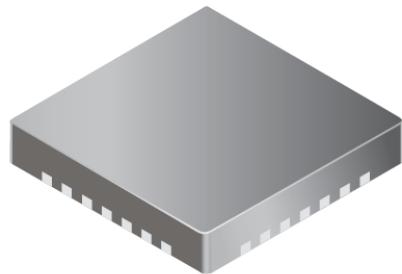
Comme on peut le constater avec le tableau précédent, la puissance est nettement inférieure sur le moteur de chez *Maxon motor* ce qui entraîne un KV très inférieur mais aussi un couple inférieur. Cependant la puissance de 30W était celle spécifiée par le cahier des charges, et il semblerait que le *X-car* ait été surdimensionné. Par ailleurs le *Maxon 17-EN-265* est bien plus compact que le *X-car* et bien plus léger. Évidemment cela a un coût et le *Maxon* coûte plus du double que le précédent.

Étant donné que le moteur était censé être imposé, nous sommes allés, mes collègues et moi, défendre cette possibilité auprès de l'administration. Celle-ci ainsi que M. Steve N'Guyen ont vérifiés les spécifications et ont validés les nouveaux moteurs.

2.2.2-L'ESC

2.2.2.1-Le driver A4931

Pour effectuer un ESC, comme expliqué précédemment, nous avons besoin de trois demi-ponts en H. Pour qu'un moteur fonctionne correctement, il faut driver les demi-ponts en fonction des données des capteurs à effet Hall présents sur le moteur. Pour ce faire il y avait plusieurs possibilités :



Possibilité N°1 : Le microcontrôleur.

Une des possibilités était de prendre un petit microcontrôleur et de gérer le basculement des transistors au moyen d'un code en langage C. Cela avait l'avantage de pouvoir tout gérer dans les moindres détails, mais cela compliquait également le routage, les protocoles de communications sur l'ESC et les protocoles de communications entre le microcontrôleur de chaque ESC et la carte mère. L'équipe a fait le choix d'abandonner d'office la possibilité d'une multiplication de microcontrôleurs. Nous avons décidé ensemble de tout faire fonctionner sur le microcontrôleur de la carte mère.

Possibilité N°2 : Le driver All-in-one de moteurs brushless.

Après une remarque de Steve N'Guyen, qui disait qu'il existait sûrement un composant qui avait été conçu pour driver les transistors, mes camarades qui travaillaient sur leur propres ESC et moi avons menés quelques recherches à ce sujet. Nous avons effectivement trouvé divers composants qui faisaient tout, y compris pour certains la lecture des capteurs à effet Hall, et dans lesquels les transistors étaient présents. Cependant certains comme le *DRV10983-Q1* de chez *Texas Instruments* nécessitaient un bus de communication. Le problème étant qu'avec un seul microcontrôleur, le nombre de broche disponible doit être surveillé de très près, et que chaque lien carte-mère/ESC est à multiplier par quatre. Par ailleurs certains autres drivers avaient des transistors internes non adaptés pour le courant consommé par le moteur, soit 2,02A nominal, avec des *peak* de près de 10A possibles (courant de démarrage à 9,69A). Or la recherche n'a pas duré très longtemps car nous sommes tombés sur une variante de cette possibilité N°2.

Possibilité N°3:Le driver de MOSFET

Après quelques recherches, nous avons trouvé un composant qui semblait particulièrement efficace. Il s'agit du même principe qu'un driver de brushless classique, cependant les transistors ne sont pas compris, ce qui permet de les rajouter en externe. Ainsi on peut choisir les transistors les plus adaptés. Ce composant ne nécessite aucun bus, il est commandé par deux niveaux logiques et une PWM, broches disponibles en quantité suffisante sur le microcontrôleur de la carte mère. Il a l'avantage de lire les capteurs à effet Hall du moteur et de switcher les transistors de façon optimale. C'est donc cette solution que nous avons choisie.

Le composant que nous avons choisi est donc le *A4931* de chez *Allegro*. Il s'agit d'un pré-driver de moteur brushless à 3 phases. Il est capable de driver six transistors N-channel MOSFET de puissance et peut supporter une tension jusqu'à 30V. La commutation logique est prévue en fonction de trois entrées pour des capteurs à effet Hall espacés de 120°. Il opère dans une marge de température comprise entre -20°Celsius et 105°Celsius. Le package est un QFN de 28 broches de 5mm par 5mm, avec un pad thermique. La *datasheet* est fournie en annexe.

2.2.2.2-Les transistors

Après avoir sélectionné un driver, il nous fallait des transistors pour pouvoir faire nos demi ponts. Pour choisir mes transistors, je me suis notamment basé sur une remarque d'un des collègues de mon groupe qui me disait que dans un milieu fermé, il fallait éviter de trop monter en température. Globalement il suffit de sélectionner un modèle de transistor surdimensionné pour éviter qu'il chauffe. De plus cela sera plus permissif si une erreur a été commise. Cela peut permettre d'éviter de les changer.

J'ai donc décidé de prendre des transistors de puissance de type N-MOSFET. Celui qui nous a convenu est les *FQP30N06L* de chez *Fairchild Semiconductor*. En effet il supporte jusqu'à 60V, 32A continu et jusqu'à 128A peak, et est à basculement rapide.

En additionnant chaque délai typique de basculement on obtient 395ns de temps typique pour un switch.

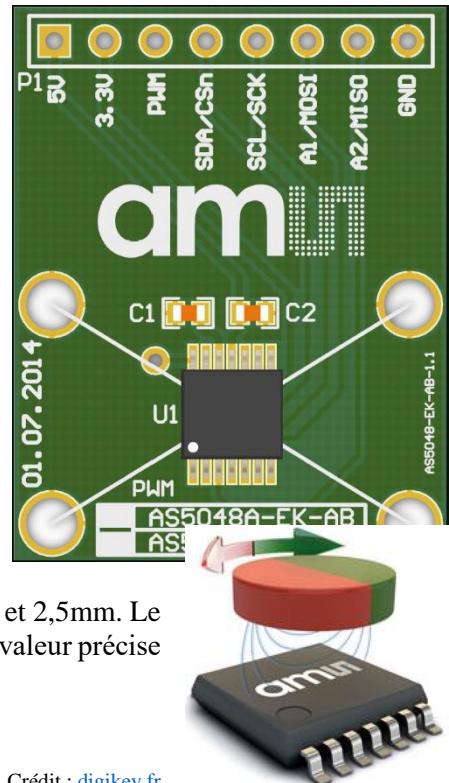
$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{395 \cdot 10^{-9}} = 2,532 \text{ Mhz}$$

Le transistor peut donc changer d'état à une fréquence typique de 2,532 Mhz. Par ailleurs, la technologie des MOSFET leur permet de ne chauffer que dans des utilisations extrêmes, ce qui n'est pas notre cas puisqu'ils ne devront supporter que 12V et des peaks maximum de courant à 10A et 2,02A en nominal. On est donc très en dessous de ses seuils de tolérance.

2.2.2.3-L'encodeur

Pour ce qui est de l'encodeur, il nous avait été imposé un modèle en particulier, à savoir le *AS5048* de chez *austriamicrosystems*. Cependant nous avions la liberté de choisir le *AS5048A* qui communique avec la carte mère en avec un bus SPI, ou le *AS5048B* qui communique avec la carte mère en I2C. A ce stade du projet il n'était pas évident de savoir lequel sera le mieux mais nous avons estimé avec Samuel Huet, chargé de la carte mère, et avec Antoine Venier, chargé de l'asservissement, qu'il serait assez simple d'utiliser le bus SPI. J'ai donc choisi le *AS5048A*.

Crédit : <https://ams.com/as5048a>



Crédit : digikey.fr

2.2.2.4-Autre composants particuliers

Pour les autres composants, la plupart sont liés à l'utilisation typique du driver. Ainsi il faut pour chaque ESC, cinq condensateurs de 100nF, soit en tant que condensateur de découplage, soit en tant que pompe de charge pour activer les transistors. De la même façon, une résistance de 2kΩ permet une chute de tension pour alimenter les capteurs à effet Hall du moteur aux alentours de 2,3V.

Le schéma typique donnait aussi un condensateur polarisé en découplage, sans précision quant à sa valeur. J'ai donc estimé que cela dépendait de l'utilisation qu'on en avait et de quelle fréquence on voulait se protéger. J'ai décidé d'éliminer un maximum de fréquence en utilisant une valeur standard de condensateur, à savoir 10µF. Cela nous donne le calcul suivant :

$$C = \frac{1}{2\pi f} \quad f = \frac{1}{2\pi C} \quad f = \frac{1}{2\pi \cdot 10^{-6}} = 159 \text{ kHz}$$

Avec une fréquence de coupure à 159kHz, les fréquences supérieures seront éliminées, afin de lisser le signal. Ainsi on élimine la fréquence du wifi (2,4GHz ou 5 GHz) la fréquence de communication SPI des capteurs

(2Ghz) ou encore la fréquence des régulateurs à découplage qui fonctionnent autour de 7Mhz. On est donc dans un modèle sécuritaire. J'ai donc choisi un condensateur de technologie Tantale de 10µF, CMS en boîtier 1206, de chez AVX. Pour être précis le *F951E106MAAQ2*.

Par ailleurs un des condensateurs de 100nF est en parallèle du tantale pour assurer le découplage au moyen de deux technologies différentes.

$$f = \frac{1}{2\pi * 0,1 * 10^{-6}} = 1,59 \text{ MHz}$$

Ce condensateur découplera les moyennes et hautes fréquences. Ainsi le driver sera bien protégé.

La résistance *Rsense* est une résistance très faible qui sert au composant à surveiller la tension du circuit. Il existe de très faibles résistances spécialisées pour ce genre de tâches. J'en ai sélectionné une, à savoir la *ULR1S-R003FT2* de chez *TT Electronics*, résistance CMS de 0,003 ohms en package 1206.

J'ai aussi sélectionné, en accord avec Samuel Huet, un bornier à vis 3 voies pour relier sa carte d'alimentation à chaque ESC. Les trois voies seront du 3,3V, du 12V et une masse commune. Également en concertation avec Samuel Huet, nous avons tous les deux choisis de faire communiquer chaque ESC à la carte mère au moyen d'une nappe 8 voies disposant de connecteurs *micromatch*. En effet, il était nécessaire de garder une certaine souplesse entre les diverses cartes, pour privilégier la manipulation, mais aussi de garder la possibilité de brancher et débrancher régulièrement les cartes avec un minimum de risques d'erreurs. Il a fallu donc choisir une embase *micromatch* adaptée à 8 voies. Les voies permettent d'une part la commande du driver (3 voies : sens de rotation, vitesse, frein magnétique), d'autre part la communication SPI avec l'encodeur sur 4 voies : MISO (Master In Slave Out), MOSI (Master Out Slave IN), SCK (horloge du bus synchrone) et CS (Chip Select). La dernière voie est une masse commune.

Le moteur dispose pour se connecter d'une nappe, il fallait donc un connecteur spécifique, livré avec les moteurs. De même j'ai choisi comme connecteur de contact avec l'encodeur un emplacement de connecteurs type « headers » pour garder une bonne souplesse de manipulation vu la position que devra avoir l'encodeur.

2.3- Choix matériel et solutions techniques

2.3.1-Les roues holonomes

Comme nous l'avons vu précédemment lors de la phase d'études préliminaires, nous avions accès à diverses possibilités d'élément de motricité holonomes. Ces éléments sont cependant limités par les règles de la *RoboCup* aux roues holonomes. Les roues étant assez chères, j'ai fait un choix de roue holonome standard, classique dans tout type de robot holonome. De plus ce modèle m'a été conseillé par un camarade. Enfin, le choix a été également motivé par rapport aux autres groupes, en effet, étant donné que les roues sont un élément cher, il valait mieux choisir les mêmes dans chaque groupe afin d'avoir une commande groupée plus importante, et donc un coût de revient à la pièce inférieur, sinon pour notre budget, au moins pour l'école. En dessous de 100 pièces le prix unitaire restait le même, mais peut être que l'école a pu s'éviter de payer les frais de port (en tout cas elle ne les aura payés qu'une seule fois).

Mon choix s'est donc porté sur des roues en aluminium de chez *Nexus Robot*, les *RB-Nex-75* qui font 60mm de diamètre et de charge utile 3Kg, ce qui est plus que largement suffisant. Elles comportent 10 rouleaux en caoutchouc pour une bonne maniabilité latérale et en rotation et pour éviter tout glissement. Les rouleaux sont assez classiquement disposés en quinconces. Il est prévu une fixation pour moyeu de 28mm avec trois pas de vis à 120°. Elles coûtent 15,58€ TTC.

crédit : robotshop.com



Cependant j'ai pu remarquer que la plupart des RoboCup étaient équipés de roues différentes. Certaines simplement un nombre de rouleaux en caoutchouc bien important, et plus fins. D'autre ont un système d'anneaux caoutchouc sur l'extérieur de la roue comme sur le ci-dessous.



robots de la
ont
plus
en
modèle 3D

crédit : krssg.in/project.html

Cependant la plupart de ces roues sont bien plus chères (plus de 42€ pièce sur *Robotshop* pour le modèle présenté plus haut). Ou introuvable pour le deuxième modèle ci-dessus.

2.3.2-Les moyeux

Une fois les roues déterminées, il fallait les fixées au moteur. Nous avions donc commandé des moyeux de chez *Nexus Robot*, les *RB-Nex-78*, car ils étaient adaptés à la roue (même fixation de trois pas de vis à 120°, dimension de 28mm extérieur) mais aussi à la taille de l'arbre moteur soit 4mm de diamètre. Malheureusement une erreur du site internet a fait que ce ne sont pas les bons moyeux qui sont arrivés. En effet les moyeux qui sont arrivés avaient un diamètre intérieur de 6mm, des *RB-Nex-80*. Pour cause de problèmes de stocks et de délais nous n'avons pas pu renvoyer la mauvaise commande pour avoir la bonne. On a décidé de faire des adaptateurs en impressions 3D, conçus et fournis par l'école.



Moyeu avec ouverture d'axe à 4mm



Moyeu avec ouverture d'axe à 6mm

crédit : nexusrobot.com

2.3.3-Les supports moteurs

En vue d'une intégration mécanique de l'ensemble moteur/moyeu/roue au reste du robot, il a fallu imaginer un système de fixation. J'ai choisi de développer un support moi-même sur logiciel de conception 3D et de l'imprimer en 3D. J'ai fait ce choix pour plusieurs raisons.

Tout d'abord la pièce est particulièrement spécifique, et il est assez improbable d'en trouver une remplaçant toutes les contraintes de formes et d'espace. Ensuite, l'école dispose de plusieurs imprimante 3D de diverses technologies ainsi que d'un bon stock de matériau (PLA) ce qui ramène le budget alloué au support à zéro. Enfin, la conception 3D et l'impression 3D m'ont toujours beaucoup intéressé, et je n'avais pas encore eu l'occasion de développer des compétences sur le sujet. Puisque l'occasion s'est présentée, je l'ai saisie.

2.3.4-Le châssis

Enfin il a fallu déterminer quelle allait être la structure principale du robot : le châssis. De la même manière que pour les supports moteurs, et pour les mêmes raisons, j'avais décidé de réaliser le châssis en impression 3D. Seulement les imprimantes disponibles étaient trop petites, et le temps d'impression risquait d'être très long. C'est Steve N'Guyen qui m'a proposé une solution. Il avait à sa disposition une découpe laser ainsi que des plaques de matériau de bois aggloméré de 6mm d'épaisseur que lui-même utilise régulièrement pour ses propres prototypes. Il a donc été convenu que je conçoive le châssis d'une seule pièce en 3D, puis que je lui envoie le fichier en format approprié à la découpe, et enfin qu'il me ramène le châssis effectué le mardi après-midi suivant (jour de sa présence à l'école).

3-Conception

3.1-Conception électronique

3.1.1-Logiciel

Il a été défini dans le cahier des charges au début du projet que le logiciel de conception assistée par ordinateur serait *Altium Designer*. Ce logiciel permet la création de bibliothèques schématiques pour chaque composant, la création d'empreintes, le téléchargement de modèle 3D, la création de schémas et le routage de carte électronique. Une vue 3D peut être générée.

Je ne connaissais pas ce logiciel avant le début du projet, et il a été un peu compliqué à prendre en main. Heureusement, Aloïs Miclo, l'un des intervenants du projet, spécialiste en routage de cartes électroniques, nous a fait un tutoriel sur le logiciel, qui avec quelques astuces et une bonne connaissance des raccourcis clavier, s'est avéré très facile d'utilisation.

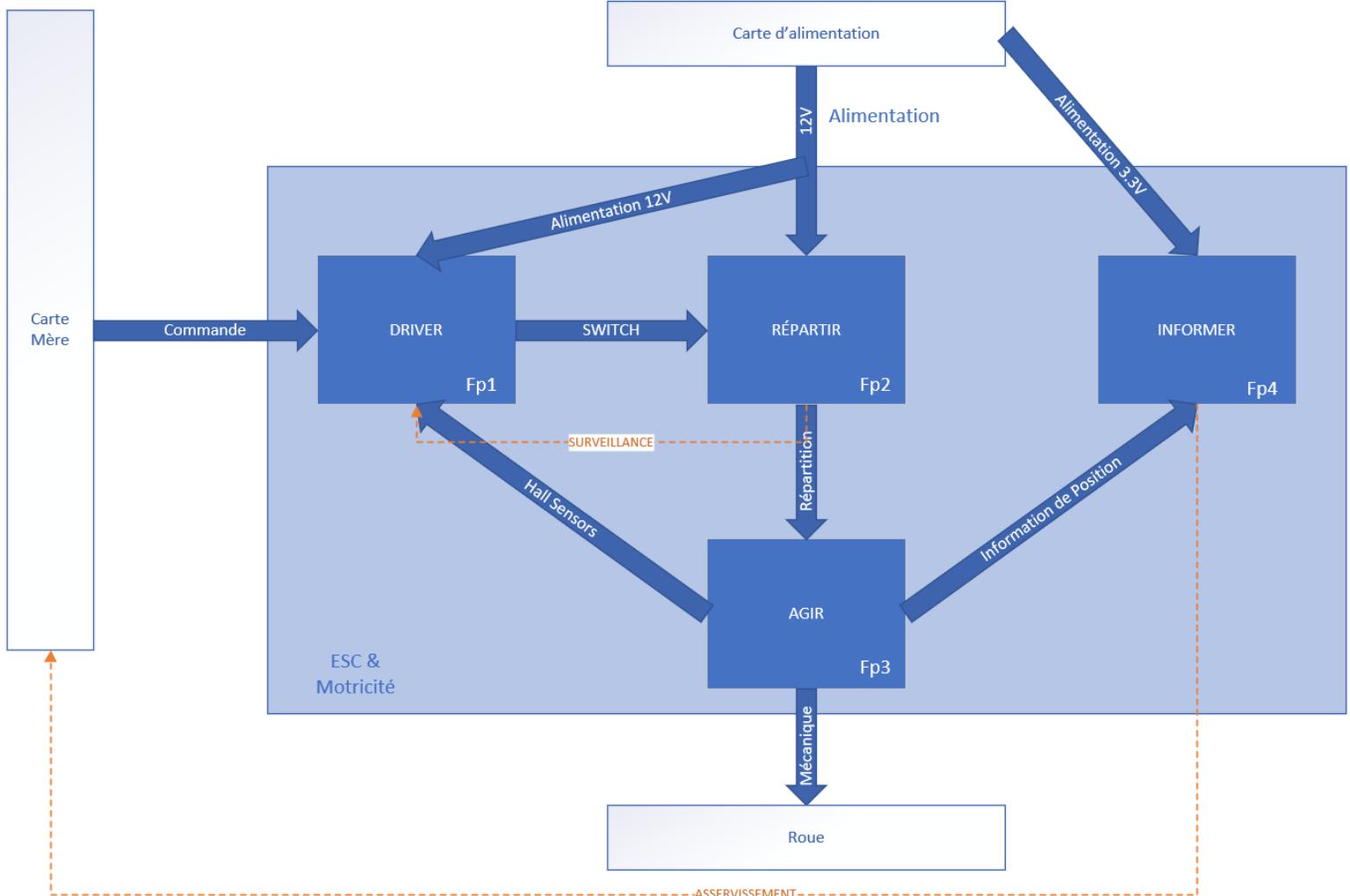
La conception électronique a cependant pris beaucoup plus de temps que je ne l'avais imaginé lors de la planification prévisionnelle. D'une part les tâches n'ont pas été aussi linéaires que prévu. Il m'arrivait de faire une pause dans la conception électronique pour faire un peu de conception 3D, par exemple, ou encore un peu de mécanique. D'autre part, certains composants étaient assez gros. Or il fallait faire rentrer 4 cartes de type ESC dans le robot. Mon but était donc de miniaturiser et d'optimiser l'espace de mes ESC. Enfin il a fallu faire tout une base de bibliothèque de composants (schématique et PCB).

Par ailleurs j'ai commis une erreur de conception qui m'a obligé à revoir mon modèle. J'étais parti du principe que les transistors que j'utilisais avaient la « languette » reliée à la masse pour optimiser la dissipation. J'avais donc prévu de les replier et de les visser/souder à la masse. Sauf que dans la plupart des transistors, la « languette » est en fait reliée au drain. J'ai donc dû modifier mon routage et j'ai choisi de laisser les languettes verticales et à l'air libre.

3.1.2-Diagramme Fonctionnel

Pour concevoir mon ESC, je me suis basé sur mon schéma de principe afin d'en déduire un diagramme fonctionnel. Celui-ci est représenté ci-dessous et les fonctions qui lui sont rattachées sont explicitées ci-après.

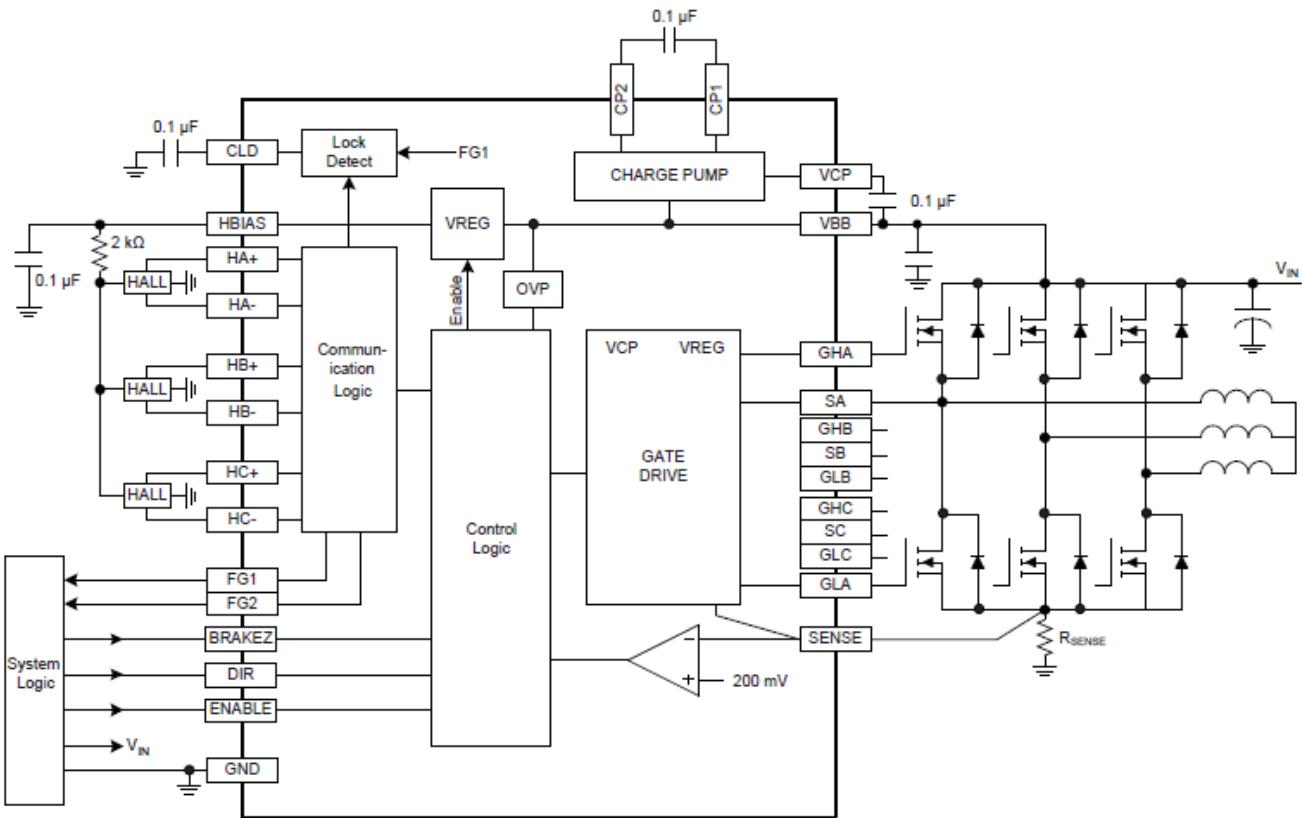
DIAGRAMME FONCTIONNEL Niveau 1



Fonction	Description
FP1- Driver	Reçoit les commandes du microcontrôleur (direction/vitesse) et drive (actionne) les transistors en fonction des capteurs à effet Hall. Surveille le bon fonctionnement.
FP2- Répartir	Répartit le courant dans les bobines en fonction de la vitesse voulue et du sens de rotation des moteurs voulu.
FP3- Agir	Transforme les informations et le courant en énergie mécanique.
FP4- Informer	Informe la carte mère de la bonne application des ordres envoyés.

Les fonctions secondaires sont liées au driver, et sont présentées dans la *datasheet* dont j'ai mis un extrait ci-après afin de comprendre les fonctions internes du driver.

Functional Block Diagram



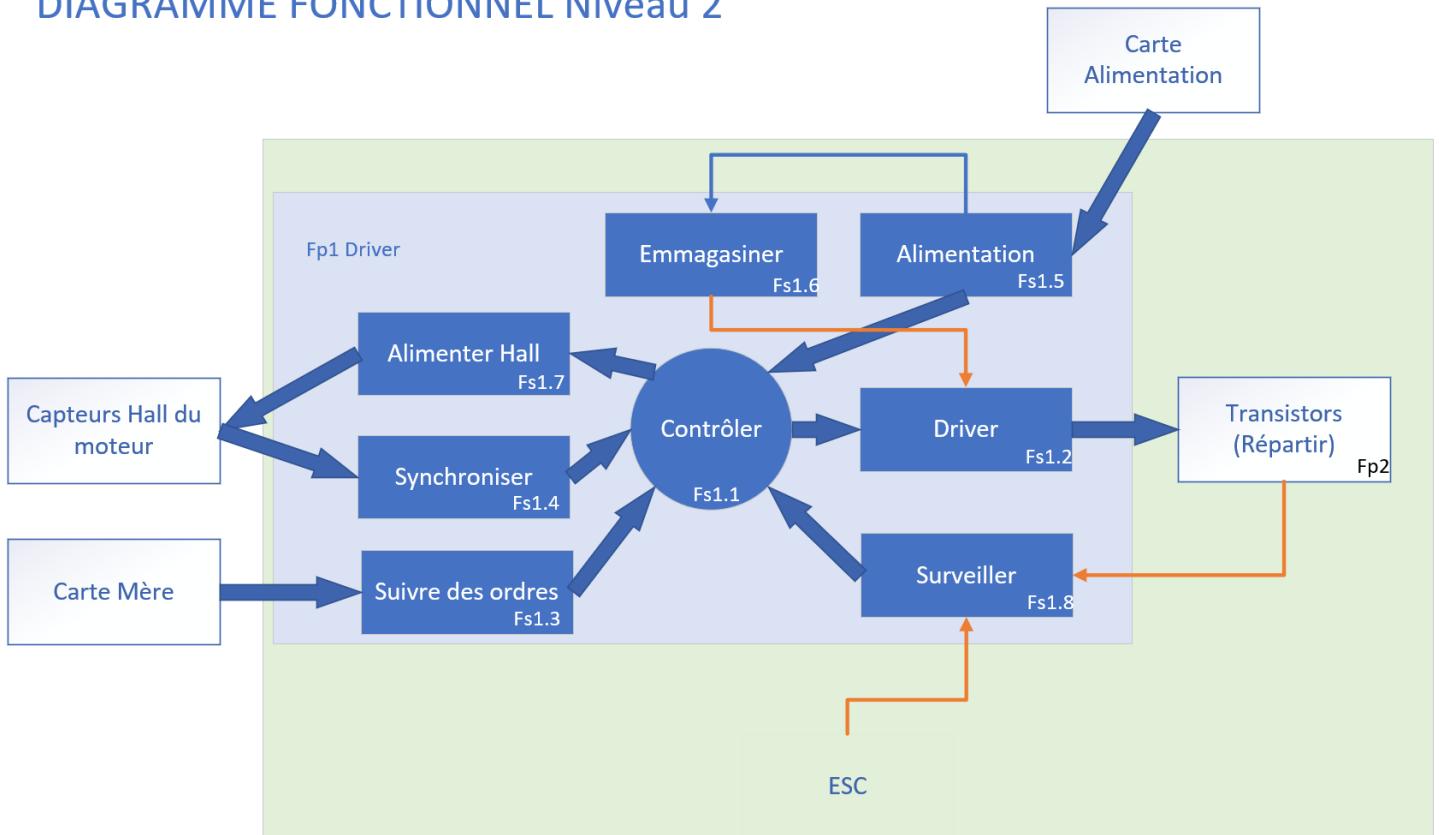
Terminal List

Number	Name	Description
1	HA+	Hall input A
2	HA -	Hall input A
3	HB+	Hall input B
4	HB -	Hall input B
5	HC+	Hall input C
6	HC-	Hall input C
7	GND	Ground
8	HBIAS	Hall bias power supply output
9	CP1	Charge pump capacitor terminal
10	CP2	Charge pump capacitor terminal
11	VBB	Supply voltage
12	VCP	Reservoir capacitor terminal
13	SENSE	Sense resistor connection
14	GLC	Low side gate drive C

Number	Name	Description
15	GLB	Low side gate drive B
16	GLA	Low side gate drive A
17	GHC	High side gate drive C
18	SC	High side source connection C
19	GHB	High side gate drive B
20	SB	High side source connection B
21	GHA	High side gate drive A
22	SA	High side source connection A
23	FG1	FG 1 speed control output (3 Φ inputs)
24	FG2	FG 2 speed control output (Φ A input)
25	CLD	Locked rotor detect timing capacitor
26	DIR	Logic input – motor direction
27	ENABLE	Logic input – external PWM control
28	BRAKEZ	Logic input – motor brake (active low)

Les fonctions internes étant à peine expliquées dans la *datasheet*, nous allons tout de même voir quelles sont les fonctions secondaires du composant.

DIAGRAMME FONCTIONNEL Niveau 2

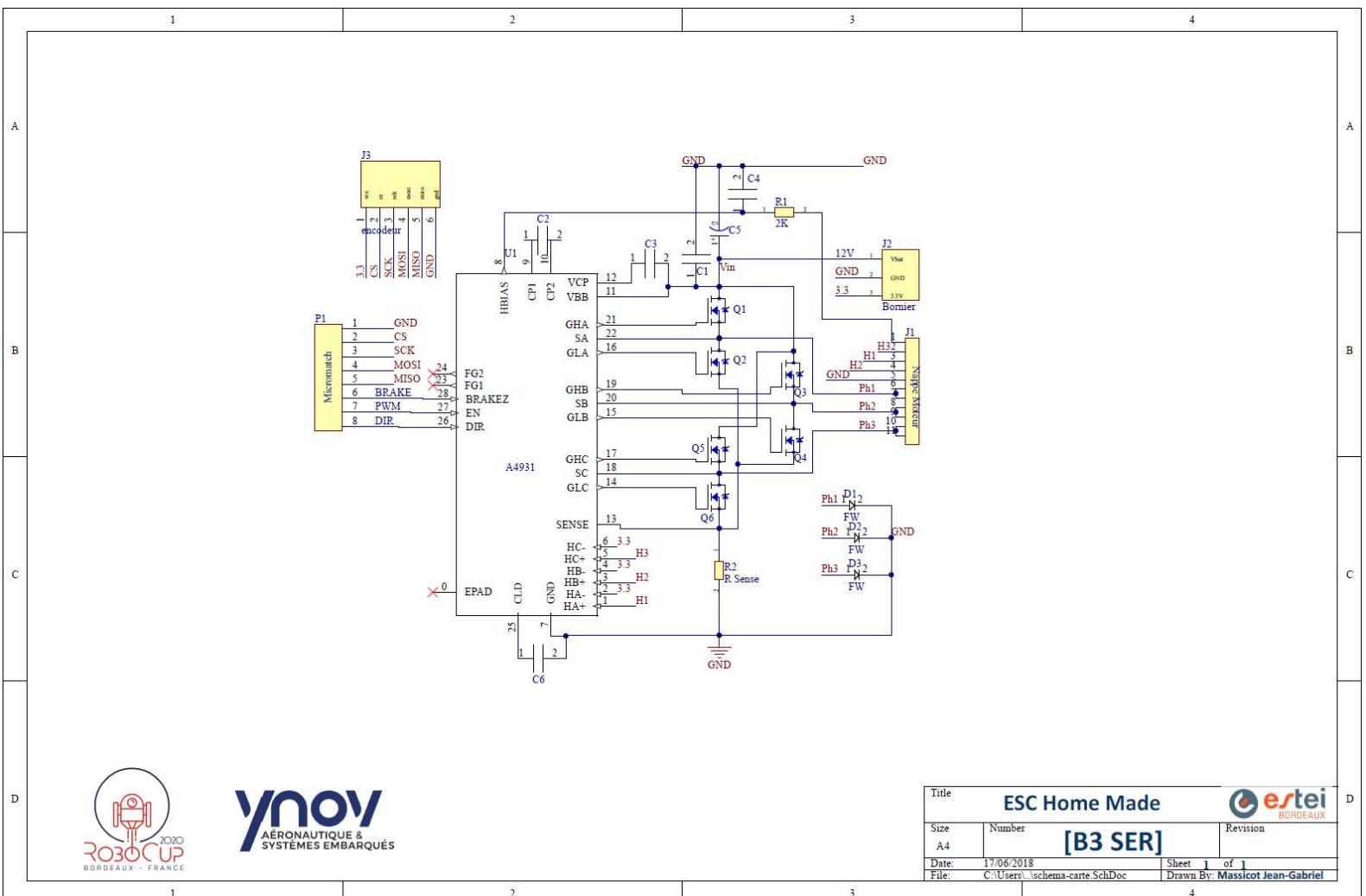


Fonction	Description
FS1.1- Contrôler	Cœur logique du composant, cette fonction permet de driver les transistors et d'alimenter les capteurs à effet Hall tout en tenant compte des retours des divers capteurs ou sécurités.
FS1.2-Driver	Contrôle les transistors au moyen de la tension emmagasinée en FS1.6. Broches 14 à 22,
FS1.3- Suivre les ordres	Trois ordres principaux : EN ou ENABLE (une pwm dont le rapport cyclique va influer sur la vitesse), DIR (une GPIO pour la direction:1 pour avancer et 0 pour reculer), et BRAKEZ (une seconde GPIO pour le frein : 1 Fonctionnement normal, 0, freinage magnétique). Broches 26,27,28
FS1.4-Synchroniser	Lire les capteurs à effet Hall pour synchroniser la transition des transistors. Fonctionnement en différentielle. Une broche H+ et une H- par capteur. Broches 1 à 6
FS1.5-Alimentation	Alimente le driver, la pompe de charge (fonction emmagasiner, FS1.6) et les phases du moteur en fonction des transistors. Broches 11 et 12
FS1.6-Emmagasiner	Correspond à la pompe de charge permettant d'avoir la tension suffisante pour activer les transistors. Broches 9 et 10
FS1.7-Alimenter Hall	Broche HBIAS dont la fonction est spécifiquement d'alimenter des capteurs à effet Hall dans un moteur qui les possède. Broche 8
FS1.8-Surveiller	Surveille les différents états de l'ESC : la température, le courant, la tension, le blocage du moteur, cette fonction utilise des éléments internes au composant mais également un prélèvement de tension au moyen de RSENSE, et un contrôle de blocage du moteur qui utilise la broche CLD.

Il est à noter que les broches FG1 et FG2 servent à des asservissements de vitesse. Il s'agit de deux GPIO dirigées vers la carte mère, cependant, disposant déjà de capteurs d'asservissement (les encodeurs) nous avons décidé d'économiser des broches de la carte mère et de ne pas utiliser ces deux broches. En effet Cela m'a évité de monopoliser huit broches GPIO in.

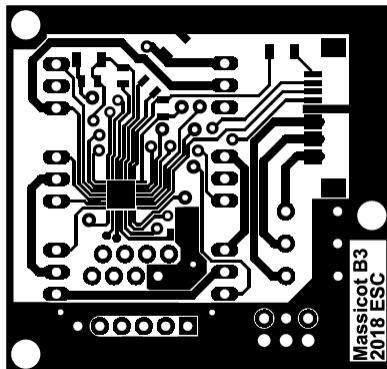
3.1.3-Schéma structurel

D'après les fonctions étudiées précédemment voici le schéma structurel de ma carte ESC :

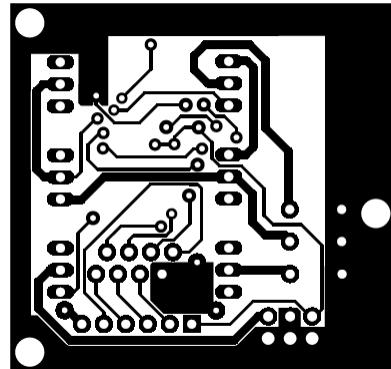


3.1.4-Tyon

Voici le typon de ma carte ESC :



Top Layer – ESC (1 :1)

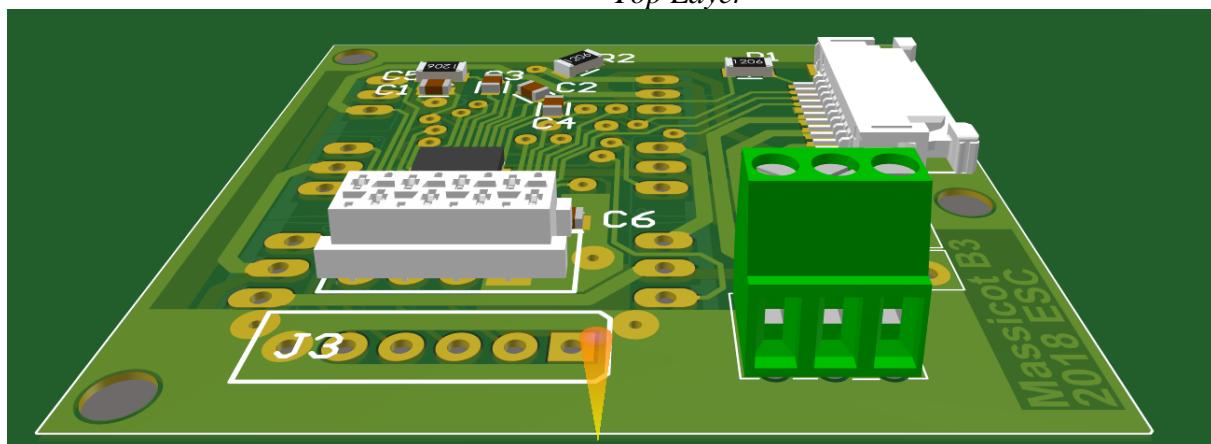


Bottom Layer – ESC (1 :1)

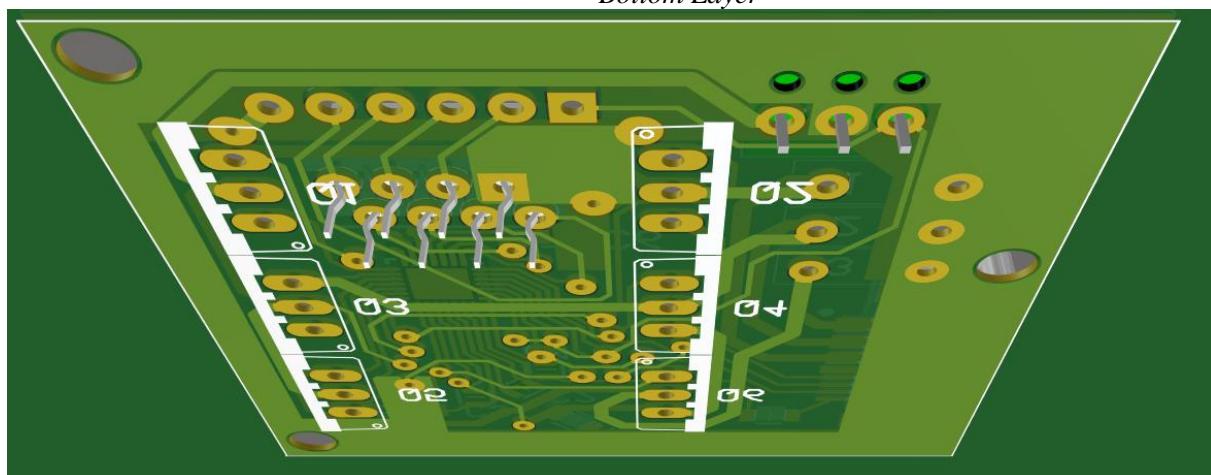
3.1.5-Représentation 3D

Pour avoir également une idée de la représentation physique, voici également une représentation 3D.

Top Layer



Bottom Layer



3.2-Conception 3D

3.2.1-Logiciel

Pour la conception des pièces de support moteur ou pour le châssis, j'ai décidé d'utiliser un logiciel de conception assistée par ordinateur de design 3D : *SolidWorks*, développé par *Dassault Systems*. Ce logiciel n'est

pas particulièrement facile à prendre en main, cependant, de la même façon que pour *Altium Designer*, une fois que le principe général est compris, on peut assez rapidement commencer à réaliser des pièces intéressantes.

Aloïs Miclo m'a montré quelques points à savoir sur le sujet, et j'ai également suivi des tutoriels disponibles sur internet.

Au début j'avais du mal à gérer mon projet, et pour modifier certains éléments j'en recréais par-dessus d'autres. Or il s'agit d'une source d'erreur conséquente pouvant bloquer une modification future. Depuis j'ai appris comment retourner sur une esquisse pour modifier certaines dimensions ou améliorer des éléments. Si je devais faire une pièce maintenant, je m'organiserais bien mieux qu'à mes débuts. J'ai réellement acquis des compétences sur ce logiciel de conception 3D. C'est quelque chose que j'ai entièrement découvert durant ce projet et qui m'a beaucoup intéressé.

3.2.2-Support Moteur

L'un des principaux éléments que j'ai du concevoir en impression 3D étaient les supports moteurs. Dont voici les spécifications :

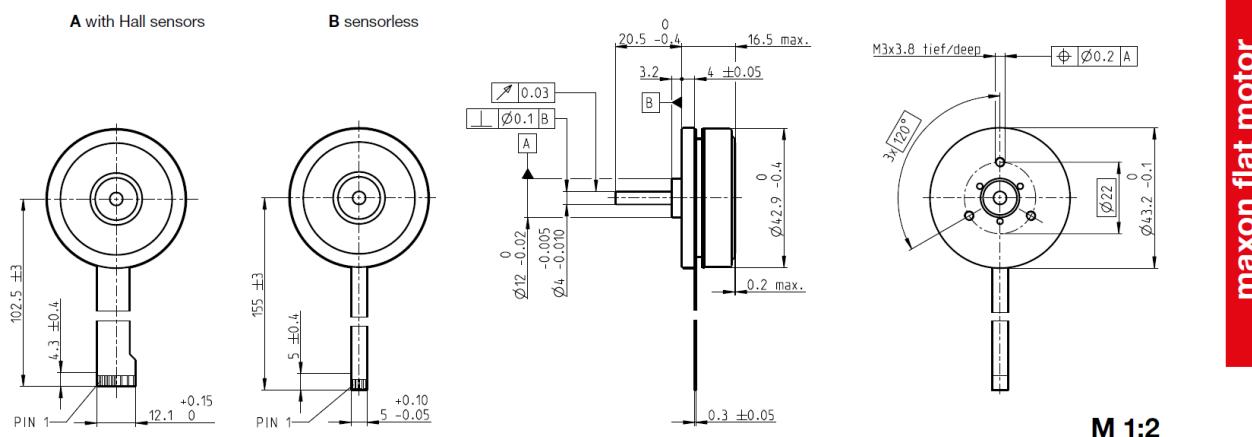
3.2.2.1-Généralités et cahier des charges

Le support moteur doit suivre certaines directives, de part le cahier des charges mais aussi de par les choix de conception que l'on doit faire. Il doit être résistant (possibilité de chocs, contraintes physiques). Il doit pouvoir s'intégrer avec la roue et le moteur, et doit pouvoir intégrer l'encodeur de façon à ce qu'il soit très près du moteur et de l'aimant. L'espace entre le sol et le bas du châssis doit être faible, mais ne doit pourtant pas dépasser quelques millimètres.

D'un point de vue technique il doit prévoir la sortie de la nappe du moteur et la fixation du moteur au moyen de trois vis de type M3 positionnées à 120° sur un cercle de 22mm.

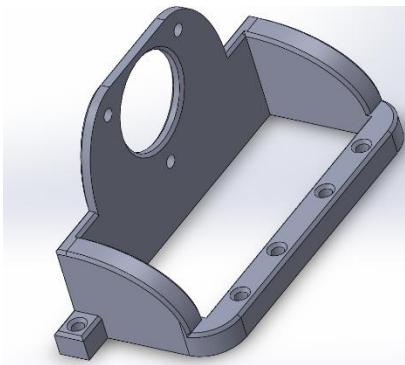
Globalement les données de dimensions à prendre en compte sont les données du moteur, qui sont indiquées ci-dessous.

EC 45 flat Ø42.9 mm, brushless, 30 Watt



3.2.2.2-Evolution du prototype

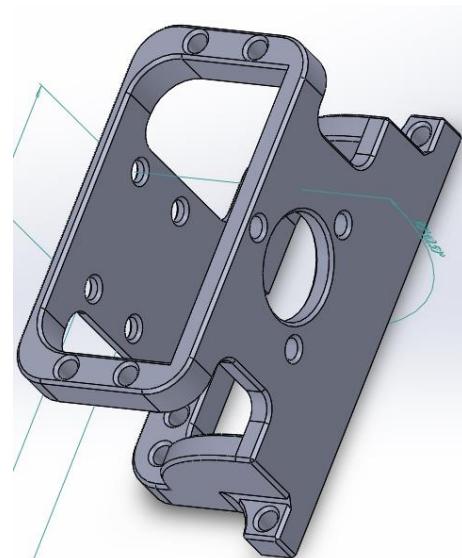
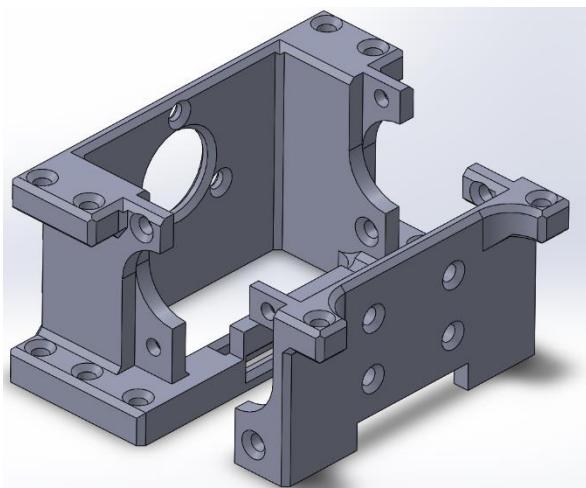
J'ai réalisé, pour le support moteur, trois prototypes différents. Pour m'habituer à l'utilisation du logiciel mais aussi pour avoir une première approche concrète de la conception 3D et de l'impression 3D, j'ai conçu un premier support moteur assez basique dont voici une représentation :



Il avait l'avantage d'être léger et de convenir aux dimensions du moteur. Cependant la fixation de l'encodeur n'était pas possible, et la structure était un peu fine et peu résistante aux contraintes. Par ailleurs la possibilité d'un deuxième étage, pour fixer divers éléments, n'était pas prise en compte. La marge entre les trous prévu pour fixer le support au châssis au moyen de vis M3 et les bords étaient également trop fins et peu résistants à la contrainte.

J'ai donc dû réaliser un second modèle de support moteur. Celui-ci était plutôt bien en termes de structure, mais Steve N'Guyen émettait tout de même quelques réserves en termes de solidité. Les dimensions étaient intéressantes, l'emplacement de l'encodeur était prévu ainsi que ses fixations, et le support pouvait être fixé à deux étages différents.

D'un autre côté il était très ajouré, ce qui est esthétique, peut être pratique et plus léger, mais en contrepartie la structure était inutilement fragilisée. Finalement, j'ai eu un fâcheux problème, à savoir qu'avec l'ouverture disponible, la longueur de l'axe moteur et l'angle de débattement, il était tout simplement impossible d'entrer le moteur dans son support. Voici à quoi ressemblait ce second support moteur :



J'ai donc fait part de ces problèmes à mes camarades travaillant sur la même partie que moi, et globalement la solution qu'ils ont trouvée a été de fendre leur pièce de manière à pouvoir encastrer l'axe directement. Mais cette solution ne me satisfaisait pas. Je trouvais qu'il s'agissait d'une fragilisation qui n'était pas nécessaire. J'ai donc décidé de concevoir un troisième support moteur. La solution que j'ai privilégiée a été de le faire en deux parties venant se fixer ensemble par des ergots et des trous pour des vis M3. Le fond étant escamotable, plus aucun souci pour fixer le moteur, ni l'encodeur. De plus j'ai renforcé chaque partie de la pièce, et amélioré les ergots de fixation. Désormais elle est semblable à l'image ci-contre.

Globalement cette pièce remplis toutes les demandes du cahier des charges et toutes les contraintes sont prises en compte. Cette pièce a cependant le défaut d'avoir été conçue dans un sens, pour une utilisation où le haut et le bas sont inversés. Cela n'a pas d'impact particulier sur la maquette, d'autant que la manipulation d'objet 3D dans l'espace, pour la visualisation, est aisée sur SolidWorks, cependant c'est à prendre en compte notamment au niveau du châssis, mais aussi de son encombrement, car le dessus et le dessous ont des positionnements de fixation différents. D'ailleurs un des défauts de cette pièce est cet encombrement qu'il faut réussir à concilier avec les autres pièces. Enfin les trous de fixation entre les deux pièces sont situés de telle façon qu'il n'est pas simple de manipuler des vis M3 avec le peu d'interstice disponible une fois le moteur en place. Cependant j'ai décidé de garder ce support moteur qui est tout de même parfaitement fonctionnel.

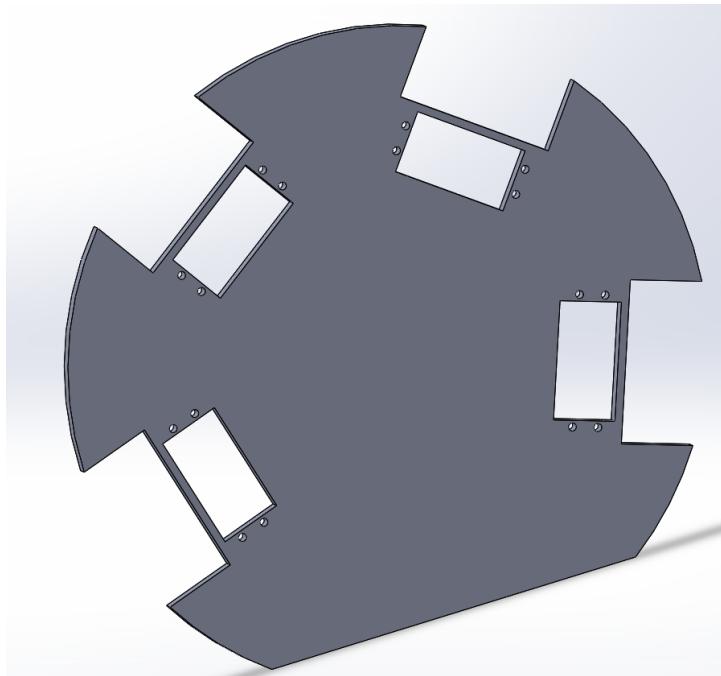
3.2.3-Le châssis

3.2.3.1-Généralités et cahier des charges

Le châssis doit remplir la fonctionnalité de fournir une base solide aux éléments de structures, de mobilité, ainsi qu'aux cartes électroniques. Il doit avoir une forme circulaire d'un diamètre maximum de 25cm. Aucun élément fixé dessus ne doit dépasser ces 25cm demandés dans le cahier des charges. Il doit permettre la fixation des supports moteurs, du *dribbler* (rouleau, moteur, support) du *kicker*, la présence de capteurs optiques, et la fixation sur plusieurs étages de cartes électroniques. Le Matériau doit être résistant.

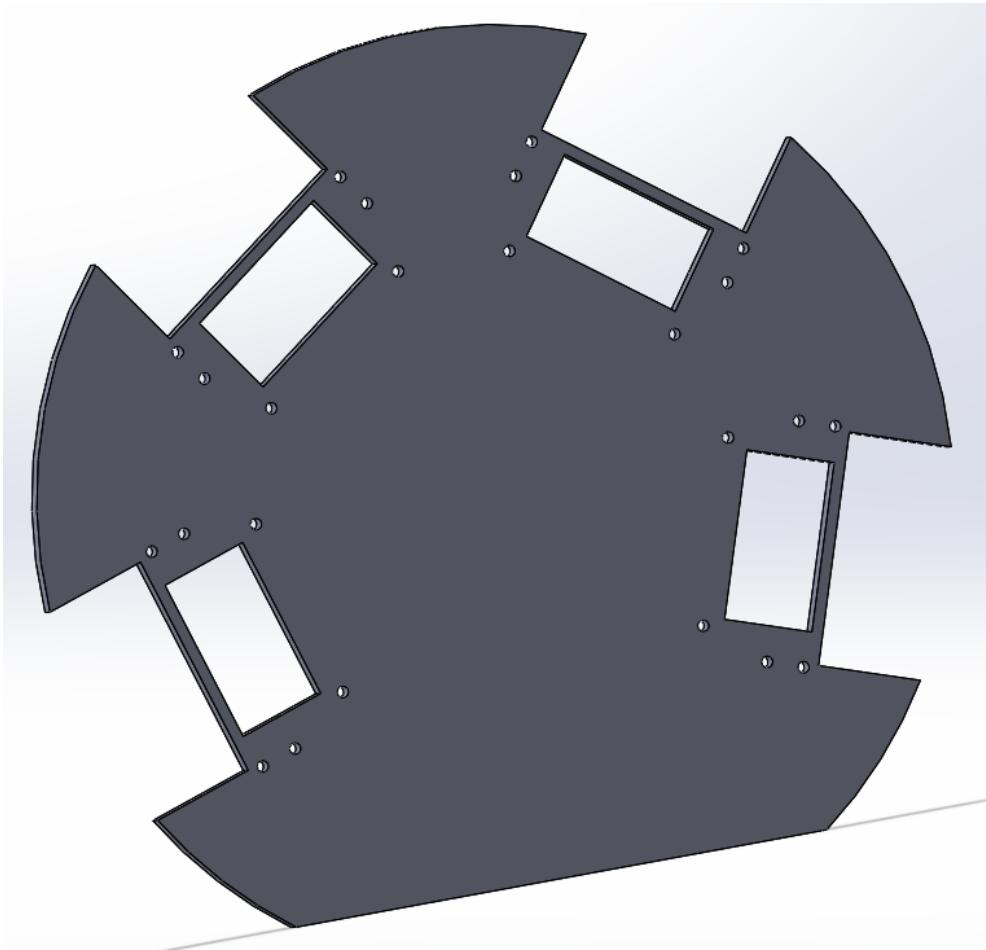
3.2.3.2-Evolution du prototype

Pour le châssis, j'ai également conçu trois modèles différents. Le premier avait les fixations conçues pour le second modèle de supports moteurs, donc inefficient. Ci-dessous on peut voir tout de même à quoi il ressemblait. A noter que la partie plate est l'avant, destinée à recevoir le futur *dribbler*.



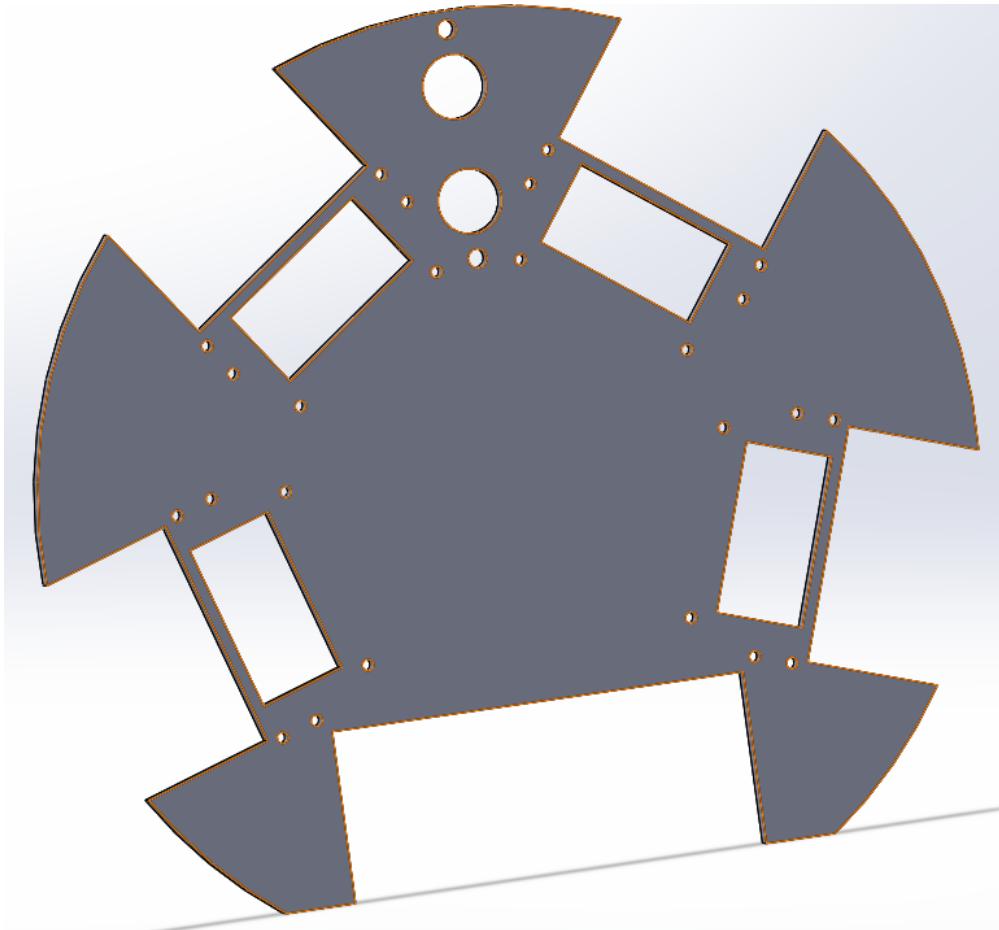
En revanche j'ai pu constater la solidité du matériau fourni par Steve N'Guyen, ainsi que la précision de la découpe laser. Ce matériau de bois reconstitué à forte densité, sur une épaisseur de 6mm et découpé au laser, réduisant ainsi les fragilités pouvant être liées aux contraintes des découpes mécaniques, était un excellent produit pour du prototypage, quoiqu'un peu lourd. Pour un modèle de robot plus aboutit, j'aurai probablement étudié la possibilité d'un châssis en aluminium d'une épaisseur beaucoup moins importante et bien plus léger, où alors avec un budget conséquent, éventuellement du carbone. Cependant il n'en était pas question pour ce projet, donc ce type de châssis là convenait parfaitement.

Pour le deuxième châssis, dont une illustration est donnée ci-dessous, il correspondait parfaitement au troisième support moteur. Son principal défaut étant d'une part que les roues dépassaient un peu du cercle des 25cm de diamètre imposé, et d'autre part qu'au moment où je l'ai réalisé, une partie des pièces comme le *dribbler* n'était pas finalisée et donc je manquais d'informations sur les dimensions de ces éléments.



Enfin le troisième prototype correspond au cahier des charges et les supports moteurs, et le *dribbler* ont pu être fixés dessus sans problème majeur. La place pour le *kicker* est également suffisante. Cependant les emplacements des capteurs optiques de déplacement sont mal positionnés, de telle façon qu'entre les deux supports moteurs, une carte qui était supposée passer, ne passe pas. Il aura fallu sans doute mettre les capteurs non pas à l'arrière mais sur un côté. En effet le *kicker* prend beaucoup moins de place en largeur qu'en longueur.

En dehors de ça nous avons conservé ce modèle car il correspondait à la plupart des attentes du cahier des charges et que nous n'avions plus assez de temps pour en refaire un dernier. Avec quelques jours de plus, le châssis aura rassemblé tous les critères. Voici donc la dernière version du châssis du robot :



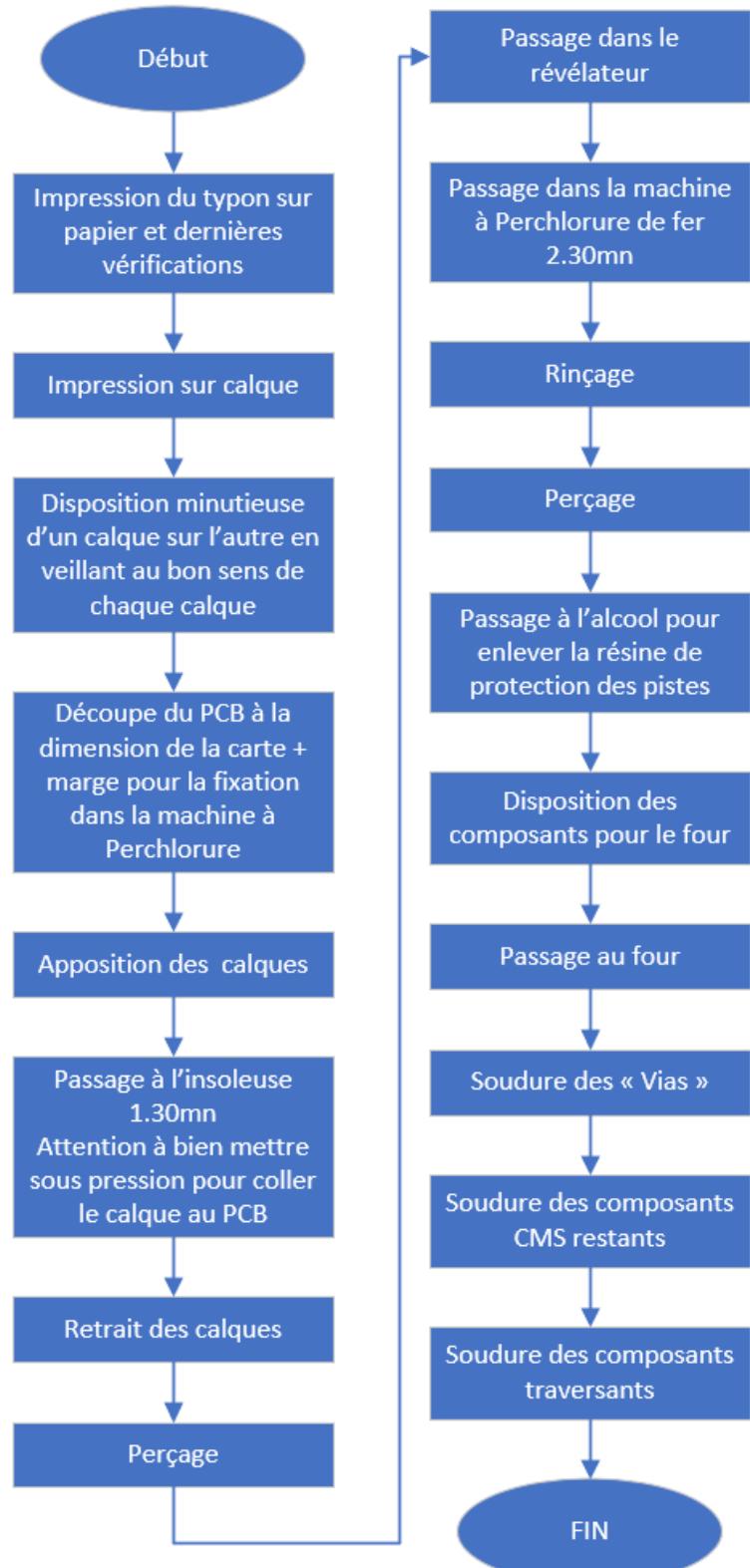
4-Production de la carte électronique

4.1-Matériel à disposition

Pour réaliser les cartes électroniques, l'école a mis à notre disposition du matériel. Nous avions ainsi des plaques de PCB composées de résine époxy et couvertes en double face par une couche de cuivre. Également, un Massicot pour la découpe des plaques. L'école met aussi à disposition une insoleuse, machine à UV auxquels l'exposition du cuivre va déterminer les endroits où le cuivre doit partir. Une machine à perchlorure de fer, pour dissoudre le cuivre aux endroits voulus et rincer la carte. Un four à composants CMS, pour fixer certains composants particuliers, mais qui peut servir à tous les composants CMS. Plusieurs perceuses, des pompes à dessouder et des fers à souder avec différentes panes. Du consommable comme de l'étain, des tresses à dessouder, du flux de soudure, ou de la pâte à braser. Et enfin des produits chimiques tels que du révélateur et de l'alcool.

4.2-Protocole de production d'une carte à partir du matériel

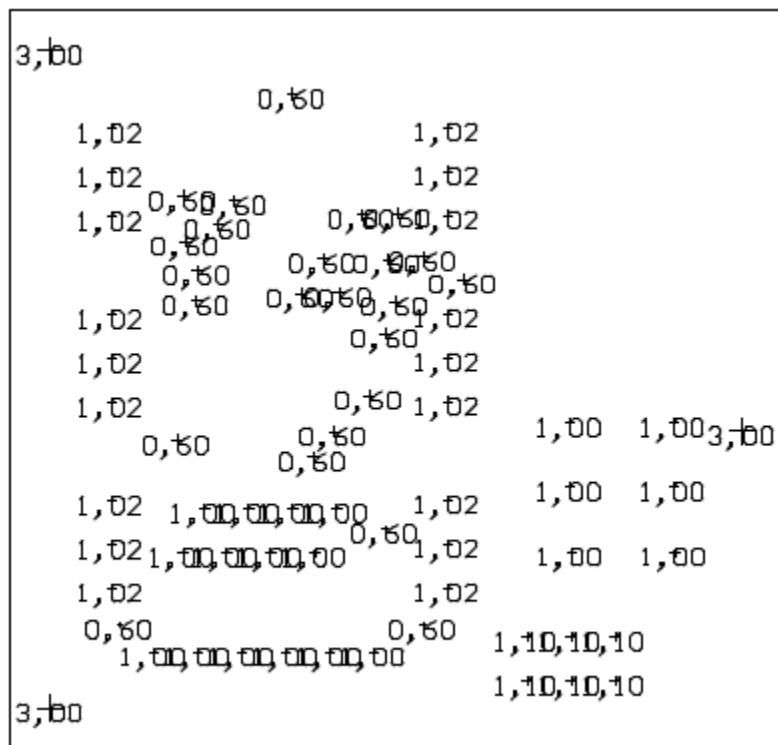
Certains de mes camarades n'avaient jamais tiré de carte électronique avant cette année. Par ailleurs, le matériel étant un peu différent entre les établissements de formation, certains détails sont parfois différents et demandent une légère adaptation. Je propose donc un protocole simple, d'une part pour mettre en forme la partie pratique de la conception de cartes électroniques de ce projet, et d'autre part qui pourrait être distribué aux nouveaux étudiants de l'école qui vont être amenés à produire des cartes. Voici ce protocole :



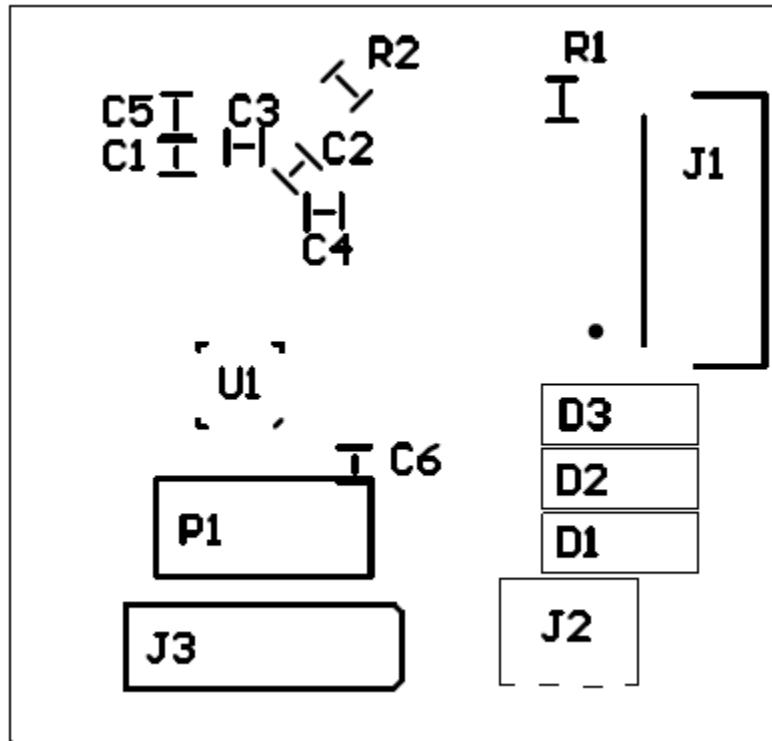
4.3-Plan de perçage et overlays

Afin de faciliter le perçage, le logiciel *Altium Designer* propose un plan de perçage en fonction de la taille et de la position des trous présents sur le Typon. Voici donc ce plan de perçage :

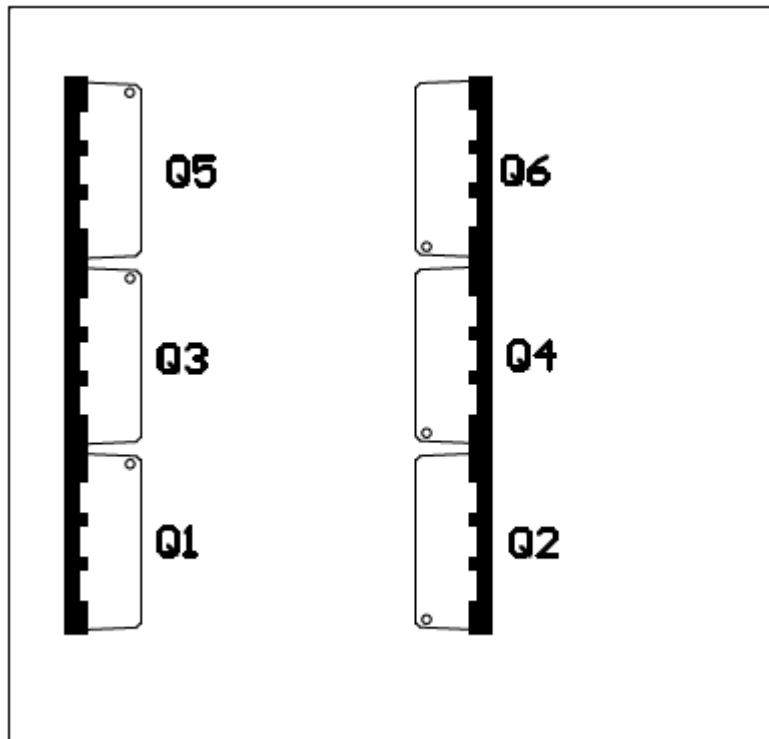
Drill Map (2 :1)



De la même façon, pour positionner les composants et pour bien les situer sur la carte voici les représentations des « overlays » donné par *Altium Designer*.



Top Overlay (2 :1)



Bottom Overlay (2 :1)

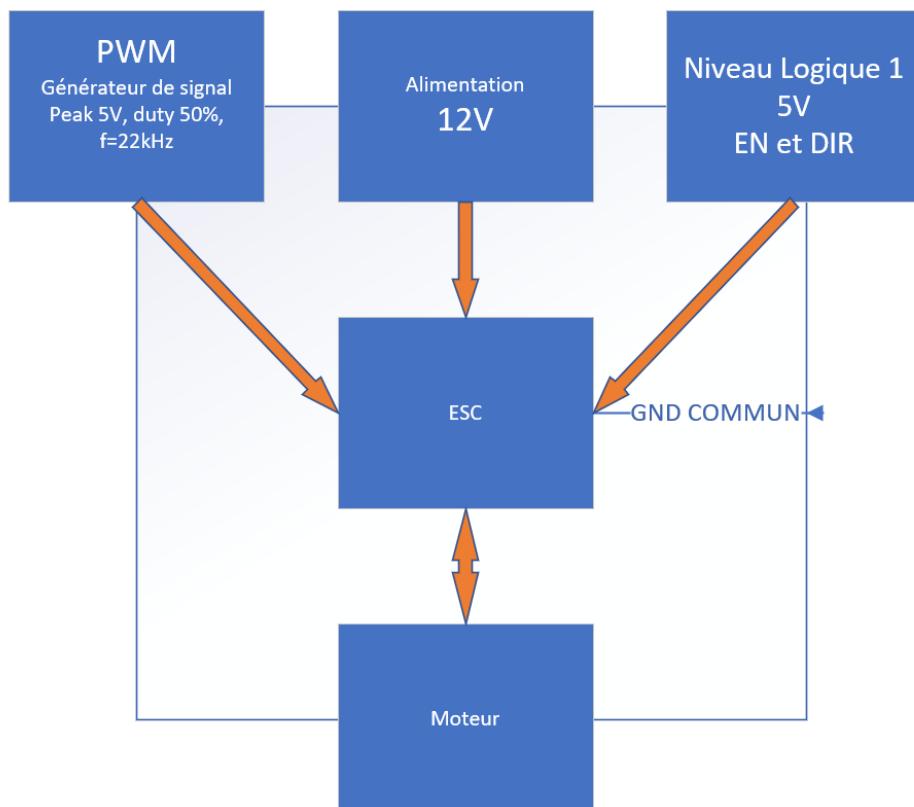
5-Tests, bugs, recherche de solutions

5.1-Première Carte

Une fois la carte terminée, il a fallu tout tester. Après avoir corrigé de petits bugs dus à des imperfections de la carte, j'ai réalisé des tests de continuité qui se sont avérés bons. Comme le test de continuité ne laissait pas transparaître un court-circuit, j'ai ensuite alimenté la carte à l'aide d'une alimentation de laboratoire, en ne connectant que le GND et le 12V, pour vérifier qu'il n'y ait pas de problème. Comme tout allait bien, après avoir éteint, j'ai connecté les broches de direction de de frein magnétique à 1 logique au moyen d'une alimentation en 5V.

Puis j'ai connecté la PWM à un générateur de signal, réglé sur impulsion car le réglage du rapport cyclique est moins limité que pour un signal carré classique avec ces générateurs. A savoir que le driver lit comme rapport cyclique l'état bas. J'ai réglé la fréquence à 22 kHz, car elle doit être comprise entre 20 et 30 kHz. Avec un rapport cyclique de 50 % et une tension de 0 à 5V. Le tout avec des masses communes. Selon le schéma suivant :

MONTAGE DE TEST

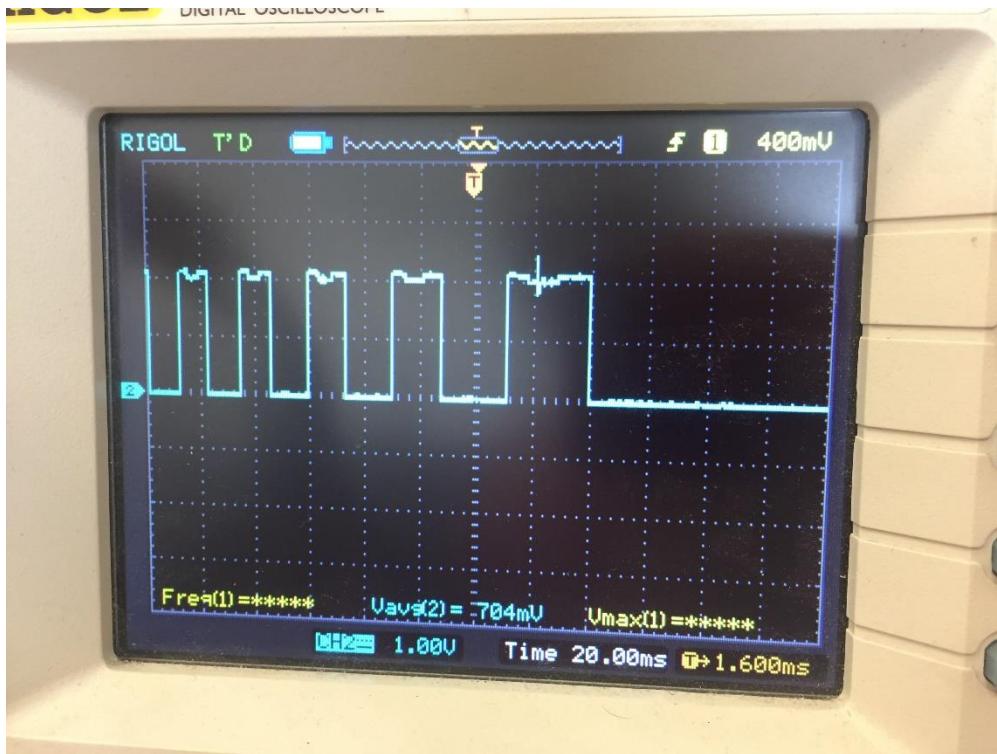


Puis j'ai rallumé l'alimentation 12V et toutes les voies que je venais de connecter. Aucun résultat.

Le premier problème que j'avais a été que le connecteur de la nappe moteur était à l'envers. En effet j'avais conçu ma carte comme si les contacts dans le connecteur se faisaient en bas, avec la nappe moteur tournée vers le sol, alors qu'en fait les contacts se font en haut, et la nappe du moteur doit être positionnée vers le haut. J'ai corrigé ça en soudant de façon assez artisanale un second connecteur retourné par rapport au premier. Ce n'était pas une solution durable mais ça a permis au moins de continuer les tests.

En reprenant les tests, il ne se passait toujours rien. Les tensions étaient bonnes partout, on avait un retour des capteurs à effet hall du moteur en le tournant manuellement, la fonction BRAKEZ du moteur (le frein magnétique) fonctionnait. Mais rien de plus.

Ci-dessous une photo de l'oscilloscope montrant le retour des capteurs à effet Hall en tournant manuellement le moteur :



J'ai donc émis plusieurs hypothèses.

- 1- Le driver comporte un pad thermique. Il n'est indiqué nulle part si le pad thermique doit être connecté à la masse pour une dissipation sur le plan de masse, ou si il doit être séparé. Personnellement je l'avais relié à la masse, mais peut-être était-ce une erreur.
- 2- Le moteur se met en sécurité pour une raison ou une autre. En effet il possède de nombreuses sécurités en cas de tension ou de courant hors gabarit. Il y a également des sécurités thermiques, et une sécurité de détection de blocage des roues.
- 3- Il y a un court-circuit invisible sous le driver. La soudure ayant été faite au four, étant donné qu'il s'agit d'un composant plaqué, il peut y avoir des imperfections.

Après avoir testé en désactivant toutes les sécurités possibles petit à petit, en testant différentes possibilités, j'ai fini par faire une erreur de manipulation entraînant un court-circuit et la destruction du driver. Cependant cela nous a permis d'éliminer l'hypothèse des sécurités telles que celle de blocage des roues ou de surtension.

5.2-Comparaison avec l'ESC d'un collègue.

Entre temps nous avons testé la carte d'un de mes collègues, Matthieu Castets. Sa carte réagissait exactement comme la mienne, mais ses choix de conception tel que connecter son pad thermique à la masse étaient similaires aux miens. Mais en tout cas cela nous a permis d'éliminer l'hypothèse d'un faux contact caché.

De plus, en testant sur un composant à vide, il s'est avéré que le pad thermique n'était connecté à l'intérieur sur aucune broche. Donc certes pas à la masse mais à rien qui aurait pu le mettre en sécurité s'il était relié au GND.

L'hypothèse la plus probable était alors une mauvaise interprétation du driver. En effet, celui-ci a des entrées H+ pour les capteurs à effet Hall du moteur, mais également des entrées H-. Or s'il s'agissait de différentiels classiques, en connectant les H- à la masse, cela aurait dû marcher. C'est la solution que nous avait proposée Steve N'Guyen.

Selon certaines données de la datasheet, nous nous sommes dit qu'il fallait sûrement de quoi donner un niveau logique 1 sur H-, soit en l'alimentant de l'extérieur, soit au moyen de portes logiques inversant les H+.

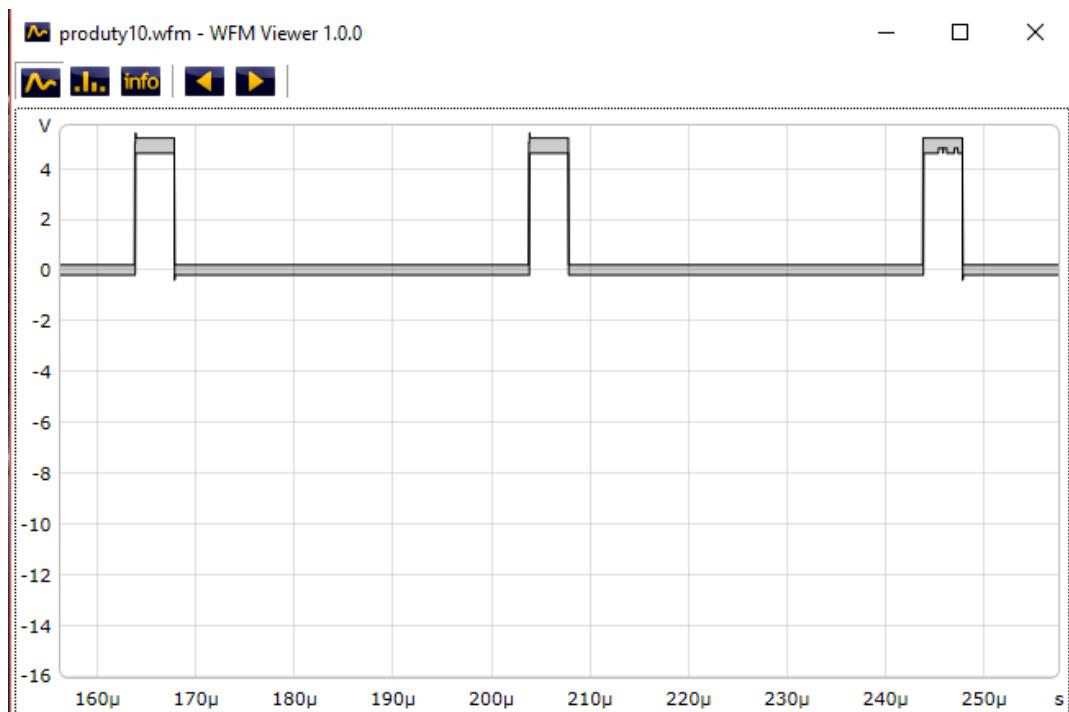
5.3-Deuxième carte

Pour trouver une solution, avec M Aloïs Miclo, nous avons conçu un nouvel ESC mais en différentes parties escamotables, testables sur une *board* de laboratoire. Nous avons décidé de reproduire mon schéma, mais avec le pad thermique non connecté à la masse, et en alimentant les H- à l'aide d'une alimentation en 6V. Avant le branchement, on s'est rendu compte que le VCC était en continuité avec la masse. Après divers tests, il s'est avéré que cela venait du driver. Après changement du driver, le moteur s'est alors mis à tourner, avant de se mettre en sécurité, et le driver de chauffer jusqu'à une température très importante. Puis refroidir aussi vite. On a testé en baissant l'alimentation à 3,3V, et l'ESC s'est mis en sécurité au bout d'un plus long moment avec le même phénomène du driver qui chauffe puis refroidi très vite. Manifestement du courant passait dans le driver, ce qui paraît assez contre intuitif.

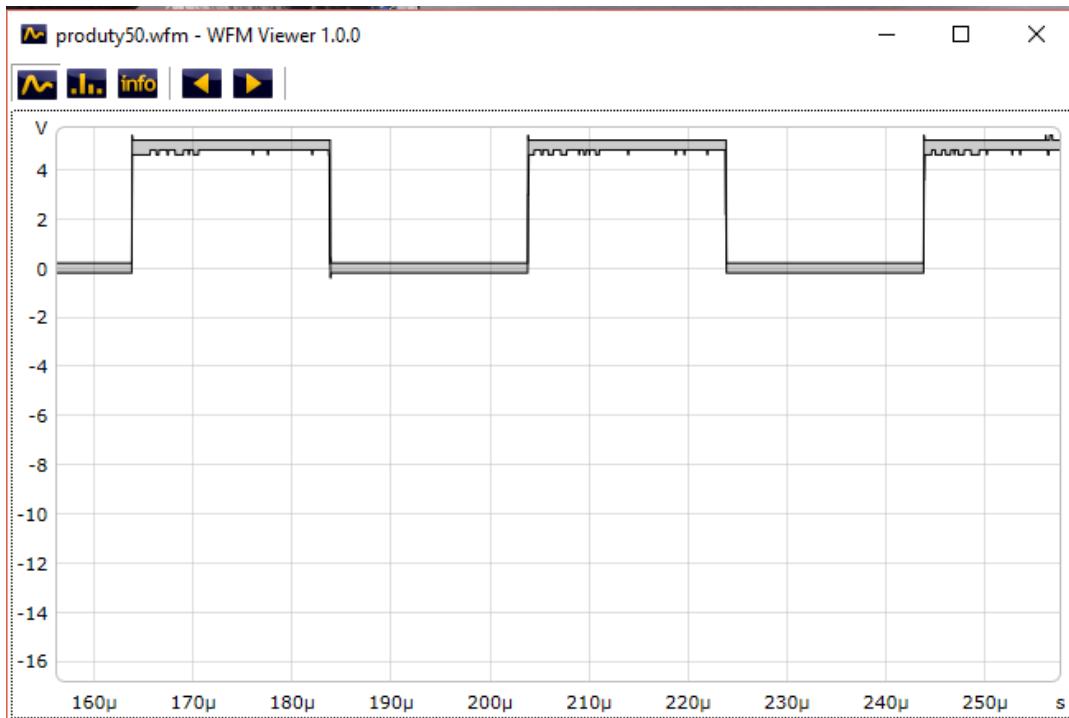
Un camarade nous a alors fait la remarque qu'avec des diodes de roue-libre supplémentaires (il y en a dans les transistors), ce serait peut-être suffisant. Nous avons décidé de n'en mettre que trois, une entre chaque phase et la masse, bloquant dans le sens (phase → masse) et passant dans le sens (masse → phase).

Ça a été parfait. Le moteur a réagi exactement comme on l'attendait depuis le début. Toutes les fonctions ont parfaitement fonctionné. Le driver ne chauffait plus et ne se mettait plus en sécurité, malgré des ordres contraignants (changement de direction, frein, variation de pwm assez brutal).

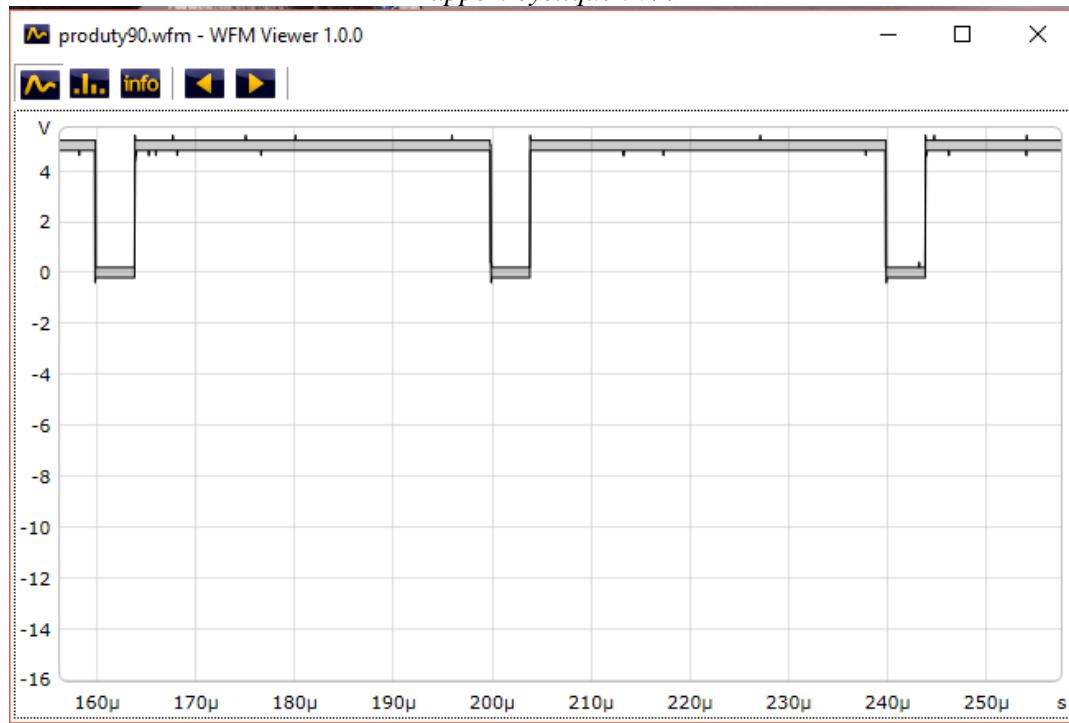
Ci-dessous les variations de rapport cyclique que nous avons envoyé :



Rapport Cyclique 10%



Rapport cyclique 50%



Rapport Cyclique 90%

Nous avons ensuite décidé de tester un montage en mettant une diode de roue libre en parallèle de celle présente dans chaque transistor, à partir de là plus rien n'a fonctionné correctement, même en revenant au schéma initial des trois diodes sur les phases.

5.4-Troisième carte

Une possibilité était que le driver ou un composant quelconque du montage de laboratoire soit défectueux. Comme la recherche aurait pris trop de temps, et que le temps commençait à être compté, nous avons décidé que

chaque personne en charge des ESC retirera une carte. Matthieu Castets a testé avec la porte logique sans succès, et Clément Millereux, Nicolas Gibaud et moi-même avons reproduit le schéma qui avait marché. Sans le moindre succès de façon assez incompréhensible.

Le seul résultat que j'ai obtenu est un léger début de mouvement qui s'arrête immédiatement. Le temps jouant contre nous, aucun d'entre nous n'a pu trouver ni de raisons, ni de solution, pour faire fonctionner un ESC correctement.

6-Gestion de projet

6.1-Bon de commande

Voici, ci-dessous, le bon de commande correspondant au budget de ma partie. On peut constater que le coût de revient pour les quatre ESC est de 143,31€ TTC (119,41€ HT). Une grosse part de ce budget est à imputer aux BON_DE_COMMANDE

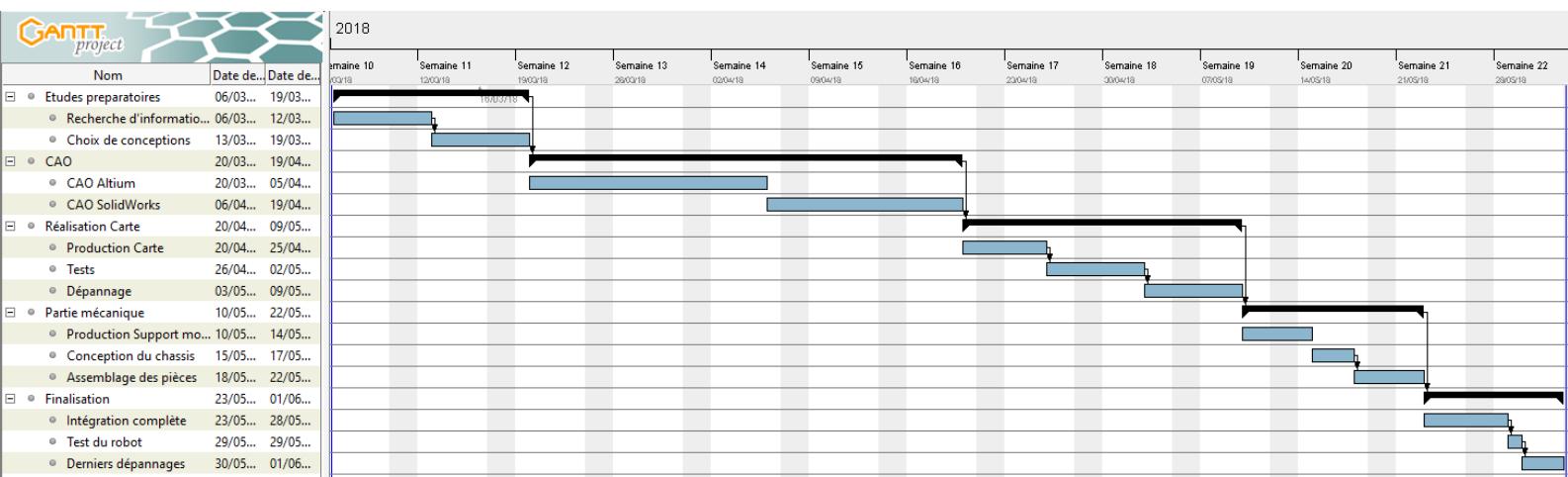
BON DE COMMANDE		N° bon commande :	1.3	Date :	14/03/2018 modif le : 23/03/2018 30/03/2018 20/06/2018	Opérateur :	MASSICOT Jean-Gabriel				
Dénomination Produit	Constructeur	Référence Constructeur	Fournisseur	Réf Site	Qtté	P.U. HT	Communiqué ou calculé	P.U. TTC	Communiqué ou calculé	Sous Total HT	Sous Total TTC
Moteur Brushless	Maxon Motors	17-EN-265 EC 45 flat	Maxon Motors	EC 45 flat	4	64,36 € (par 20)	Communiqué	77,23 €	Calculé	Non budgetisé	Non budgétisé
Condensateur CMS 0,1 µF 0805	AVX	08051C104K4T2A	Farnell	1833888	25	0,179 €	Calculé	0,215 €	Communiqué	4,475 €	5,375 €
Res 2K CMS 1206	multicomp	MCWR12X2001FTL	Farnell	2447495	10	0,09 €	Calculé	0,01 €	Communiqué	0,900 €	0,110 €
Driver de moteur DC Brushless	Allegro	A4931	Farnell	A4931METTR-T	4	1,73 €	Calculé	2,07 €	Communiqué	6,90 €	8,28 €
Transistor FET	Fairchild semiconductor	FQP30N06L	Farnell	FQP30N06L	25	0,748 €	Calculé	0,897 €	Communiqué	18,688 €	22,425 €
Encodeur	ams AG	AS5048A	Digi-key	AS5048A-AB-1.0-ND	4	12,58 €	Calculé	15,09 €	Communiqué	Non budgetisé	Non budgétisé
Roue Omni (holonomes)	Nexus Robot	RB-Nex-75	robotshop	RB-Nex-75	4	12,98 €	Communiqué	15,58 €	Communiqué	51,92 €	62,32 €
Moyeux roue omni	Nexus Robot	RB-Nex-78	robotshop	RB-Nex-78	4	5,80 €	Communiqué	6,96 €	Communiqué	23,20 €	27,84 €
Bornier fil-à-carte 3 voies	Phoenix Contact	1725669	Farnell	3041360	4	0,830 €	Calculé	1,000 €	Communiqué	3,320 €	4,000 €
Connecteur embase fil-à-carte 8 voies	Tyco Electronics	2178710-8	Farnell	2473350	8	0,268 €	Calculé	0,321 €	Communiqué	2,144 €	2,568 €
Nappe CM-ESC 8 voies	Tyco Electronics	1483352-3	Farnell	1056215	4	1,750 €	Calculé	2,10 €	Communiqué	7,000 €	8,40 €
Condensateur de découplage polarisé Tantale	AVX	F951E106MAAAQ2	Farnell	2408407	5	0,698 €	Calculé	0,837 €	Communiqué	3,490 €	4,185 €
R-sense resistor	T T Electronics	ULR1S-R003FT2	Farnell	1621964	5	0,549 €	Calculé	0,659 €	Communiqué	2,745 €	3,295 €
								TOTAL	119,41 €	143,31 €	

roues holonomes (62,32€) aux moyeux (27,84€) et aux transistors FET (22,425€). Ces trois pôles font environ 113€ soit une trentaine d'euros pour tout le reste.

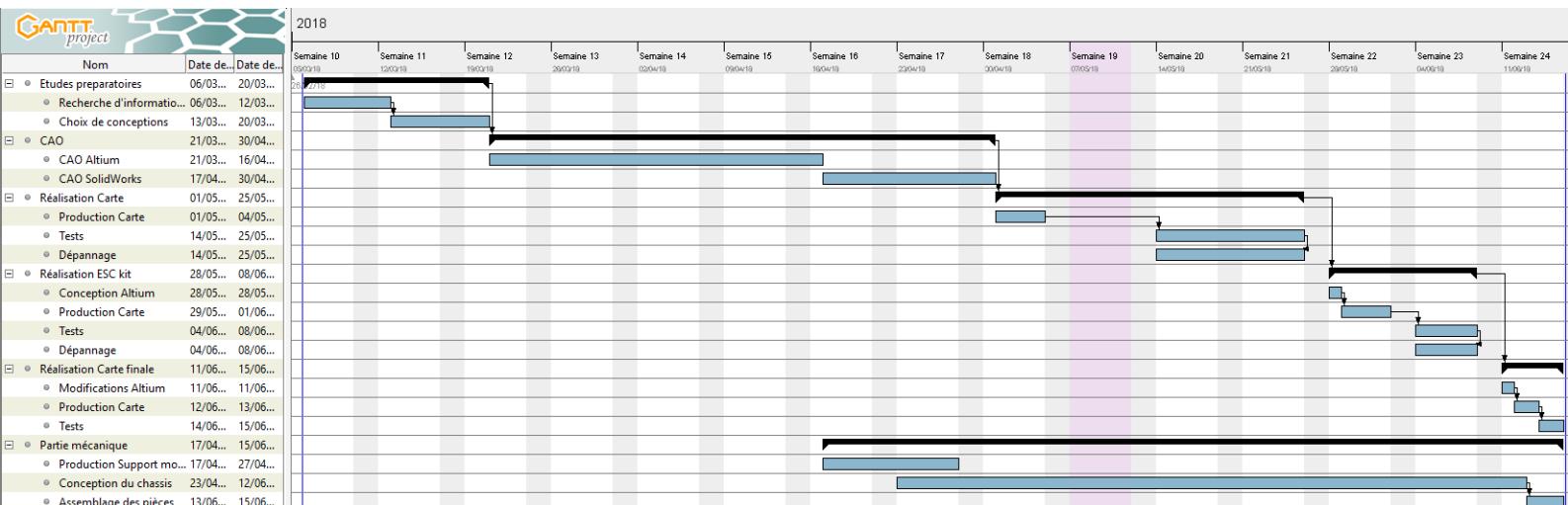
6.2-Calendrier

Au début de ce projet, nous avions fait une planification prévisionnelle du projet. On peut désormais la comparer avec la répartition temporelle réelle du projet. On peut voir que cela a beaucoup évolué.

Planification prévisionnelle



Calendrier réel



Conclusion

Malheureusement et de façon assez frustrante, nous n'avons pas pu faire fonctionner d'ESC ni intégrer l'ensemble des parties en un robot fonctionnel. Il aurait sans doute fallu un mois de plus environ.

Cependant ce projet a été très intéressant en termes de conception, de réflexion, et de travail de groupe. En effet il y a eu une double émulation, d'une part au sein de mon propre groupe, et d'autre part avec mes camarades des autres groupes chargés également des mêmes parties que moi. De plus, étant donné que nous avions tous le même but commun au sein de l'équipe, chacun s'est entraîné selon les compétences privilégiées de chacun.

Pour ma part ce projet m'a permis de développer de nouvelles compétences, notamment autour de la conception 3D sur *SolidWorks*, mais aussi sur le logiciel *Altium Designer*. Par ailleurs en termes de gestion de projet, j'ai également pris de l'expérience. Par exemple, si je devais refaire un projet, je commencerais par faire une carte de test pour *board* de laboratoire afin de développer un système fonctionnel avant de réaliser ma première carte électronique, plutôt que de faire le contraire comme durant ce projet.

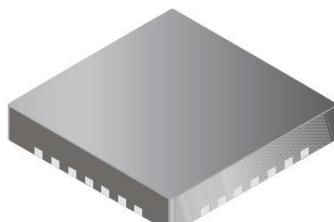
J'ai également découvert la robotique, les parties motrices et la mécanique et cela m'a beaucoup intéressé. J'ai également découvert la RoboCup, qui outre un divertissement certain comporte aussi une face technologique passionnante, et un terrain d'innovation sans limite.

3-Phase Brushless DC Motor Pre-Driver

Features and Benefits

- Drives 6 N-channel MOSFETs
- Synchronous rectification for low power dissipation
- Internal UVLO and thermal shutdown circuitry
- Hall element inputs
- PWM current limiting
- Dead time protection
- FG outputs
- Standby mode
- Lock detect protection
- Overvoltage protection

Package: 28-contact QFN (ET package)



Approximate Scale 1:1

Description

The A4931 is a complete 3-phase brushless DC motor pre-driver. The device is capable of driving a wide range of N-channel power MOSFETs and can support motor supply voltages up to 30 V. Commutation logic is determined by three Hall-element inputs spaced at 120°.

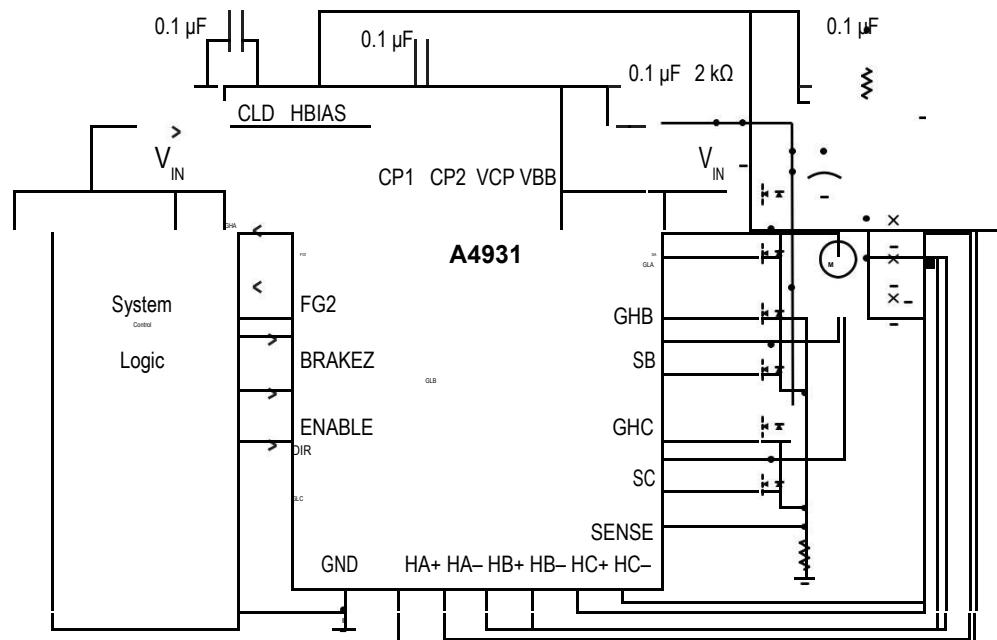
Other features include fixed off-time pulse width modulation (PWM) current control for limiting inrush current, locked-rotor protection with adjustable delay, thermal shutdown, overvoltage monitor, and synchronous rectification. Internal synchronous rectification reduces power dissipation by turning on the appropriate MOSFETs during current decay, thus shorting

the body diode with the low $R_{DS(on)}$ MOSFET. Overvoltage protection disables synchronous rectification when the motor pumps the supply voltage beyond the overvoltage threshold during current recirculation.

The A4931 offers enable, direction, and brake inputs that can control current using either phase or enable chopping. Logic outputs FG1 and FG2 can be used to accurately measure motor rotation. Output signals toggle state during Hall transitions, providing an accurate speed output to a microcontroller or speed control circuit.

Operating temperature range is -20°C to 105°C . The A4931 is supplied in a $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$, 28-terminal QFN package with exposed thermal pad. This small footprint package is lead (Pb) free with 100% matte tin leadframe plating.

Typical Application



Selection Guide

Part Number	Packing	Package
A4931METTR-T	1500 pieces per reel	5 mm x 5 mm, 0.90 mm nominal height QFN

Absolute Maximum Ratings

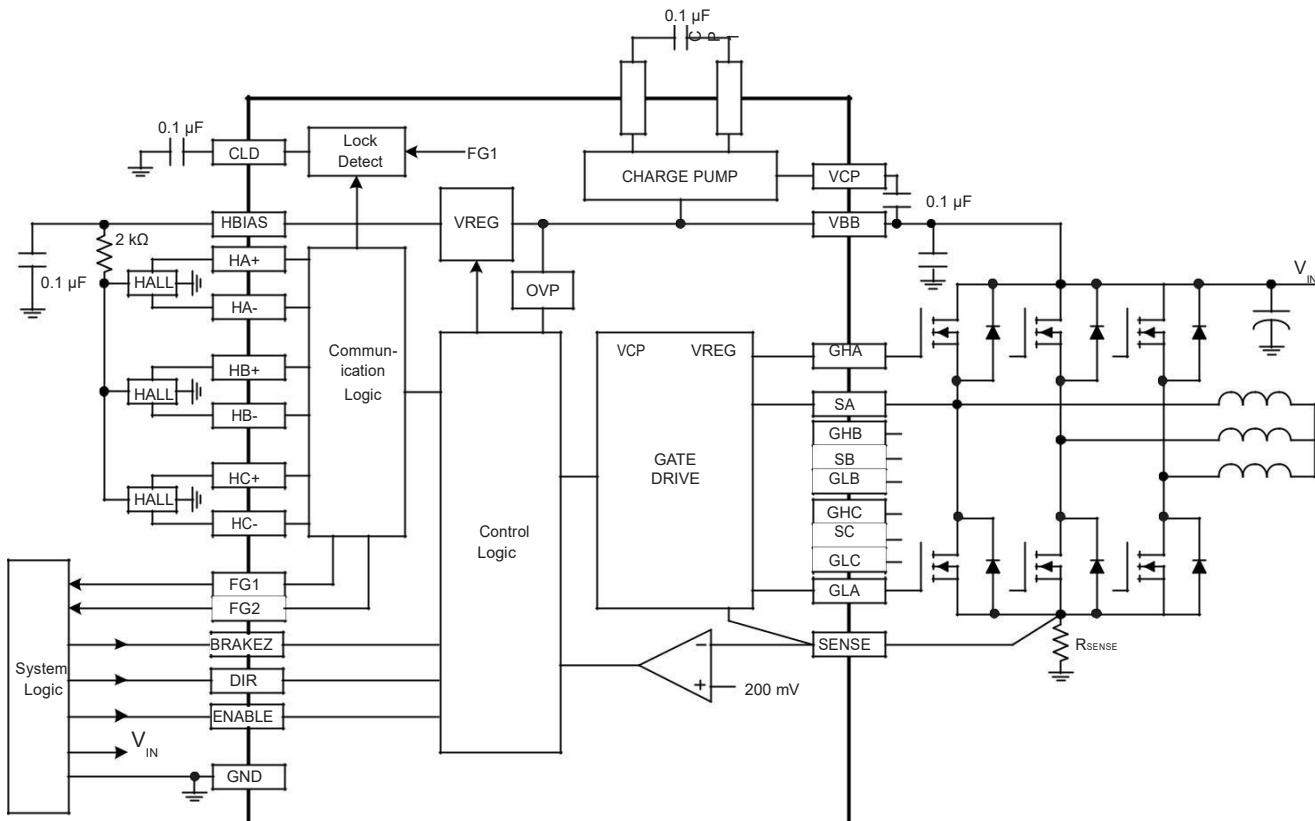
Characteristic	Symbol	Notes	Rating	Units
Load Supply Voltage	V_{BB}		38	V
Motor Phase Output	SX	$t_w < 500$ ns	-3	V
Hall Input	V_{Hx}	DC	-0.3 to 7	V
Logic Input Voltage Range	V_{IN}		-0.3 to 7	V
Operating Ambient Temperature	TA	Range M	-20 to 105	°C
Maximum Junction Temperature	$T_J(max)$		150	°C
Storage Temperature	T_{stg}		-40 to 150	°C

Thermal Characteristics

Characteristic	Symbol	Test Conditions*	Rating	Units
Package Thermal Resistance, Junction to Ambient	$R_{\theta JA}$	4-layer PCB based on JEDEC standard	32	°C/W
Package Thermal Resistance, Junction to Exposed Pad	$R_{\theta JP}$		2	°C/W

*For additional information, refer to the Allegro website.

Functional Block Diagram



Terminal List

Number	Name	Description
1	HA+	Hall input A
2	HA-	Hall input A
3	HB+	Hall input B
4	HB -	Hall input B
5	HC+	Hall input C
6	HC-	Hall input C
7	GND	Ground
8	HBIAS	Hall bias power supply output
9	CP1	Charge pump capacitor terminal
10	CP2	Charge pump capacitor terminal
11	VBB	Supply voltage
12	VCP	Reservoir capacitor terminal
13	SENSE	Sense resistor connection
14	GLC	Low side gate drive C

Number	Name	Description
15	GLB	Low side gate drive B
16	GLA	Low side gate drive A
17	GHC	High side gate drive C
18	SC	High side source connection C
19	GHB	High side gate drive B
20	SB	High side source connection B
21	GHA	High side gate drive A
22	SA	High side source connection A
23	FG1	FG 1 speed control output (3 Φ inputs)
24	FG2	FG 2 speed control output (ΦA input)
25	CLD	Locked rotor detect timing capacitor
26	DIR	Logic input – motor direction
27	ENABLE	Logic input – external PWM control
28	BRAKEZ	Logic input – motor brake (active low)

A4931

3-Phase Brushless DC Motor Pre-Driver

ELECTRICAL CHARACTERISTICS* Valid at $T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_{BB} = 24\text{ V}$, unless noted otherwise

Characteristics	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Supply Voltage Range	V_{BB}	Operating	8	—	V_{BBOV}	V
Motor Supply Current	I_{BB}	fPWM < 30 kHz, CLOAD = 1000 pF	—	5	6	mA
		Charge pump on, outputs disabled, Standby mode	—	3	3.5	mA
HBIAS	V_{HBIAS}	$0\text{ mA} \leq I_{HBIAS} \leq 24\text{ mA}$	7.2	7.5	7.8	V
HBIAS Current Limit	$I_{HBIASlim}$		30	—	—	mA
Control Logic						
Logic Input Voltage	$V_{IN(1)}$		2	—	—	V
	$V_{IN(0)}$		—	—	0.8	V
Logic Input Current	$I_{IN(1)}$	$V_{IN} = 2\text{ V}$	—1	<1.0	1	μA
	$I_{IN(0)}$	$V_{IN} = 0.8\text{ V}$	—1	<—1.0	1	μA
Input Pin Glitch Reject	t_{GLITCH}	ENB pin	350	500	650	ns
		DIR, BRAKEZ pins	700	1000	1300	ns
ENB Standby Pulse Propagation Delay	t_{dENB}	To outputs off	2.1	3	3.9	ms
HBIAS Wake-up Delay, Standby Mode	t_{dHBIAS}	$CHBIAS = 0.1\text{ }\mu\text{F}$	—	15	25	μs
Gate Drive						
High-Side Gate Drive Output	$V_{GS(H)}$	Relative to V_{BB} , $IGATE = 2\text{ mA}$	7	—	—	V
Low-Side Gate Drive Output	$V_{GS(L)}$	$IGATE = 2\text{ mA}$	7	—	—	V
Gate Drive Current (Sourcing)	I_{Gate}	$GH = GL = 4\text{ V}$	20	30	—	mA
Gate Drive Pull Down Resistance	R_{Gate}		10	28	40	Ω
Dead Time	t_{dead}		700	1000	1300	ns
Current Limit Input Threshold	V_{REF}		180	200	220	mV
Fixed Off-Time	t_{OFF}		18	25	37	μs
Protection						
Thermal Shutdown Temperature	T_{JSD}		155	170	185	$^\circ\text{C}$
Thermal Shutdown Hysteresis	T_{JSDhys}		14	15	26	$^\circ\text{C}$
VBB UVLO Enable Threshold	V_{BBUV}	Rising V_{BB}	6.2	7	7.85	V
VBB UVLO Hysteresis	$V_{BBUVhys}$		0.4	0.75	1	V
VCP UVLO	V_{CPUV}	Relative to V_{BB}	4.6	—	6	V
Lock Detect Duration	t_{lock}	$C = 0.1\text{ }\mu\text{F}$	1.5	2	2.5	s
VBB Overvoltage Threshold	V_{BBOV}	Rising V_{BB}	30	33	37.5	V
Hall Logic						
Hall Input Current	I_{HALL}	$V_{IN} = 0.2\text{ to }3.5\text{ V}$	—1	0	1	μA
Common Mode Input Range	V_{CMR}		0.2	—	3.5	V
AC Input Voltage Range	V_{HALL}		60	—	—	$\text{mV}_{\text{p-p}}$
Hall Thresholds	V_{th}	Difference between Hall inputs at transitions	—	+10, —10	—	mV
Hall Threshold Hysteresis	V_{HYS}	$T_J = 25^\circ\text{C}$	10	20	30	mV
		$T_J = -20^\circ\text{C to }125^\circ\text{C}$	5	20	40	mV
Pulse Reject Filter	t_{pulse}		—	2	—	μs
FG						
FG Output Saturation Voltage	$V_{FG(sat)}$	$IFG = 2\text{ mA}$	—	—	0.5	V
FG Leakage Current	I_{FGkg}	$V_{FG} = 5\text{ V}$	—	—	1	μA

*Typical data are for initial design estimations only, and assume optimum manufacturing and application conditions. Performance may vary for individual units, within the specified maximum and minimum limits.

For input and output current specifications, negative current is defined as coming out of (sourcing) the specified device pin. Specifications throughout the allowed operating temperature range are guaranteed by design and characterization.

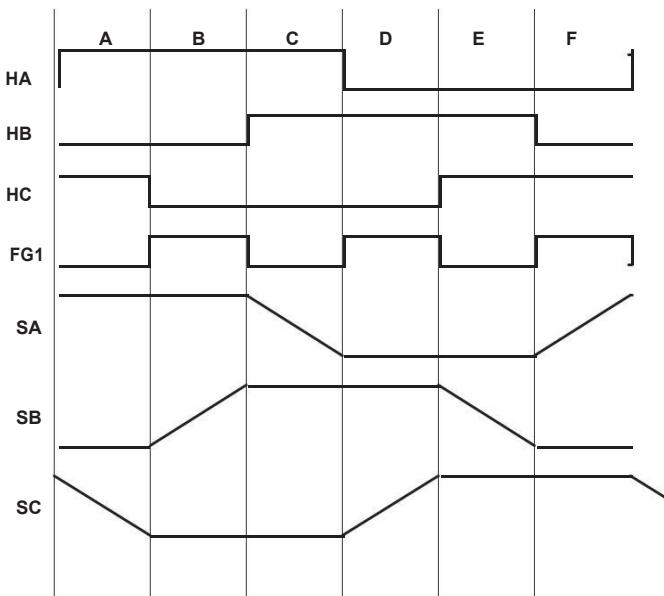


Logic States Table (See timing charts, below) X = Don't Care, Z = high impedance

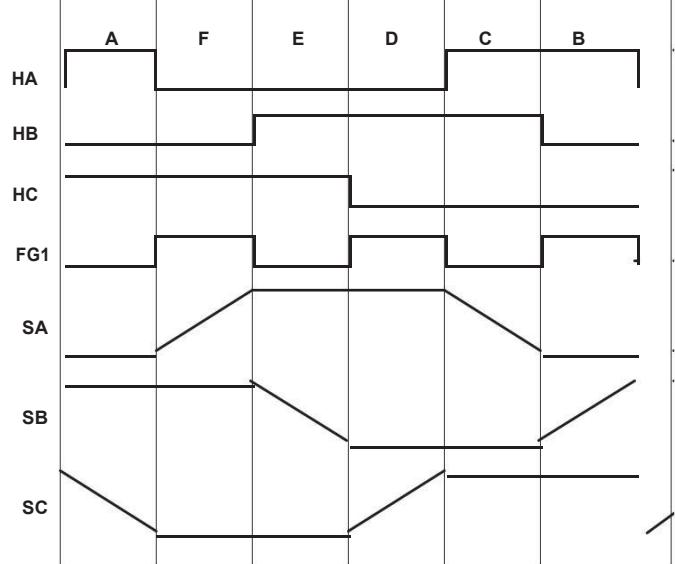
Condition		Inputs					Resulting Pre-Driver Outputs						Motor Output		
		HA	HB	HC	BRAKEZ	ENB	GHA	GLA	GHB	GLB	GHC	GLC	A	B	C
DIR = 1 (Forward)	A	+	-	+	HI	LO	HI	LO	LO	HI	LO	LO	HI	LO	Z
	B	+	-	-	HI	LO	HI	LO	LO	LO	LO	HI	HI	Z	LO
	C	+	+	-	HI	LO	LO	LO	HI	LO	LO	HI	Z	HI	LO
	D	-	+	-	HI	LO	LO	HI	HI	LO	LO	LO	LO	HI	Z
	E	-	+	+	HI	LO	LO	HI	LO	LO	HI	LO	LO	Z	HI
	F	-	-	+	HI	LO	LO	LO	LO	HI	HI	LO	Z	LO	HI
DIR = 0 (Reverse)	A	+	-	+	HI	LO	LO	HI	HI	LO	LO	LO	LO	HI	Z
	F	-	-	+	HI	LO	LO	LO	HI	LO	LO	HI	Z	HI	LO
	E	-	+	+	HI	LO	HI	LO	LO	LO	LO	HI	HI	Z	LO
	D	-	+	-	HI	LO	HI	LO	LO	HI	LO	LO	HI	LO	Z
	C	+	+	-	HI	LO	LO	LO	LO	HI	HI	LO	Z	LO	HI
	B	+	-	-	HI	LO	LO	HI	LO	LO	HI	LO	LO	Z	HI
Fault*		+	+	+	HI	X	LO	LO	LO	LO	LO	LO	Z	Z	Z
Fault*		-	-	-	HI	X	LO	LO	LO	LO	LO	LO	Z	Z	Z
Brake*		X	X	X	LO	X	LO	HI	LO	HI	LO	HI	LO	LO	LO

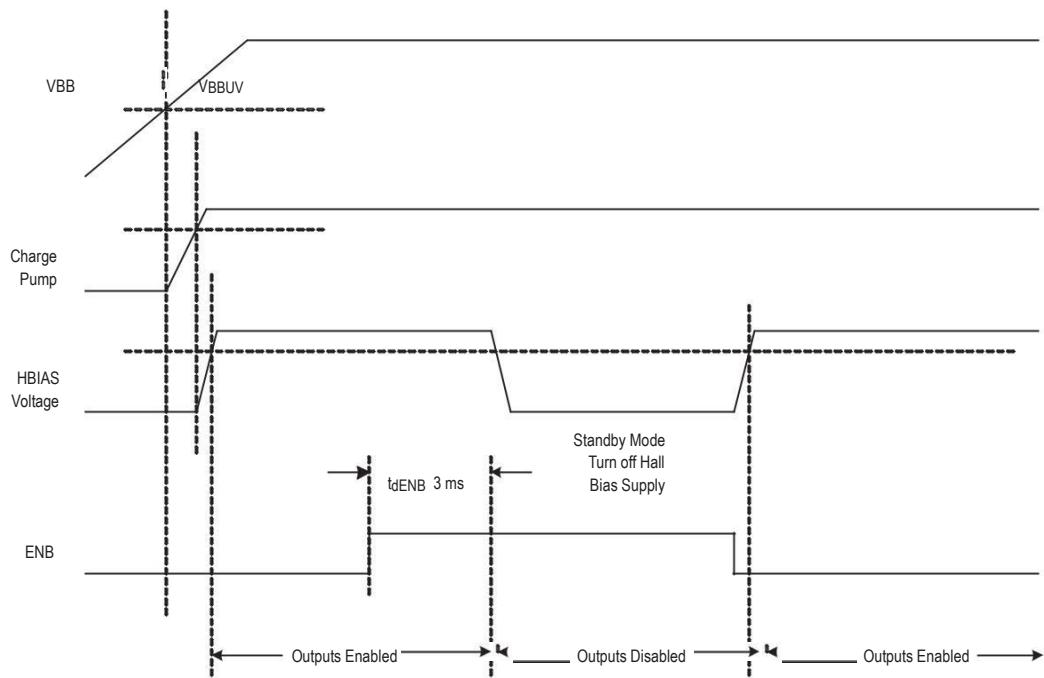
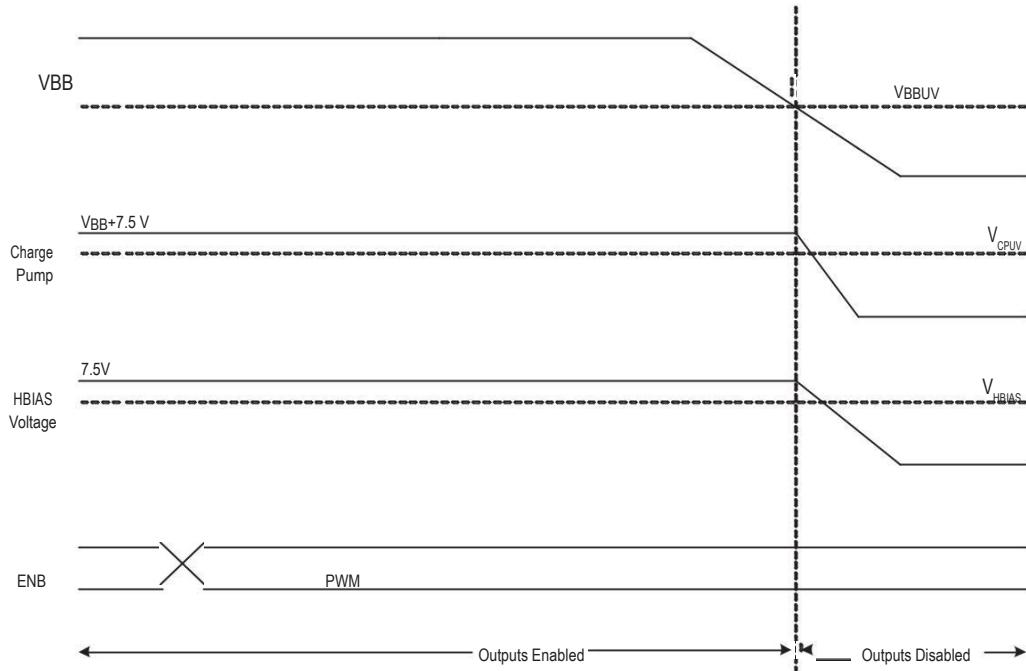
* DIR = Don't Care

DIR = 1 = FOR



DIR = 0 = REV



Power-up and Standby Modes Timing Diagram**Power-up and Standby Modes Timing Diagram**

Functional Description

Current Regulation Load current is regulated by an internal fixed off-time PWM control circuit. When the outputs of the full bridge are turned on, current increases in the motor winding until it reaches a value, I_{TRIP} , given by:

$$I_{TRIP} = 200 \text{ mV} / R_{SENSE}$$

When I_{TRIP} is reached, the sense comparator resets the source enable latch, turning off the source driver. At this point, load inductance causes the current to recirculate for the fixed off-time period.

Enable Logic The Enable input terminal (ENB pin) allows external PWM. ENB low turns on the selected sink-source pair. ENB high switches off the appropriate drivers and the load current decays. If ENB is held low, the current will rise until it reaches the level set by the internal current control circuit. Typically PWM frequency is in 20 kHz to 30 kHz range. If the ENB high pulse width exceeds 3 ms, the gate outputs are disabled. The Enable logic is summarized in the following table:

ENB Pin Setting	Outputs	Outputs State
0	On	Drive
1	Source Chopped	Slow Decay with Synchronous Rectification
1 for > 3 ms typical	Off	Disable

Fixed Off-Time The A4931 fixed off-time is set to 25 μs nominal.

PWM Blank Timer When a source driver turns on, a current spike occurs due to the reverse recovery currents of the clamp diodes as well as switching transients related to distributed capacitance in the load. To prevent this current spike from erroneously resetting the source Enable latch, the sense comparator is blanked. The blanking timer runs after the off-time counter com-

pletes, in order to provide the blanking function. The blanking timer is reset when ENB is chopped or DIR is changed. With external PWM control, a DIR change or an ENB on triggers the blanking function. The duration is fixed at 1.5 μs .

Synchronous Rectification When a PWM-off cycle is triggered, either by a chop command on ENB or by an internal fixed off-time cycle, load current recirculates. The A4931 synchronous rectification feature turns on the appropriate MOSFETs during the current decay, and effectively shorts out the body diodes with the low $R_{DS(on)}$ driver. This lowers power dissipation significantly and can eliminate the need for external Schottky diodes.

Brake Mode A logic low on the BRAKEZ pin activates Brake mode. A logic high allows normal operation. Braking turns on all three sink drivers, effectively shorting out the motor-generated BEMF. The BRAKEZ input overrides the ENB input and also the Lock Detect function.

It is important to note that the internal PWM current control circuit does not limit the current when braking, because the current does not flow through the sense resistor. The maximum current can be approximated by V_{BEMF} / R_{LOAD} . Care should be taken to insure that the maximum ratings of the A4391 are not exceeded in the worse case braking situation, high speed and high inertial load.

HBIAS Function This function provides a power supply of 7.5 V, current-limited to 30 mA. This reference voltage is used to power the logic sections of the IC and also to power the external Hall elements.

Standby Mode To prevent excessive power dissipation due to the current draw of the external Hall elements, Standby mode turns off the HBIAS output voltage. Standby mode is triggered

by holding ENB high for longer than 3 ms. Note that Brake mode overrides Standby mode, so hold the BRAKEZ pin high in order to enter Standby mode.

Charge Pump The internal charge pump is used to generate a supply above V_{BB} to drive the high-side MOSFETs. The voltage on the VCP pin is internally monitored, and in case of a fault condition, the outputs of the device are disabled.

Fault Shutdown In the event of a fault due to excessive junction temperature or due to low voltage on VCP or VBB, the outputs of the device are disabled until the fault condition is removed. At power-up the UVLO circuit disables the drivers.

Overvoltage Protection VBB is monitored to determine if a hazardous voltage is present due to the motor generator pumping up the supply bus. When the voltage exceeds V_{BBOV}, the synchronous rectification feature is disabled.

Overtemperature Protection If die temperature exceeds approximately 170°C, the Thermal Shutdown function will disable the outputs until the internal temperature falls below the 15°C hysteresis.

Hall State Reporting The FG1 pin is an open drain output that changes state at each transition of an external Hall element. The FG2 pin is an open drain output that changes state at each HAx transition.

Lock Detect Function The IC will evaluate a locked rotor condition under either of these two different conditions:

- The FG1 signal is not consistently changing.
- The proper commutation sequence is not being followed. The motor can be locked in a condition in which it toggles between two specific Hall device states.

Both of these fault conditions are allowed to persist for period of time, t_{lock}. t_{lock} is set by capacitor connected to CLD pin. C_{LD} produces a triangle waveform (1.67 V peak-to-peak) with frequency linearly related to the capacitor value. t_{lock} is defined as 127 cycles of this triangle waveform, or:

$$t_{lock} = C_{LD} \times 20 \text{ s}/\mu\text{F}$$

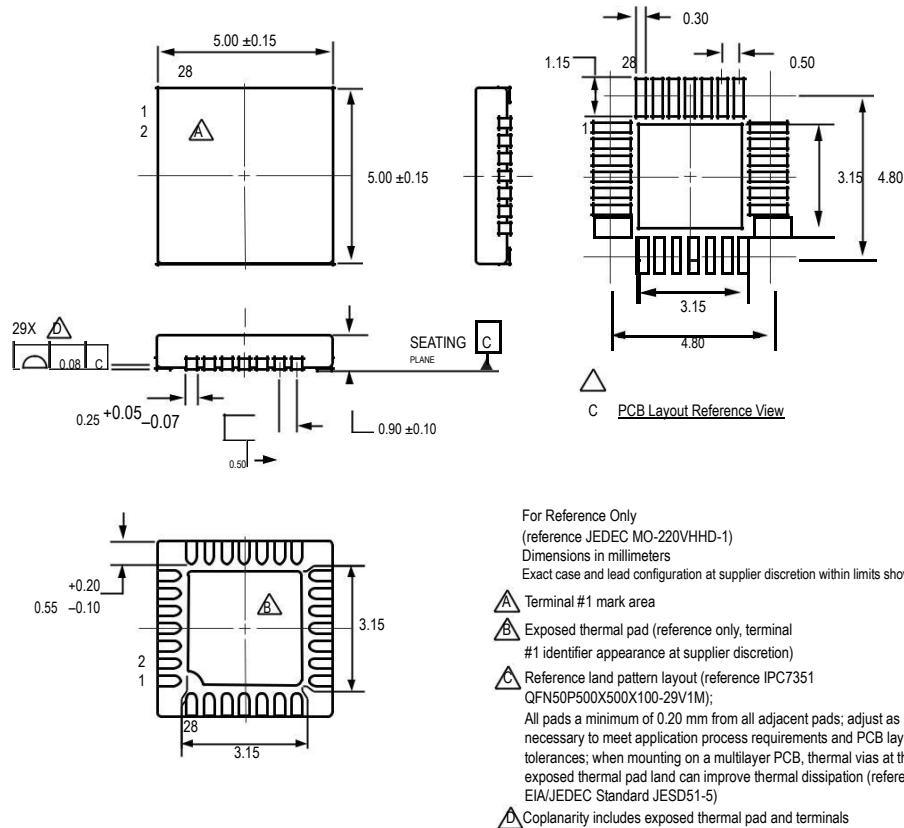
After the wait time, t_{lock}, has expired, the outputs are disabled, and the fault is latched. These fault conditions can only be cleared by any one of the following actions:

- Rising or falling edge on the DIR pin
- VBB UVLO threshold exceeded (during power-up cycle)
- ENB pin held high for > t_{lock} / 2

The Lock Detect function can be disabled by connecting CLD to GND.

When the A4931 is in Brake mode, the Lock Detect counter is disabled.

ET Package, 28-Contact QFN



Copyright ©2007-2013, Allegro MicroSystems, LLC

Allegro MicroSystems, LLC reserves the right to make, from time to time, such departures from the detail specifications as may be required to permit improvements in the performance, reliability, or manufacturability of its products. Before placing an order, the user is cautioned to verify that the information being relied upon is current.

Allegro's products are not to be used in life support devices or systems, if a failure of an Allegro product can reasonably be expected to cause the failure of that life support device or system, or to affect the safety or effectiveness of that device or system.

The information included herein is believed to be accurate and reliable. However, Allegro MicroSystems, LLC assumes no responsibility for its use; nor for any infringement of patents or other rights of third parties which may result from its use.

For the latest version of this document, visit our website:

www.allegromicro.com



Allegro MicroSystems, LLC

115 Northeast Cutoff

Worcester, Massachusetts 01615-0036

1.508.853.5000, www.allegromicro.com

U.S.A.

Annexe 2 : Moteur Brushless

EC 45 flat Ø42.9 mm, brushless, 30 Watt

A with Hall sensors

B sensorless

M 1:2

maxon flat motor

Stock program

Standard program

Special program (on request)

		Part Numbers					
		200142	339281	339282	339283	339284	
Motor Data	A with Hall sensors	200142	339281	339282	339283	339284	
	B sensorless	200189					
Values at nominal voltage							
1 Nominal voltage	V	12	12	24	24	36	36
2 No load speed	rpm	4370	4350	4360	4380	4750	4760
3 No load current	mA	163	163	81.4	73	61.6	55.3
4 Nominal speed	rpm	2940	2800	2940	2900	3290	3270
5 Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	55	54.7	54.8	55.2	66	66.6
6 Nominal current (max. continuous current)	A	2.02	2.02	1.01	1.01	0.847	0.849
7 Stall torque	mNm	255	219	253	243	380	369
8 Stall current	A	10	8.58	4.97	4.77	5.38	5.22
9 Max. efficiency	%	76	75	76	77	80	81
Characteristics							
10 Terminal resistance phase to phase	Ω	1.2	1.4	4.83	5.03	6.69	6.89
11 Terminal inductance phase to phase	mH	0.56	0.56	2.24	2.24	4.29	4.29
12 Torque constant	mNm/A	25.5	25.5	51	51	70.6	70.6
13 Speed constant	rpm/V	374	374	187	187	135	135
14 Speed/torque gradient	rpm/mNm	17.6	20.5	17.7	18.5	12.8	13.2
15 Mechanical time constant	ms	17.1	19.9	17.2	17.9	12.4	12.8
16 Rotor inertia	gcm²	92.5	92.5	92.5	92.5	92.5	92.5
Specifications							
Operating Range							
<p>Comments</p> <p>Continuous operation In observation of above listed thermal resistance (lines 17 and 18) the maximum permissible winding temperature will be reached during continuous operation at 25°C ambient. = Thermal limit.</p> <p>Short term operation The motor may be briefly overloaded (recurring).</p> <p>Assigned power rating</p>							
<p>maxon Modular System</p> <p>Overview on page 28-36</p> <p>for motor type A: Encoder MILE 256 - 2048 CPT, 2 channels Page 388</p>							
<p>Other specifications</p> <p>29 Number of pole pairs</p> <p>30 Number of phases</p> <p>31 Weight of motor</p> <p>Values listed in the table are nominal.</p> <p>Connection with Hall sensors</p> <p>sensorless</p> <p>Pin 1 V_{bus} 4.5...18 VDC</p> <p>Pin 2 Hall sensor 3°</p> <p>Pin 3 Hall sensor 1°</p> <p>Pin 4 Hall sensor 2°</p> <p>Pin 5 GND</p> <p>Pin 6 Motor winding 3</p> <p>Pin 7 Motor winding 2</p> <p>Pin 8 Motor winding 1</p> <p>Internal pull-up (7...13 kΩ) on pin 1</p> <p>Wiring diagram for Hall sensors see p. 43</p> <p>Adapter Part number Part number see p. 450 220300 220310</p> <p>Connector Part number Part number Tyco 1-84953-1 84953-4</p> <p>Molex 52207-1133 52207-0433</p> <p>Molex 52089-1119 52089-0419</p> <p>Pin for design with Hall sensors: FPC, 11-pal, Pitch 1.0 mm, top contact style</p> <p>Spur Gearhead</p> <p>Ø42 mm 3 - 15 Nm Page 347</p> <p>Planetary Gearhead</p> <p>Ø42 mm 0.5 - 2.0 Nm Page 349</p> <p>Recommended Electronics:</p> <p>Notes Page 32</p> <p>ESCON Module 24/2 426</p> <p>ESCON 36/3 EC 427</p> <p>ESCON Mod. 50/4 EC-S 427</p> <p>ESCON Module 50/5 427</p> <p>ESCON 50/5 428</p> <p>DEC Module 24/2 430</p> <p>DEC Module 50/5 430</p> <p>EPOS2 24/2, Module 36/2 434</p> <p>EPOS2 24/5, 50/5 435</p> <p>EPOS2 P 24/5 438</p> <p>EPOS4 Mod/CB 24/1.5 441</p> <p>EPOS4 Module/CB 50/5 442</p> <p>MAXPOS 50/5 447</p>							

May 2017 edition / subject to change

maxon EC motor 265

Annexe 3 : Moteur Brushless

