



## **Projet ER-GE 3 :**

*Double hacheur 48V / 150A pour kart bi-place bi-moteur*

Université François-Rabelais de Tours  
Institut Universitaire de Technologie de Tours  
Département Génie Électrique et Informatique Industrielle



## **Projet ER-GE 3 :**

*Double hacheur 48V / 150A pour kart bi-place bi-moteur*

CLINCH Francis / DUBOIS Florian / WARG Jeremy  
Groupe P1 / 2e année  
Promotion 2007/2009

Enseignants  
LEQUEU Thierry  
LAURENCEAU SOPHIE

## **Sommaire**

Introduction.....	4
1. Cahier des charges.....	5
1.1. Objectif.....	5
1.2. Synoptiques.....	5
1.2.1. Éléments du synoptique.....	6
1.3. Les différentes contraintes.....	8
1.1. Planning.....	8
2. Analyse technique du projet.....	9
2.1. Comparateur et Correcteur Proportionnel et Intégral.....	9
2.1.1. Adaptateur en tension.....	9
2.1.2. Le comparateur.....	10
2.1.3. Le correcteur Proportionnel Intégral.....	11
2.2. Création d'une Modulation à largeur d'impulsion (MLI).....	16
2.2.1. Montage test.....	18
2.2.2. Montage utilisé.....	19
2.3. Commande des transistors.....	20
2.4. Logique de commande.....	21
2.1. Hacheur 4 quadrants et le moteur.....	23
2.1. Alimentations.....	26
2.1.1. Alimentation symétrique +15V / 0V / -15V continu.....	26
2.1.2. Alimentation +5V / 0V continu.....	27
3. Tests.....	28
3.1. Adaptation en tension:.....	28
3.1. Correcteur PI et soustracteur.....	30
3.1. Modulation à largeur d'impulsion (MLI).....	32
4. Création de la carte et finalisation.....	34
4.1. Schéma final.....	34
4.2. Typon.....	34
4.3. Liste du matériel.....	34
4.4. Carte drivers de transistors MOSFET.....	34
4.5. Finalisation.....	34
4.6. Validation des contraintes.....	35
5. Incidents .....	36
Conclusions.....	37
Index des illustrations.....	38
Références.....	39
ANNEXES.....	40

## **Introduction**

Pour le 3ème semestre, il est demandé aux étudiants de réaliser un projet en Étude des Réalisations. Le projet qui nous a été donné a pour objectif de concevoir un variateur de vitesse pour un moteur à courant continu 48V/150A embarqué dans un kart bi-places. Le but est de concevoir le montage à partir de l'information fournie par la pédale de l'accélérateur jusqu'à la commande des transistors .

Dans une première partie, nous verrons le cahier des charges avec l'explication du projet et de l'objectif, qui est de réaliser un hacheur quatre quadrant pour moteur à courant continu ainsi que l'adaptation de ce projet sur un kart bi-moteur. Les synoptiques seront ensuite présentés, le premier est de niveau 1, très peu détaillé et expliquant de façon très générale les différentes entrées et sorties qui agiront sur le montage dans sa totalité. Viendra ensuite le synoptique détaillé qui explicitera les différentes parties interne du projet, allant du correcteur Proportionnel Intégral à la commande des transistors. Puis seront définies les contraintes imposées par l'environnement que subira le montage dans toutes les conditions possibles. Enfin seront présentés le planning prévisionnel et le planning réel avec les commentaires abordant le déroulement des travaux sur ce projet.

La deuxième partie est consacrée à l'analyse technique du projet. Elle portera sur les divers éléments du montage et développera une étude approfondie pour chaque parties. Le module Comparsateur et Correcteur Proportionnel et Intégral aura trois parties : adaptateur en tension suivit du comparateur et du correcteur Proportionnel Intégral. Il sera ensuite abordée dans le deuxième module la Création d'une Modulation à largeur d'impulsion dite MLI qui est essentielle au bon fonctionnement de ce montage. Après vient le module sur les drivers de transistor et la logique de commande. Enfin l'étude du hacheur quatre quadrants qui est en relation direct avec le moteur et qui est le principe même du variateur de vitesse pour moteur électrique.

Dans une troisième partie, nous présenterons tout les tests réalisés au cours des 30H de projet avec lesquels nous avons pu relever plusieurs informations utiles au bon fonctionnement des différent composants constituant le montage complet.

Enfin la quatrième partie traite de la conception finale du projet qui prendra en compte le schéma final du montage complet, le typon et les diverses informations de finalisation du projet.

# 1. Cahier des charges

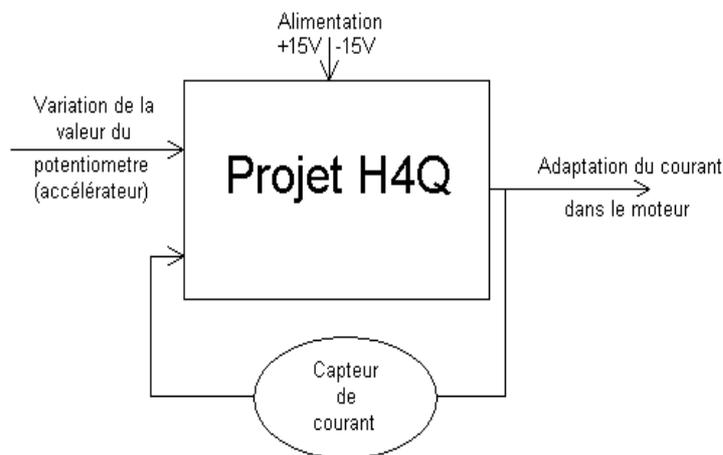
## 1.1. Objectif

Le but de ce projet est de concevoir un variateur de vitesse pour un Kart bi-place bi-moteur: Pour cela nous allons réaliser un hacheur 4 quadrants 48V-150A. La principale information disponible en entrée de notre montage est une valeur de résistance variable représentant l'appui sur l'accélérateur. La valeur de la résistance évoluera entre 0 et 5k  $\Omega$ . Nous avons également un capteur de courant mesurant l'intensité dans le moteur et qui enverra l'information à notre montage.

Nous souhaitons faire varier la valeur de la tension moyenne de l'alimentation du moteur pour que celui-ci avance, recule, et redonne de l'énergie à la batterie dans certaines phases de fonctionnement. En effet, lorsque la consigne de l'utilisateur est d'accélérer, un interrupteur va réaliser un court-circuit pour que la tension aux bornes du moteur soit limitée entre 0V et 48V. Le même principe s'effectue pour la marche arrière, la tension sera limitée entre 0V et -48V. Pour arrêter le moteur, la tension sera nulle.

## 1.2. Synoptiques

Le synoptique (niveau 1) du montage sera le suivant :



*Illustration 1: Synoptique général*

Le projet Hacheur 4 Quadrants (H4Q) a pour but de réaliser une variation de tension pour alimenter un moteur à courant continu pour que celui-ci puisse avancer, s'arrêter ou reculer. L'utilisateur actionnera une pédale d'accélérateur pour donner la tension de consigne soit la vitesse à laquelle il veut faire avancer le kart

bi-place. L'environnement du kart nous impose une alimentation entre +15V et -15V pour toutes les parties de commandes des composants et des différents montages.

Le projet H4Q traitera l'information venant du capteur de courant dans le moteur et la comparera avec la tension de consigne. Il en ressortira une tension de commande qui agira sur le moteur en faisant avancer le kart, si la tension de consigne est supérieure à la tension du capteur.

Inversement si la tension de consigne est inférieure à la tension du capteur, le bouclage (réalisé par le capteur de courant et un montage soustracteur) fera en sorte que le moteur ralentisse.

Voici le synoptique de niveau 2 (détaillé) du projet :

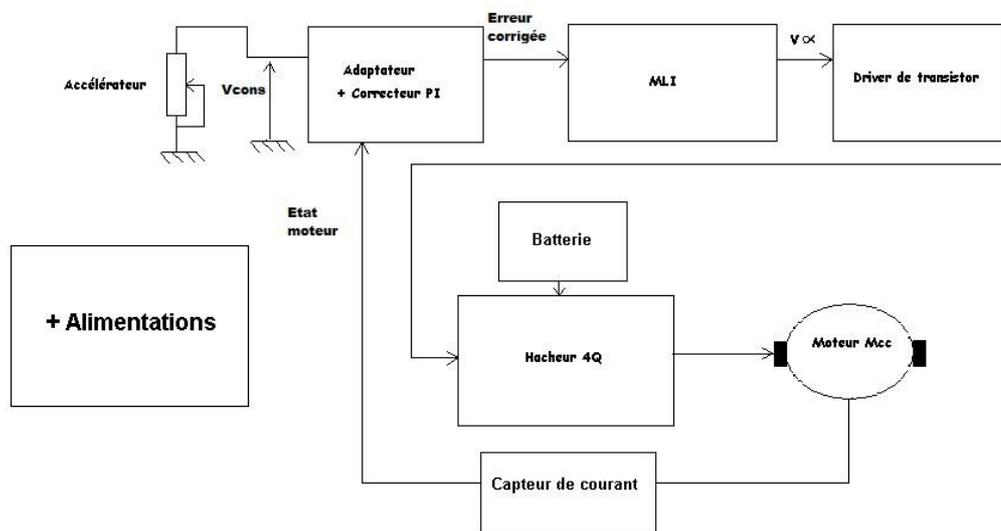


Illustration 2: Synoptique détaillé

### 1.2.1. Éléments du synoptique

#### Montage adaptateur en tension et correcteur PI

Le premier bloc de ce synoptique détaillé est l'adaptateur et le correcteur Proportionnel Intégral. Pour réaliser l'adaptation, on utilisera un pont diviseur de tension qui sera expliqué ultérieurement. La seule information en entrée de notre montage est une résistance variable qui est en réalité la simulation de la pédale d'accélérateur. Il nous faut donc concevoir un montage pour que nous puissions obtenir une tension aux bornes de cette résistance et ainsi l'envoyer dans le montage et travailler sur cette tension qui sera l'image de l'accélération. Nous utiliserons une alimentation externe qui nous servira à réaliser le pont diviseur de tension. L'adaptateur enverra la tension acquise vers le correcteur PI.

Le bloc du correcteur PI comportera deux parties :

#### -Le comparateur

Le comparateur va comparer deux tensions en entrée. La première est la tension de consigne qui vient de l'adaptateur. La deuxième est la tension qui sera l'image du courant venant du capteur du moteur. Ce capteur mesure le courant dans le moteur et le transforme en tension. Le comparateur va alors délivrer une tension qui sera la différence entre ces deux tensions. Ce comparateur est appelé amplificateur différentiel. Cette tension sera envoyée sur le correcteur PI.

#### - Le Correcteur PI

Le correcteur sera constitué d'un AOP, tout comme le comparateur. Il reçoit en entrée la tension de sortie du comparateur qui correspondra à l'erreur dans la chaîne directe. On souhaite grâce à ce montage, rendre le système précis, mais surtout qu'il soit très réactif pour que l'on obtienne une réponse très rapide. Dans le cas où le correcteur serait absent, le système serait pas précis ce qui ici aurait des conséquences problématiques comme un retard à l'accélération, ou une vitesse maximale grandement réduite. Une fois le signal traité, la tension est envoyée vers la création de la Modulation à Largeur d' Impulsion (MLI).

### **Création de la Modulation à Largeur d' Impulsion**

Dans ce module, le signal sera traité de façon à pouvoir faire varier le rapport cyclique du signal de sortie. En entrée le signal proviendra du correcteur PI, lequel sera envoyé directement dans le composant SG3524. Sans ce composant, il nous serait impossible de réaliser un rapport cyclique variable, il serait alors impossible de contrôler le moteur. Ce module, sera alimenté avec l'alimentation externe +15V/ 0V/-15V. Une fois le signal traité, il est envoyé vers la commande des transistors.

### **Drivers de transistors**

Le driver de transistors reçoit le signal avec un rapport cyclique variable. A partir de ce signal, ce composant (IR2111) commandera les quatre transistors. En réalité, on se rendra compte que deux IR2111 seront nécessaires pour commander l'ensemble du hacheur (chacun un "bras de pont" du hacheur). Les drivers commanderont les courants de gâchette des transistors qui seront en commutation

### **Le hacheur**

Cette partie va commander le moteur. Le montage est alimenté entre les bornes + et - de la batterie, il y aura donc du 48V aux borne de la charge, qui est, ici le moteur à courant continu. L'objectif est d'inverser ou non la tension d'alimentation du moteur. Si la tension est positive, le kart avancera (sens de rotation du moteur correspondant, si celle-ci est négative, le moteur tournera dans le sens inverse et le kart reculera. Lorsque la tension sera voisine de zéro, le moteur cessera de tourner, l'utilisateur pourra alors utiliser un frein manuel pour que la vitesse du kart diminue.

### 1.3. Les différentes contraintes

Nous devons pour ce projet respecter divers contraintes pour assurer le bon fonctionnement et la sécurité de l'appareillage et de l'utilisateur.

Les contraintes :

- température allant de 0 à 40 °C (sur les piste de karting)
- composants supportant les vibrations et les chocs (kart en marche)
- espace physique 30cm x 30cm environ
- protection contre l'humidité et toutes intrusions d'objet (IP55) :  
(utilisation possible d'un carter pour protéger le système embarqué)

### 1.1. Planning

Durant les deux premières semaines, nous avons pris connaissance du sujet . De la semaine 40 à la semaine 49, nous n' avons réalisé que les parties théoriques de tous les montages de notre projet. En semaine 50 nous avons réalisé tout l'assemblage et réalisé le Typon à l'aide du logiciel dédié à l'électronique Orcad.

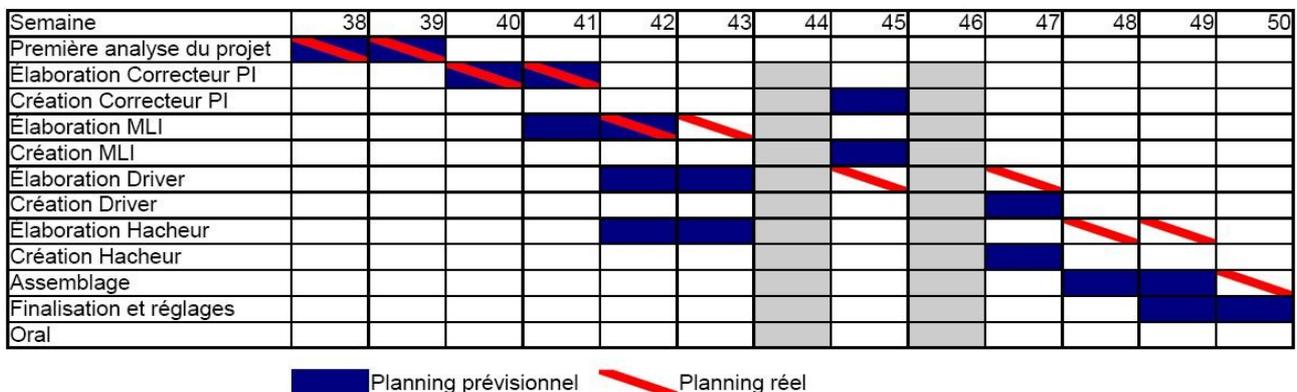


Illustration 3: Planning

On peut remarquer en comparant les deux plannings que nous avons pris progressivement du retard au fur et à mesure que les semaines s'écoulaient.

## 2. Analyse technique du projet

### 2.1. Comparateur et Correcteur Proportionnel et Intégral

On notera tout d'abord que les amplificateurs opérationnels utilisés dans le montage comparateur et le montage correcteur PI, proviendront du même circuit intégré TL082, ce circuit fournissant les entrées et les sorties de deux AOp (Amplificateur Opérationnel). Nous utiliserons donc le même circuit intégré pour les deux montages à AOp.

#### 2.1.1. Adaptateur en tension

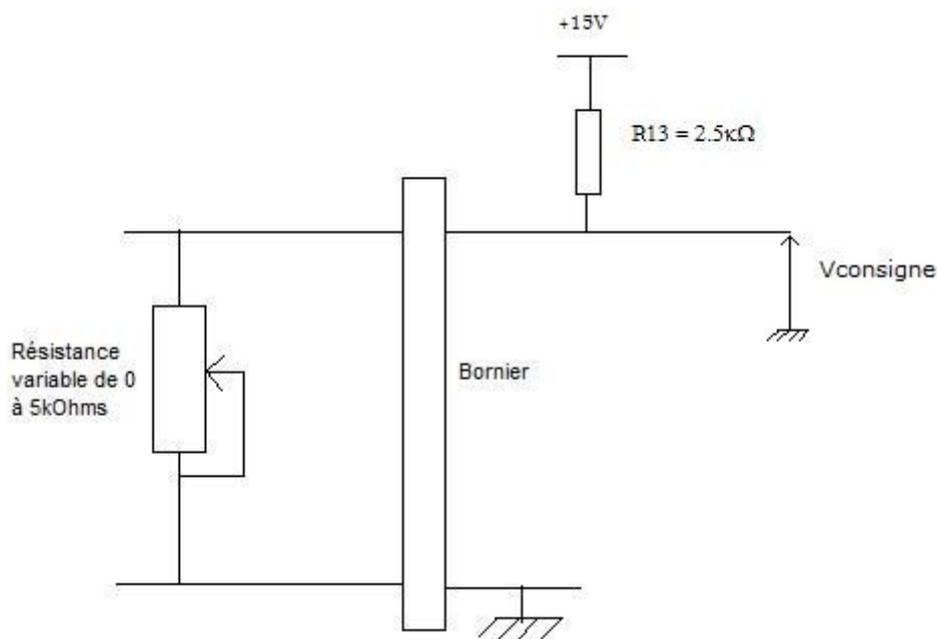


Illustration 4: Adaptateur en tension

Ce montage va permettre d'obtenir une tension  $V_{consigne}$  qui va varier en fonction du changement de la résistance. La résistance est l'accélérateur qui varie entre 0 et 5kΩ.

#### Calcul de la résistance d'adaptation

On a  $V_{consigne} = 15 \times \left( \frac{R_{var}}{R_{var} + R_{adapt}} \right)$  donc  $R_{adapt} = \frac{(15 \times R_{var})}{V_{cons}} - R_{var}$  avec  $R_{var}$  la résistance variable de 0 à 5kΩ, et  $R_{adapt}$  la résistance d'adaptation en tension à placer.

Avec  $R_{var}$  ayant pour valeur maximale  $5k\Omega$ , on trouve alors  $R_{adapt} = 2,5 k\Omega$ , soit ici la résistance  $R_{13}$  doit être égale à  $2,5k\Omega$  pour avoir une tension de consigne variant de 0 à 10V.

Nous avons ainsi une tension sur laquelle travailler et en tirer une information pour créer une commande pour les transistors.

### 2.1.2. Le comparateur

Le comparateur va récupérer deux informations. L'une étant la tension de consigne qui est obtenue par l'adaptateur en tension, l'autre étant la tension délivrée par le capteur de tension. Le capteur délivre une tension directement liée au courant dans le moteur. Le comparateur va ainsi comparer les deux tensions. Ici le comparateur sera un soustracteur. Ce montage réalise une boucle fermée et ainsi le moteur sera asservi.

Le comparateur enverra la tension soustraite, la tension de sortie, vers le correcteur PI ( $V_{comp}$ ).

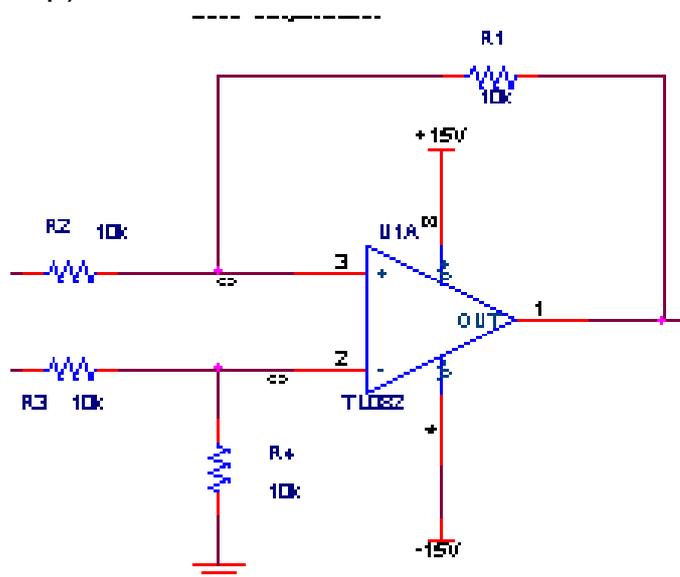


Illustration 5: Montage comparateur

#### Calcul des éléments du montage :

Les deux entrées du montage sont :  $V_{s1}$  ayant pour résistance d'entrée  $R_2$ ,

$V_{s2}$  ayant pour résistance d'entrée  $R_3$ .

On appelle la tension de sortie  $V_s$ .

On veut obtenir  $V_s = k * (V_{s2} - V_{s1})$  avec  $k$  le facteur d'amplification du montage ( $k > 0$ ).

$$V_- = \frac{(V_{s2} \times R_4)}{(R_3 + R_4)} \text{ et } V_+ = i \frac{\left( \left( \frac{V_{s1}}{R_2} \right) + \left( \frac{V_s}{R_1} \right) \right)}{\left( \left( \frac{1}{R_1} \right) + \left( \frac{1}{R_2} \right) \right)} \text{ avec } V_+ - V_- = 0$$

$$\text{donc } \frac{V_{s1} \times R_1 + V_s \times R_2}{R_1 + R_2} = \frac{(V_{s2} \times R_4)}{(R_3 + R_4)}$$

$$\text{soit } \frac{(V_s \times R_2)}{(R_2 + R_1)} = \left( \frac{R_1}{(R_2 + R_1)} \right) \times \left( \frac{(V_{s2} \times R_4)}{(R_3 + R_4)} \right) \times \left( \frac{(R_2 + R_1)}{(R_1)} \right) - V_{s1}$$

$$\text{en simplifiant : } (V_s \times R_2) = R_1 \times \left( \frac{(V_{s2} \times R_4)}{(R_3 + R_4)} \right) \times \left( \frac{(R_2 + R_1)}{(R_1)} \right) - V_{s1}$$

Pour avoir un montage amplificateur différentiel il faut :

$$\frac{(R_4)}{(R_3 + R_4)} \times \left( \frac{(R_2 + R_1)}{(R_1)} \right) = 1 \text{ soit } R_4 \times R_2 = R_3 \times R_1$$

On aura alors la fonction de transfert du montage :

$$V_s = \left( \frac{R_1}{R_2} \right) \times (V_{s2} - V_{s1}) \text{ en choisissant } R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 10 \text{ k } \Omega$$

Nous avons bien réalisé un montage amplificateur différentiel, appelé Comparateur.

Si aux entrées de ce montage on applique la tension de consigne fournie par le montage adaptateur en tension, ainsi que la tension image du courant dans le moteur fournie par le capteur de courant, alors en sortie du Comparateur on obtiendra l'erreur statique du système.

C'est de cette manière que nous utiliserons ce montage pour permettre ensuite via un montage correcteur de corriger cette erreur et de la rendre nulle.

### **2.1.3. Le correcteur Proportionnel Intégral**

Le soustracteur reçoit la tension corrigée sortie du comparateur. Le montage PI va permettre d'obtenir un système très précis mettant de côté la stabilité qui nous importe peu ici car le montage est considéré comme stable. Ce montage est composé d'un Amplificateur opérationnel.

## Synthèse de différents correcteurs intégrateurs

### Montage Intégrateur Pur :

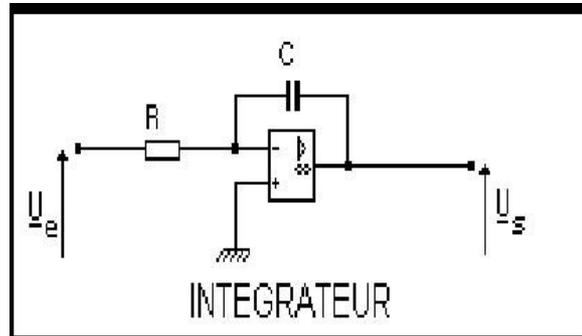


Illustration 6: Intégrateur Pur

Le montage intégrateur pur est simple à réaliser : un AOp, une résistance et un condensateur suffisent.

La fonction de transfert du montage ci-dessus est :  $\frac{V_s}{V_e} = \frac{-1}{RCp}$  avec l'opérateur de Laplace  $p$ .

Cette fonction de transfert est de type :  $\frac{V_s}{V_e} = \frac{K}{(\tau_i \times p)}$

→ avec  $\tau_i = R \times C$  et  $K = -1$

Comme cette fonction de transfert présente un pôle au dénominateur ( $p$ ) qui induit que le gain statique du montage est infini. En effet, lorsque  $p$  tend vers 0 (ce qui veut dire que l'on travaille en continu), alors le gain statique du montage tend vers  $\infty$ .

Or l'erreur du montage est la différence entre l'entrée de la chaîne directe et la sortie de la chaîne de retour, ce qui est équivalent à la sortie du montage amplificateur différentiel (vu précédemment).

Comme  $Erreur = \frac{Entrée}{(1 + Chaîne\ directe)}$  dans le cas d'un retour unitaire

(on considère que la fonction de transfert du capteur de courant est égale à 1),

Soit  $\varepsilon(p) = E \frac{(p)}{(1 + T(p))}$  avec  $T(p)$  : fonction de transfert de la chaîne directe.

On caractérise alors l'erreur statique :  $\varepsilon_s(p) = \lim_{p \rightarrow 0} \left( \frac{p \times (\frac{1}{p})}{(1+T(p))} \right) = \frac{1}{(1+K_{stat})}$

et l'erreur de vitesse :  $\varepsilon_v(p) = \lim_{p \rightarrow 0} \left( \frac{p \times (\frac{1}{p^2})}{(1+T(p))} \right) = \frac{1}{K_{stat}}$

Mais désormais grâce au correcteur, nous avons rendu le gain statique de la chaîne directe infini ! On en déduit alors  $\varepsilon_s(p) \rightarrow 0$  et  $\varepsilon_v(p) \rightarrow 0$

Notre système complet a été rendu infiniment précis et très réactif car l'erreur a été rendue nulle. Le temps de réponse quant à lui correspond à la constante de temps du correcteur :  $\tau_i = R \times C$

Étudions maintenant d'autres exemples de montages faisant office de correcteur PI.

Le seul problème du montage précédent est que le condensateur ne peut pas se décharger dans la boucle de contre-réaction du montage. Il faut donc compenser le correcteur en ajoutant une résistance en parallèle avec le condensateur.

### Montage Intégrateur compensé :

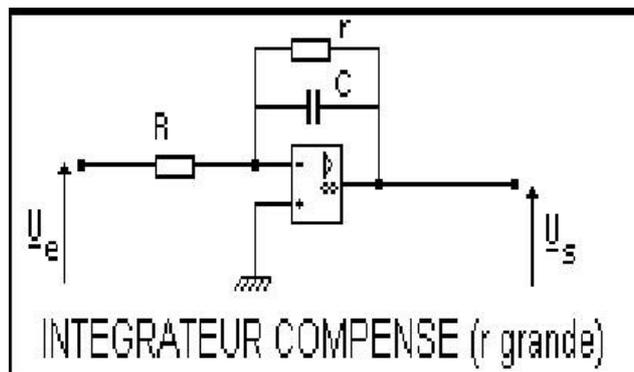


Illustration 7: Intégrateur compensé

Désormais, la boucle de contre-réaction a été compensée et le condensateur se chargera et se déchargera à travers la résistance r. Ce montage est également appelé pseudo-intégrateur.

## Montage proportionnel et intégrateur :

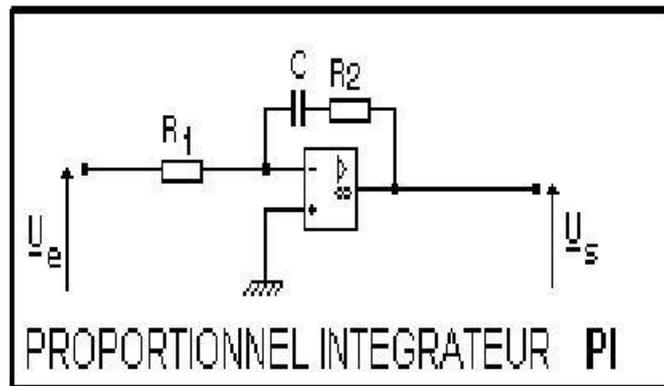


Illustration 8: Proportionnel Intégrateur

Ce correcteur est le même que le correcteur Intégrateur Pur à ceci près que l'insertion d'une résistance série dans la boucle de contre-réaction entraîne une relation de proportionnalité dans sa caractéristique de transfert en plus de son effet d'intégration.

On a la relation :

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{-K}{(R_1 C p)} \text{ avec } K \text{ le facteur de proportionnalité du correcteur.}$$

## Correcteur choisi

Nous avons choisi de créer un montage intégrateur compensé, auquel nous ajouterons un double effet d'intégration (ajout du condensateur C1). Ainsi, le montage effectué sera de type correcteur PI d'ordre 2, l'ajout d'un second pôle dans la fonction de transfert entraînant une augmentation sensible des performances de ce correcteur. Cela permet également de compenser les imperfections de l'Amplificateur Opérationnel.

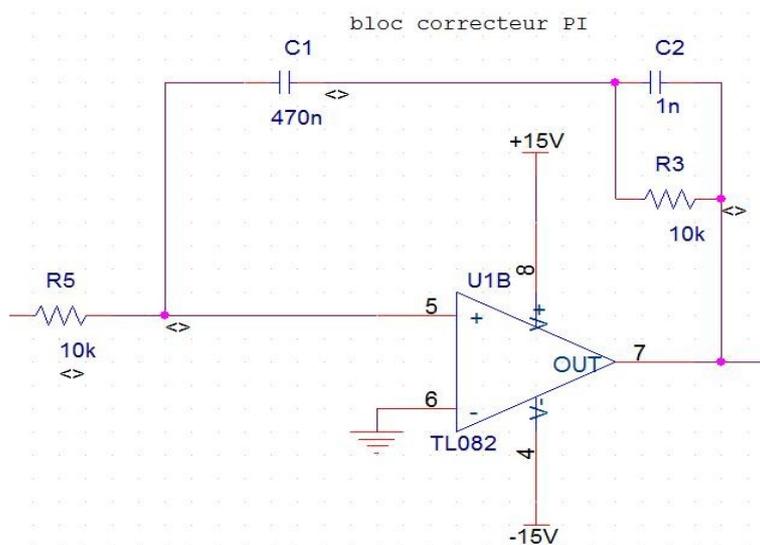


Illustration 9: Bloc correcteur PI

A l'aide du théorème de Millman, nous trouvons que la tension de sortie du correcteur PI ( $V_{pi}$ ) est l'intégrale de la tension sur l'entrée + du comparateur :

$$\text{On a } 0 = \frac{\left(\frac{V_e}{R_5}\right) + \left(\frac{V_s}{Z_{eq}}\right)}{\left(\frac{1}{R_5}\right) + \left(\frac{1}{Z_{eq}}\right)}$$

$$\text{soit } \frac{((V_e \times Z_{eq}) + (V_s \times R_5))}{(R_5 + Z_{eq})} = 0$$

$$\text{donc } (V_e \times Z_{eq}) + (V_s \times R_5) = 0$$

$$\text{soit la relation } V_s = \frac{-V_e \times Z_{eq}}{R_5}$$

$$\text{qui est de la forme } \boxed{T(p) = \frac{V_s}{V_e} = \frac{-Z_{eq}}{R_5}} \text{ avec } Z_{eq} = \left(\frac{1}{(C_1 p)} + \frac{R_3}{(1 + R_3 C_2 p)}\right)$$

$$\text{ou } Z_{eq} = \frac{(1 + R_3 C_2 p + R_3 C_1 p)}{(C_1 p \times (1 + R_3 C_2 p))} \rightarrow Z_{eq} = \frac{(1 + (C_2 + C_1) R_3 p)}{(C_1 p \times (1 + R_3 C_2 p))}$$

$$\text{Ainsi la fonction de transfert de ce correcteur est } \frac{V_s}{V_e} = \frac{-(1 + (C_2 + C_1) R_3 p)}{(R_5 C_1 p \times (1 + R_3 C_2 p))}$$

$$\rightarrow \text{de la forme } \frac{V_s}{V_e} = \frac{-(1 + \tau_1 p)}{(A p \times (1 + \tau_2 p))}$$

Ainsi on retrouve bien qu'en statique, soit quand  $p \rightarrow 0$  alors  $\frac{V_s}{V_e} \rightarrow \infty$

On choisira  $C_1 \gg C_2$  (valeur au minimum 100 fois plus grande)

en prenant  $C_1 = 470 \text{ nF}$ ,  $C_2 = 1 \text{ nF}$  et  $R_3 = R_5 = 10 \text{ k}\Omega$  on obtient  $t_{r_5} < 1 \mu\text{s}$  !

Ce temps de réponse à 5% correspond au temps de réponse du correcteur lorsque sa sortie a atteint 95% de sa valeur finale.

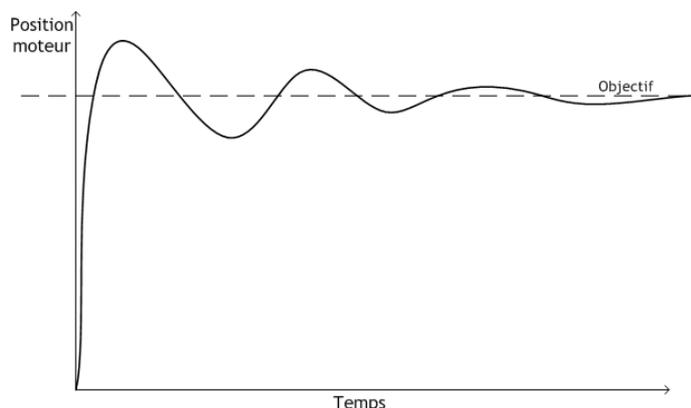
On considèrera alors que le temps de réponse du correcteur est quasiment instantané !

L'intégration aura pour effet de rendre l'erreur statique nulle par un gain statique théoriquement infini. Donc, la précision du signal en sortie est excellente. Ce signal (que l'on appellera  $V_a$  servira à commander la MLI).

## Stabilité du système

Pour tester la stabilité du système corrigé, on test la réponse indicielle du montage.

On obtient l'allure suivante :



*Illustration 10: Allure de la réponse indicielle*

Cette réponse est de type oscillatoire amortie, et comporte quelques dépassements de faible amplitude (10mV de dépassement maximal en sortie pour un échelon de 1V en entrée).

On remarquera bien sur cette réponse que la correction a apporté une grande précision.

Ainsi comme la précision est très bonne et que la stabilité reste correcte, nous pouvons conclure que la correction est suffisante pour avoir un bon fonctionnement du système

## 2.2. Création d'une Modulation à largeur d'impulsion (MLI)

Dans la partie MLI, nous allons réaliser un montage permettant de faire varier le rapport cyclique du signal  $V_{pi}$ , le signal de sortie du correcteur PI. Notre objectif est de faire varier ce rapport pour pouvoir changer la tension moyenne d'alimentation du moteur. On souhaite donc obtenir un signal à rapport cyclique variable avec un signal continue variant de 0 à 5 V. D'où le nom de ce principe : Modulation par Largeur d' Impulsions.

Après plusieurs études de divers composants nous avons choisit d'utiliser le SG3524, le circuit qui sera le plus approprié pour créer le signal MLI. Ce composants nous permet de créer à l'aide d'un signal d'entrée un signal de sortie avec un rapport cyclique variable. Le principe de fonctionnement de ce composant est le suivant : à partir du signal d'entrée, suivant l'amplitude, le signal ressortira avec un rapport cyclique variable.

L'intérêt pour nous d'un signal à MLI variable nous permet de faire varier la valeur moyenne de la tension. Avec une tension moyenne nulle, le moteur sera normalement à l'arrêt. Pour une tension moyenne positive, le moteur sera en état de faire avancer le kart. C'est le même principe qui se réalise pour la marche arrière avec une tension moyenne négative.

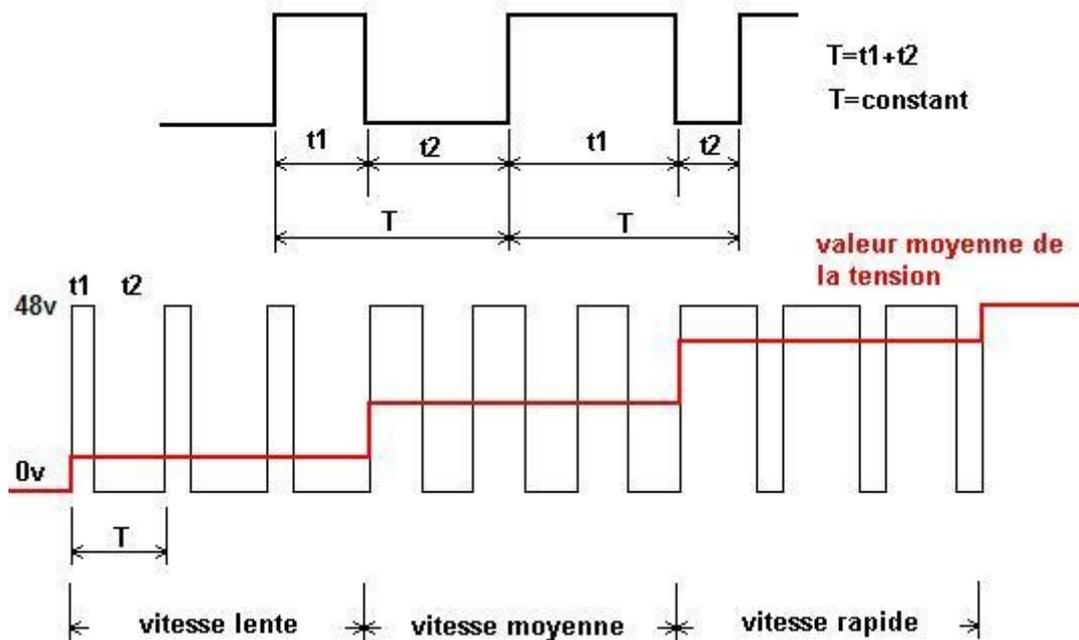


Illustration 11: Principe de la variation de vitesse par MLI

Ce schéma de principe nous montre bien qu'en faisant varier le rapport cyclique  $\alpha$  (le rapport  $\frac{t_1}{T}$ ), on fait bien varier la vitesse moyenne du moteur de manière proportionnelle à  $\alpha$ .

$$\overline{U}_c = \left(\frac{t_1}{T}\right) \times U_c$$

### 2.2.1. Montage test

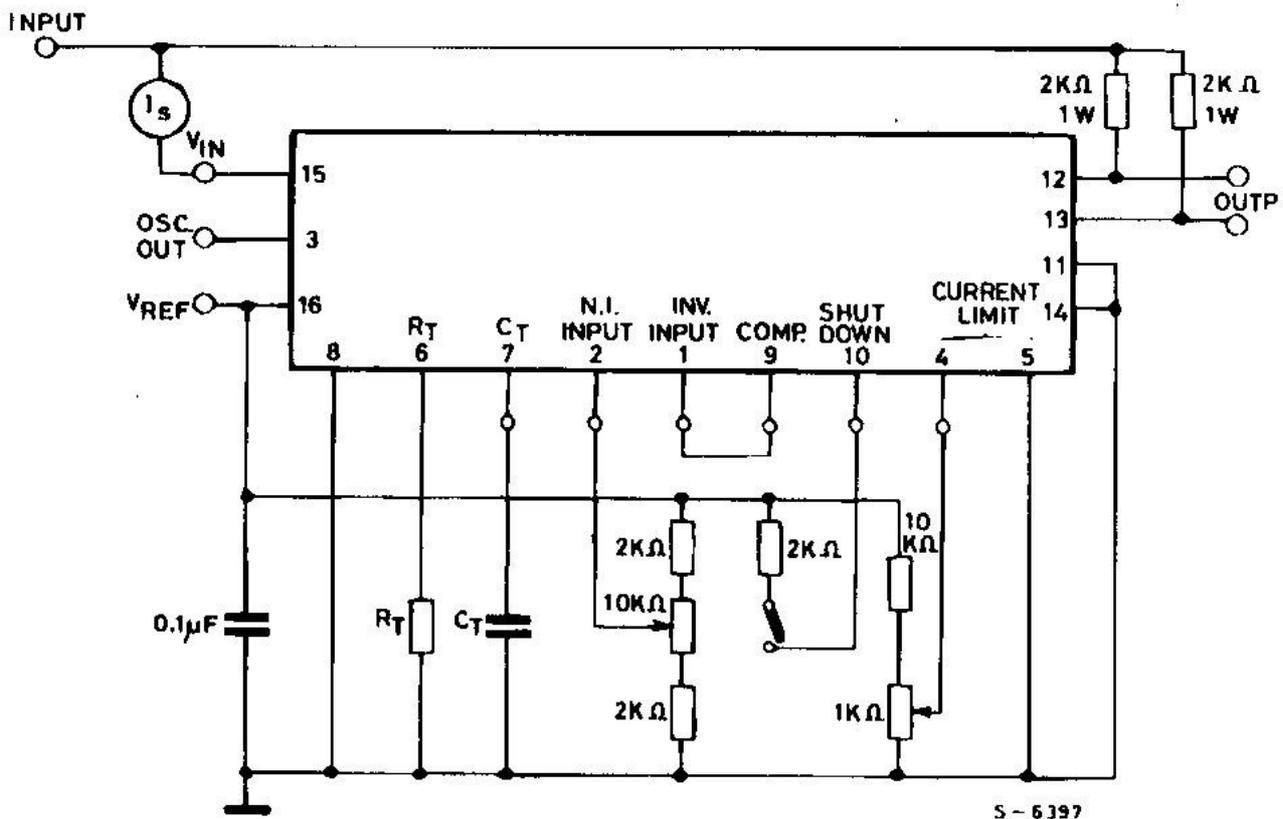


Illustration 12: Montage test conseillé par le constructeur (ST Microelectronics)

Ce montage, conseillé par le constructeur, permet d'obtenir sur l'une des sortie (OUTP broches 12 et 13), un signal en créneau dont le rapport cyclique est variable en fonction de la tension que l'on applique à son entrée (NI INPUT broche 2 pour Entrée Non Inverseuse). Ici sur ce montage de test, on simule l'entrée par un pont de résistances dont on pourra faire varier la valeur par action sur le potentiomètre 0-10kΩ.

On remarquera que la mise à la référence Vref de la broche 10 (SHUT DOWN), entraînera l'arrêt du fonctionnement du montage total sans cesser de l'alimenter.

On pourra également régler la fréquence de l'oscillation en réglant les valeurs de  $C_T$  et de  $R_T$ . En effet, le constructeur nous indique que la fréquence d'oscillation est donnée par la relation :

$$f = \frac{1.18}{(R_T \times C_T)} \text{ avec } R_T \text{ en } k\Omega, C_T \text{ en } \mu F \text{ et } f \text{ en } kHz.$$

### 2.2.2. Montage utilisé

Nous allons maintenant utiliser le montage précédent pour l'insérer dans notre circuit global.

On veut une fréquence suffisamment élevée pour commander les drivers de transistors afin d'avoir un bon suivi de la consigne imposée. Si cette fréquence est trop faible alors le temps de réaction de la partie transistor par rapport à l'erreur détectée sera trop long et on aura un décalage dans le temps remarquable entre l'action sur la pédale et l'accélération de la commande des transistors.

Donc il faut une fréquence  $f$  de l'ordre de 1Mhz

$$\text{soit } (RT \times CT) = \frac{1.18}{f} \approx \frac{1.18}{10^6} \approx 1.10^6$$

On prendra  $RT = 1 \text{ kHz}$  et  $CT = 1 \text{ nF}$

Ainsi  $f \approx 1 \text{ MHz}$

On notera qu'une seule sortie suffit, donc nous n'utiliserons que le transistor interne B, et donc nous effectuerons le montage préconisé pour le constructeur seulement pour les broche CB (Collecteur interne B) et EB (Émetteur interne B). Nous aurions pu tout aussi bien utiliser les broches correspondant au transistor interne A.

Le shutdown est une entrée du SG3524 qui permet d'arrêter la création de la MLI tout en laissant le montage alimenté. Nous n'avons donc pas besoin d'utiliser cette fonctionnalité donc le shutdown doit rester ouvert pour un bon fonctionnement du montage.

vers correcteur PI

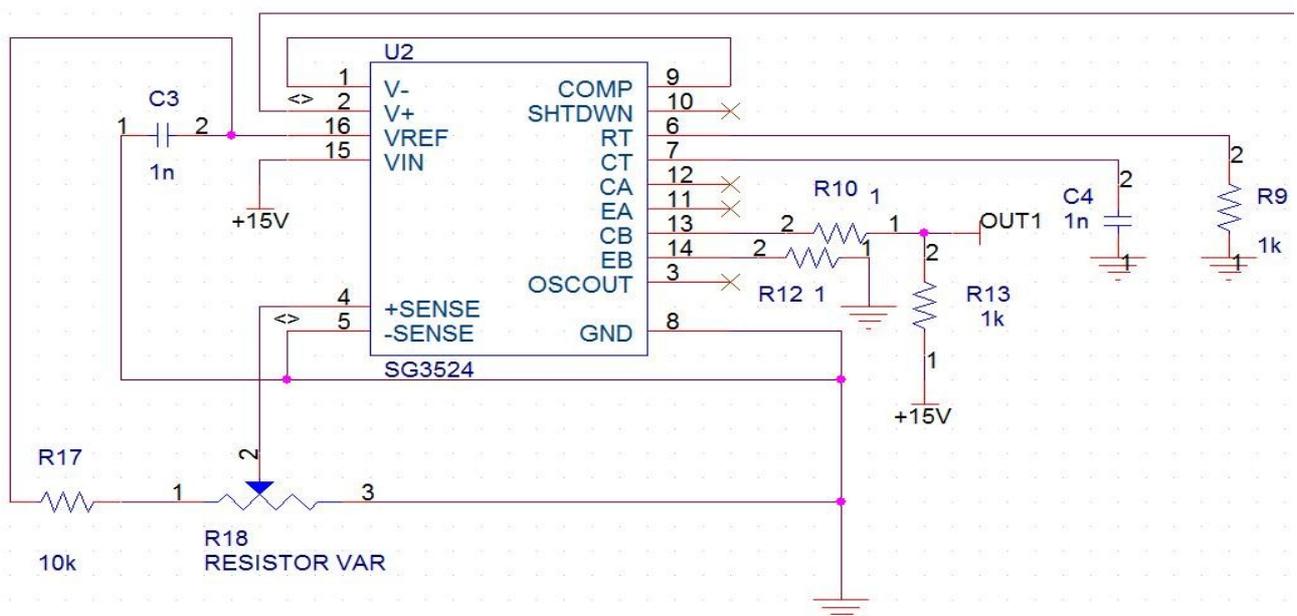


Illustration 13: Schéma du circuit générateur MLI utilisé

## 2.3. Commande des transistors

Les transistors de puissance présents sur le kart sont 2 doubles transistors faisant chacun office de doubles interrupteurs pouvant être commandés séparément. Nous ne pouvons pas commander directement ces transistors avec le signal MLI créé précédemment, pour des raisons de puissance: les transistors sont alimentés en 48V et le signal MLI ne pourra pas commander l'ouverture et la fermeture des transistors car cela nécessite une puissance suffisante. Il nous faut alors un circuit spécial appelé « driver de transistor » qui va faire le lien entre le signal MLI et la commande de grille du transistor.

Nous avons choisi d'utiliser le circuit intégré IR2183 qui répondait parfaitement à nos besoins. Le constructeur nous indique que ces circuits sont capables de piloter des demi-ponts de transistors alimentés jusqu'à 600V ! Or les transistors que nous utiliserons seront alimentés en 48V donc les circuits intégrés choisis suffiront amplement.

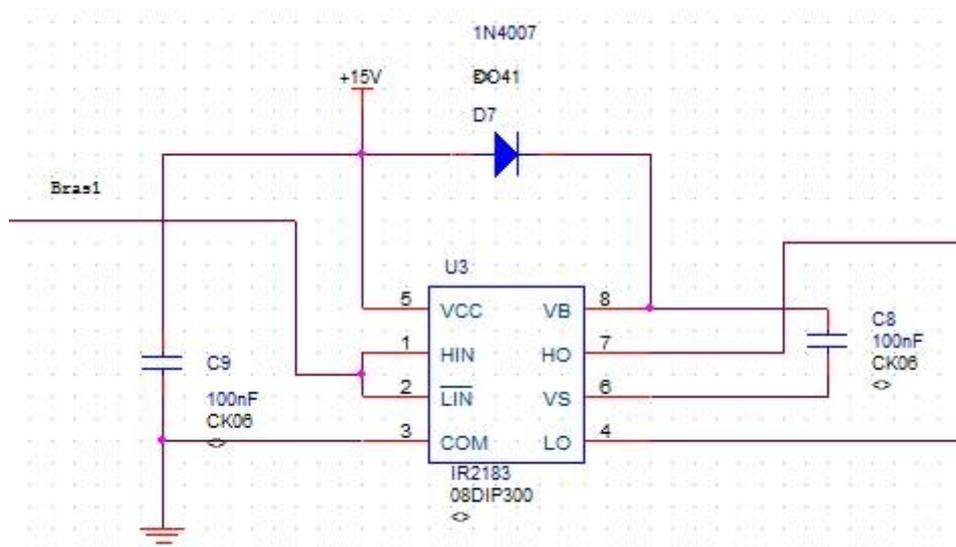


Illustration 14: Câblage des Drivers de transistors

Ces composants vont créer de fortes variations de courant pour pouvoir piloter les transistors. Nous pourrions en effet avoir des pointes de courant d' 1A en sortie des drivers de transistor ! Pour palier à ces variations très fortes d'énergie on veillera à placer un filtre passe-bas (R-C) entre la sortie du bloc "Drivers de transistors" et la commande de drain des transistors eux-mêmes. Ainsi le condensateur absorbera l'énergie superflue et la restituera au bon moment pour aider à la commande des transistors. Ce filtre est dit passe-bas car il absorbe les pics d'énergie puisqu'ils ont des signaux équivalents de haute fréquence et que le filtre atténue les signaux de haute fréquence.

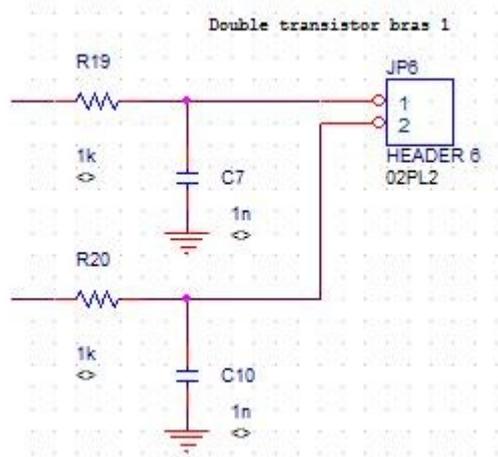


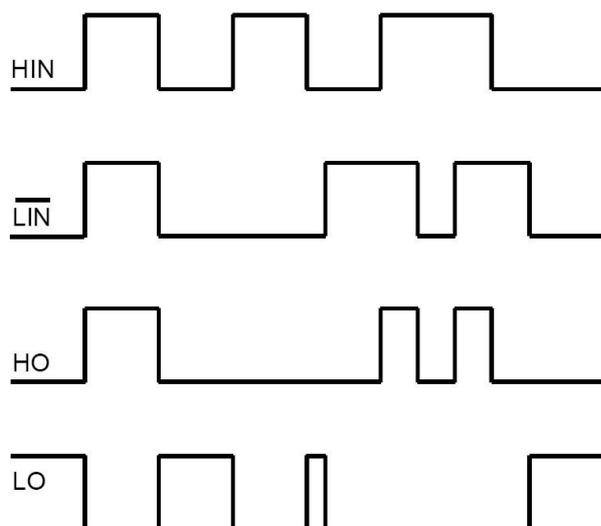
Illustration 15: Circuit passe-bas atténuateur

On associera une résistance d' 1kΩ avec un condensateur de 1nF pour avoir une fréquence de coupure :  $f_c = \frac{1}{(2\pi \times RC)} = \frac{1}{(2\pi \times 10^3 \times 10^{-9})} \approx 160 \text{ kHz}$  (fréquence de coupure élevée pour le concerner que les fronts significatifs).

Il faut maintenant pouvoir commander correctement ces transistors. Pour cela, une carte électronique externe appelée "Logique de commande" permettra de faire le lien entre le choix de l'utilisateur (marche avant ou marche arrière), les signaux modulés MLI et les drivers de transistors.

## 2.4. Logique de commande

Le constructeur des drivers de transistors nous donne le chronogramme suivant :



Ce chronogramme présente l'état des sorties en fonction de l'état des entrées du circuit.

- Lorsque  $HIN$  et  $\overline{LIN}$  sont à l'état haut alors HO est à l'état haut et LO à l'état bas.
- Lorsque  $HIN$  et  $\overline{LIN}$  sont à l'état bas alors HO est à l'état bas et LO à l'état haut.

Illustration 16: Chronogramme entrées-sorties des IR2183

Nous allons pouvoir utiliser ces relations pour la sélection de la marche arrière ou de la marche avant.

En effet, lorsque l'utilisateur sélectionne la marche avant, il faut laisser fermé l'interrupteur T4 et laisser ouvert T3, ainsi que d'envoyer le signal MLI vers les interrupteurs T1 et T2.

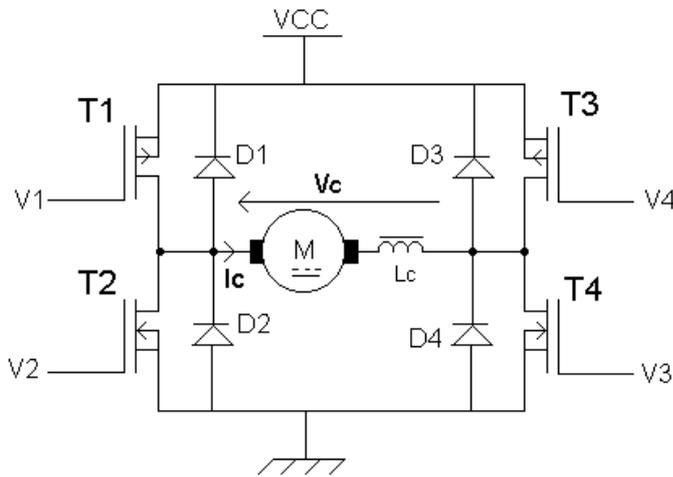


Illustration 17: Interrupteurs du hacheur 4 quadrants

Pour la marche arrière, il faut laisser fermé l'interrupteur T2 et laisser ouvert T1, ainsi que d'envoyer le signal MLI vers les interrupteurs T3 et T4.

Enfin lorsque l'utilisateur sélectionne la mise à l'arrêt du kart, il faut laisser fermés les interrupteurs T2 et T4 et laisser fermés T1 et T3.

Il nous faudra donc utiliser une carte électronique supplémentaire qui va gérer l'ouverture et la fermeture des transistors en fonction de la sélection de mode par l'utilisateur :

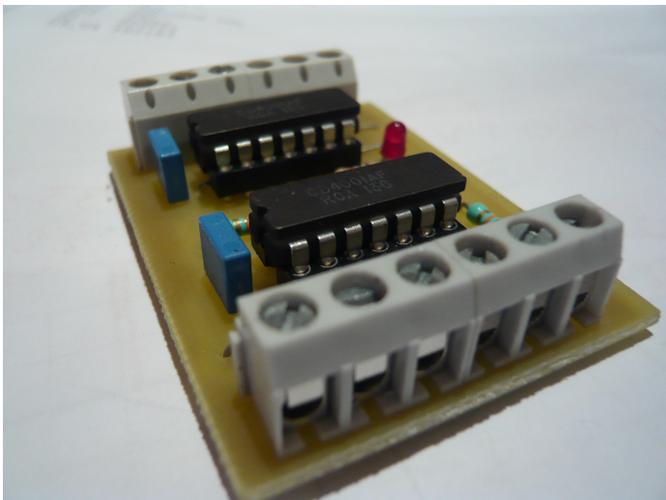


Illustration 18: Carte "logique de commande"

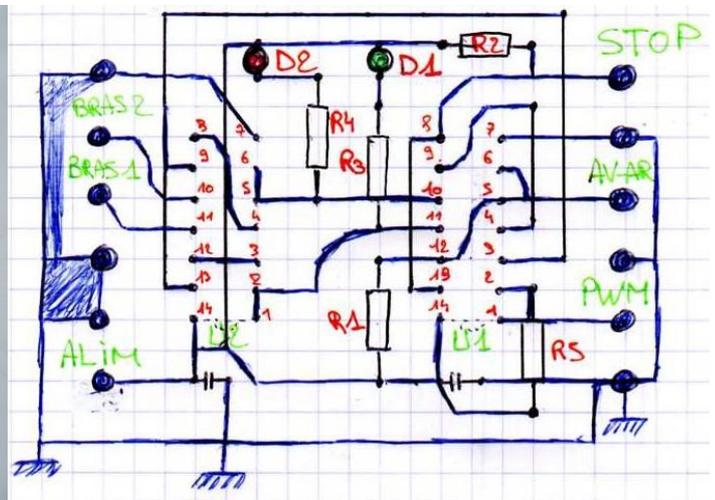


Illustration 19: Typon de la carte logique

→ pour le logigramme de cette carte, se reporter à l'annexe 4

La mise à l'état bas des entrées Av/Ar et Stop de la carte s'effectuera par le biais d'un commutateur à 3 positions relié à la masse. L'action sur le commutateur par l'utilisateur entraînera alors une sélection de mode (Avant, Arrière ou Stop) et la carte sélectionnera correctement les transistors à commander ou vers lesquels on enverra le signal MLI.

## 2.1. Hacheur 4 quadrants et le moteur

Le but du hacheur est de permettre d'alimenter une charge (ici le moteur) sous une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe (ici les batteries du Karting de 48V pour 150A).

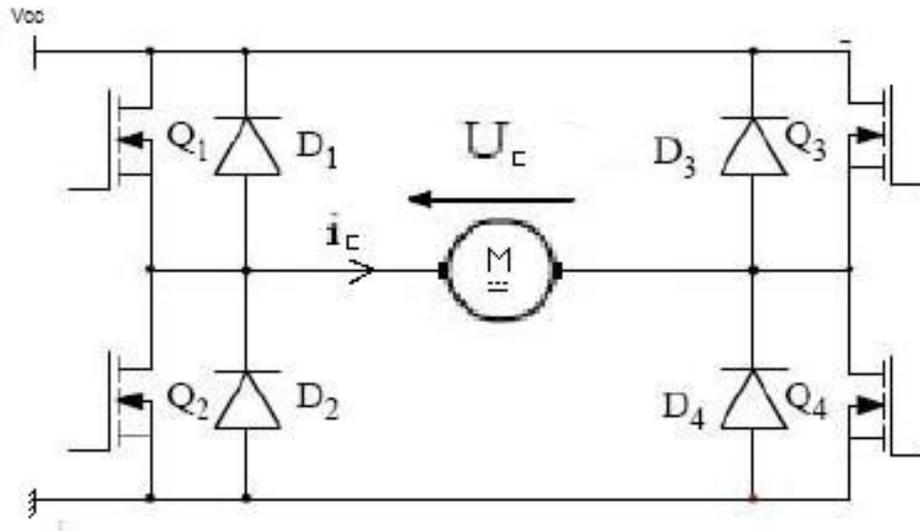


Illustration 20: Schéma de principe du hacheur 4 quadrants

Le Hacheur 4 quadrants est réversible en courant et en tension ce qui permet aux moteurs de fonctionner dans deux sens de marches (Avant-Arrière) pour différents modes de fonctionnement (Moteur-Générateur). On associe donc à chaque interrupteur un transistor en parallèle avec une diode, le rôle du transistor est d'être commandé pour permettre le choix du mode de fonctionnement ou/et sens de marche, et le rôle de la diode -dite diode de "récupération ou de roue libre"- est de permettre la circulation du courant lorsque l'interrupteur est commandé et que le courant est dans le sens opposé au sens autorisé par l'interrupteur électronique (utilisé pour la marche arrière).

Il y donc 4 modes de fonctionnement possible, c'est donc pour cela que le hacheur est dit « 4 quadrants » :

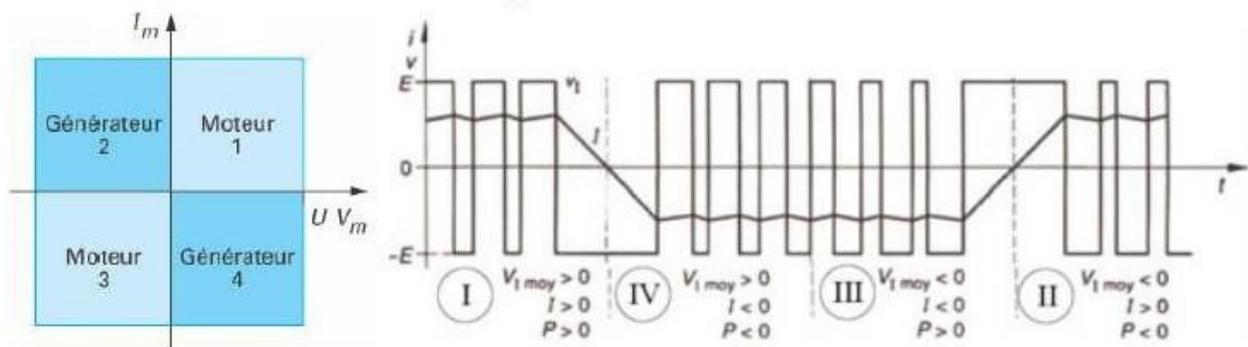


Illustration 21: Modes de fonctionnement hacheur

Pour permettre le changement du mode de fonctionnement du moteur on change le sens de la tension, pour cela on joue avec les duos T1,T4 et T2,T3.

Les quadrants 1 et 2 représentent la marche avant puisque la tension est positive,

◆ lorsque le courant est du même signe que la tension nous sommes dans le quadrant n°1 en fonctionnement moteur, cela représente la phase d'accélération

◆ et inversement pour le quadrant n°2 où le courant et la tension sont de signes opposés, il s'agit de la phase de freinage.

Pour les quadrants 3 et 4, ils représentent la marche arrière de la MCC (Machine à Courant Continu, soit ici le moteur du kart) puisque la tension est négative. Les phase de fonctionnement restent les mêmes,

◆ lorsque U et I sont négatif, nous sommes dans le quadrant n°3 , soit un fonctionnement moteur donc cela représente la phase d'accélération

◆ et lorsque U est positif et I négatif, nous sommes dans le quadrant n°4, soit un fonctionnement en générateur et donc cela représente la phase de freinage.

Le hachage s'effectue par commande continue et fonctionne de telle sorte qu'à chaque période T on commande la fermeture de Q1 et Q4 pendant un temps proportionnel à la période :  $\alpha T$  .

On commandera Q2 et Q3 pendant le reste de la période:  $(1-\alpha).T$

► Pour  $0 < t < \alpha T$ , on commande la fermeture de Q1 et Q4:  
Si  $I_c > 0$ , le courant passe par Q1, Q4 et  $U_c = V_{cc}$  (quadrant 1)  
Si  $I_c < 0$ , le courant passe par D1, D4 et  $U_c = V_{cc}$  (quadrant 4)

► Pour  $\alpha T < t < T$ , on commande la fermeture de Q2 et Q3:  
Si  $I_c > 0$ , le courant passe par D2, D3 et  $U_c = -V_{cc}$  (quadrant 2)  
Si  $I_c < 0$ , le courant passe par Q2, Q3 et  $U_c = -V_{cc}$  (quadrant 3)

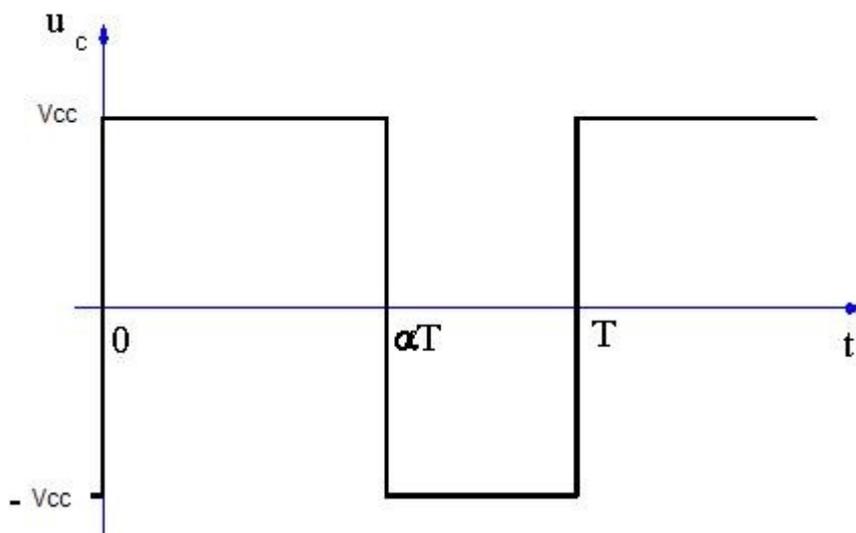


Illustration 22: Caractéristique  $U_c=f(t)$  du hacheur

La valeur moyenne de la tension  $V_c (=U_c, \text{ soit la tension aux bornes de la charge et donc du moteur})$  est :

$$\overline{V}_c = \frac{1}{T} \left[ \int_0^{\alpha.T} U dt + \int_{\alpha.T}^T -U dt \right] = \frac{1}{T} [U.\alpha.T - U.T + U.\alpha.T]$$

Soit:

$$\overline{V}_c = U.(2.\alpha - 1)$$

On a alors  $\overline{V}_c$  qui va de  $V_{cc}$  à  $-V_{cc}$  lorsque  $\alpha$  varie de 1 à 0.

On pose:

- E : tension d'alimentation du moteur
- $\Omega$  : vitesse de rotation du moteur
- $\Gamma$  : couple fourni par le moteur

La variation de  $\alpha$  a une influence sur les caractéristiques  $E=f(I_c)$  et  $\Omega=f(\Gamma)$  comme le montre cette courbe, ce qui va permettre en faisant varier  $\alpha$  d'agir sur la vitesse du moteur:

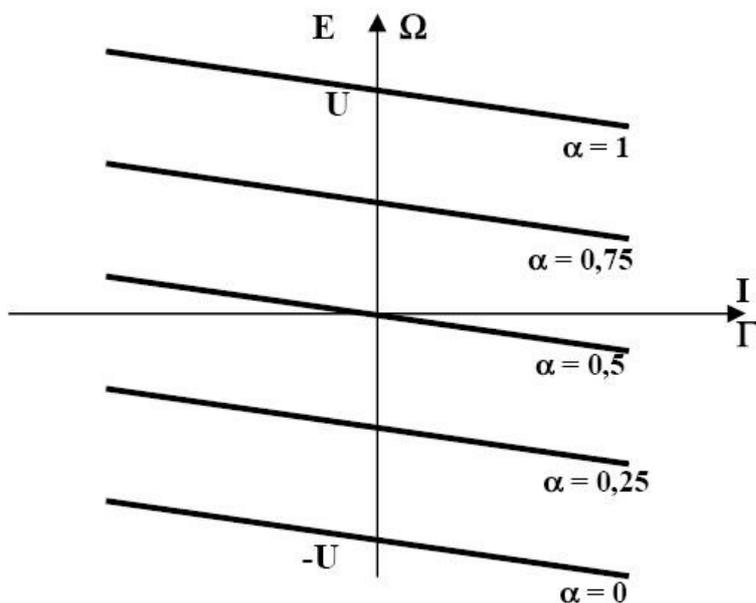


Illustration 23: Caractéristiques  $E=f(I_c)$  et  $\Omega=f(\Gamma)$  du moteur à courant continu

soit dissipée dans une résistance de freinage ou directement restitué dans les batteries pour permettre une plus grande autonomie.

De plus que l'on soit en fonctionnement moteur ou générateur, le sens du courant reste de le même car le courant est vectoriellement proportionnel à la force de l'arbre du moteur et à son couple, et la force est toujours dirigée dans le même sens (avant pour la marche avant et arrière pour la marche arrière).

Ainsi que lors de la phase de freinage donc en mode génératrice, il existe deux possibilités : que l'énergie

## 2.1. Alimentations

### 2.1.1. Alimentation symétrique +15V / 0V / -15V continu

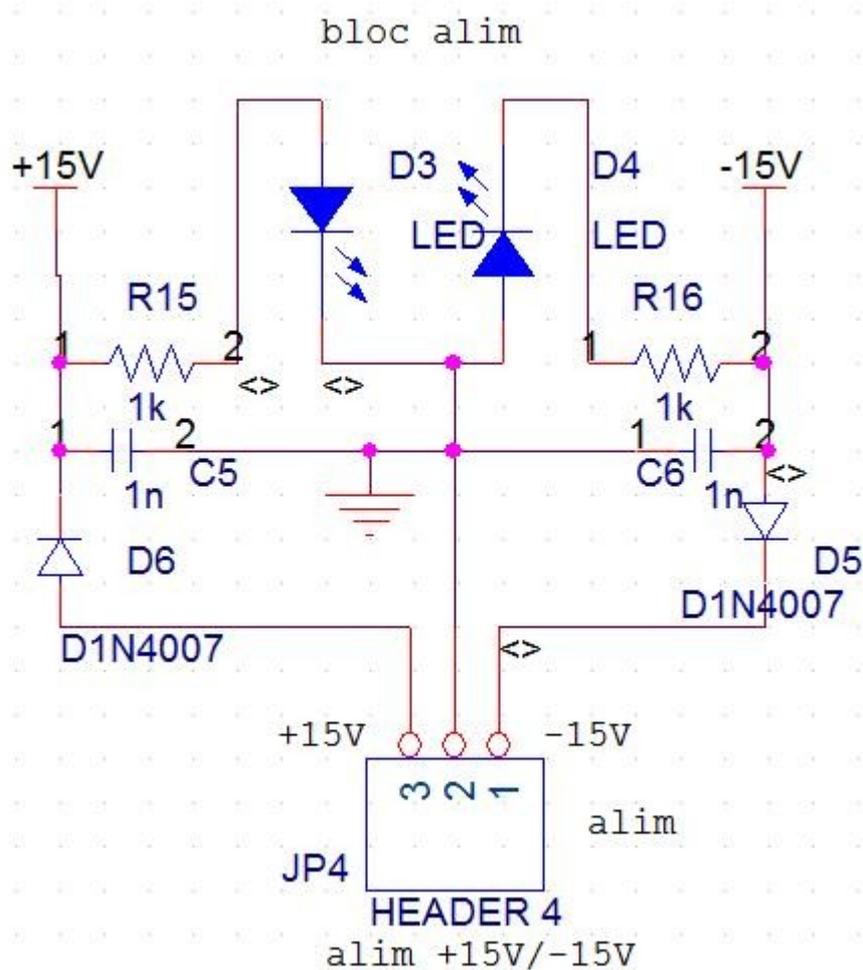


Illustration 24: Filtrage et sécurité de l'alimentation

Le projet n'a pas pour but de concevoir les alimentations, c'est pourquoi nous utiliserons une alimentation +15V / 0V / -15V continu que l'on peut acheter dans le commerce. Cette alimentation aura ses trois fils de sorties branchés sur le connecteur à 3 bornes Header4 (voir illustration ci-dessus).

Nous allons tout de même filtrer et sécuriser cette alimentation car si un problème dû à l'alimentation survient, cela risque d'endommager le montage dans sa totalité !

Pour éviter par exemple un branchement inverse de l'alimentation sur le connecteur (+15V sur le -15V et vice-versa), on place des diodes de signal D5 et D6 de façon à ce que le courant ne puisse circuler que dans le bon sens.

On placera également deux condensateurs C5 et C6 en parallèle à l'alimentation pour absorber les pics et combler les creux de tension qui pourraient apparaître si l'alimentation n'est pas de bonne qualité . Ces condensateurs ont

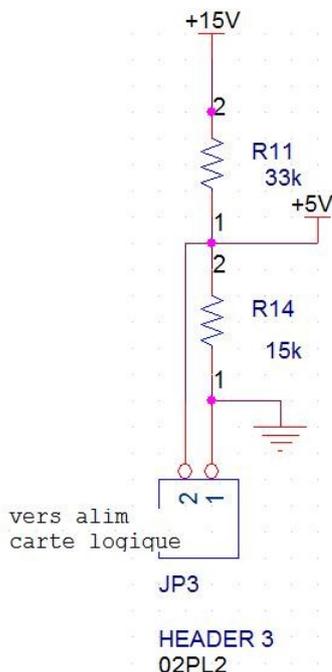
alors un rôle de filtrage (filtre passe-bas avec les résistances séries) de la tension d'alimentation et permettent d'avoir une tension alimentant le montage bien lisse et sans parasite.

Enfin on place des diodes électroluminescentes D3 et D4 aux bornes des deux tensions symétriques, ces diodes vous s'éclairer pour signaler la bonne mise sous tension ou non du circuit. On choisira deux LEDs rouges (pour le +15V et le -15V). La DEL D3 s'allume alors quand l' alimentation en tension +15V est présente et la DEL D4 pour la tension -15V.

Les résistances R15 et R16 sont placées de telle sorte à faire circuler un courant de l'ordre de 15 mA dans les LEDs. Avec  $|15V|$  en alimentation, comme  $U=R \times I$  alors  $R = \frac{U}{I}$  avec  $U=15V$  et  $I \approx 15mA$  donc  $R_{15} = R_{16} \approx 1k\Omega$

### 2.1.2. Alimentation +5V / 0V continus

Pour alimenter certaine parties du montage (notamment la carte "logique de commande") qui ont besoin d'avoir du 0V/5V, nous allons devoir réaliser à partir du +15V le +5V. Pour cela, la tension de +5V sera obtenu avec un pont diviseur de tension.



$$5V = \frac{R_{14}}{(R_{14} + R_{11})} \times 15V \rightarrow R_{14} + R_{11} \times 5 = R_{14} \times 15$$

$$\rightarrow R_{14} = \frac{R_{11}}{2}$$

On choisira par exemple  $R_{14} = 15k\Omega$  et  $R_{11} = 33k\Omega$

*Illustration 25: Alimentation +5V / 0V par pont diviseur de tension*

### 3. Tests

#### 3.1. Adaptation en tension:

Pour simuler la variation d'appui sur la pédale d'accélération nous utilisons un potentiomètre d'une valeur de 5kΩ. Puisque le potentiomètre a valeur de 10kΩ dans notre essai nous branchons en parallèle une résistance de 10kΩ pour obtenir une valeur maximale du potentiomètre à 5kΩ:

$$R(\text{Potentiometre}) = \frac{10^3 * 10^3}{(10^3 + 10^3)} = 5k\Omega$$

#### Préparation du test

Utilisation d'une alimentation 0/+15V branché aux bornes de la résistance 330Ω et du potentiomètre pour permettre le test de l' adaptation en tension.

#### Plaque test

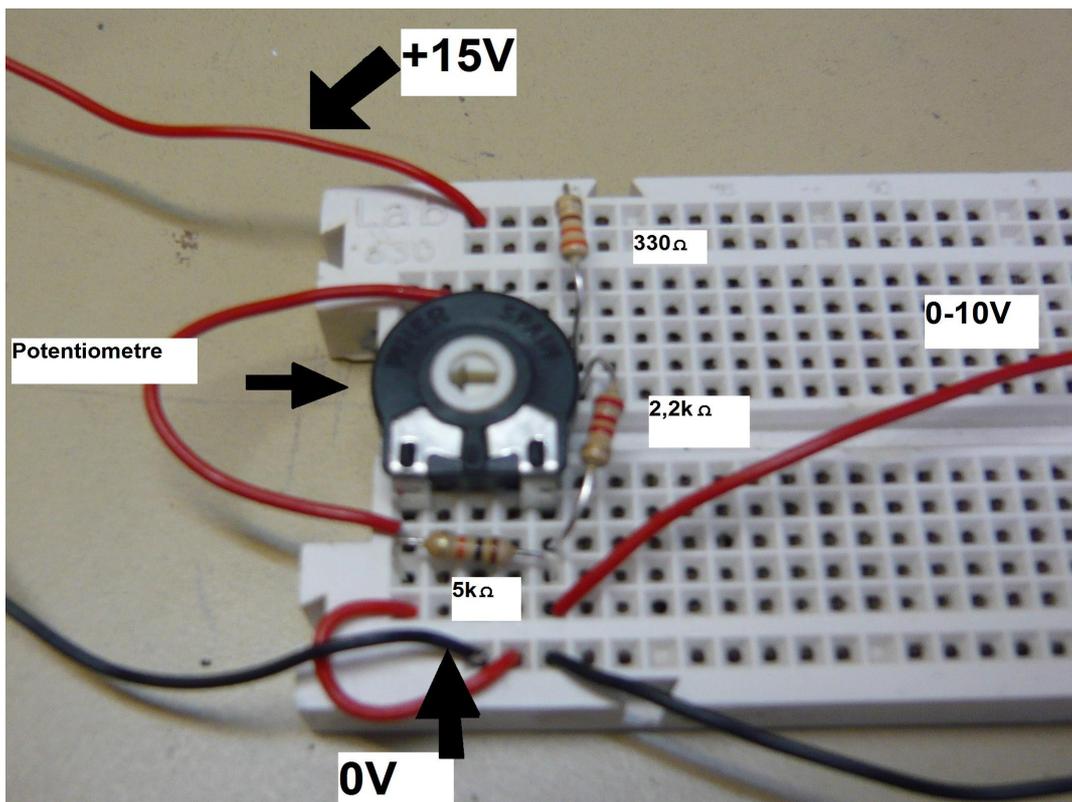


Illustration 26: Plaque test pour l'adaptation en tension

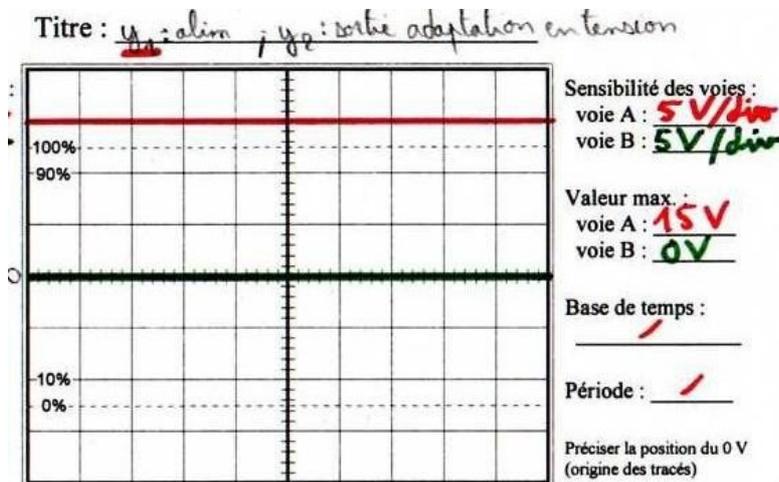
## Procédure de test

- Appareils de mesure nécessaires:

-Un oscilloscope branché entre la sortie du montage d'adaptation en tension et la masse, ainsi qu'aux bornes de l'alimentation 0V /+15V.

- Alimenter la plaque test a l'aide de l'alimentation continue en +15V.
- Faire varier la valeur du potentiomètre (qui simulera l'entrée, soit la pédale d'accélération) de 0 à sa valeur maximum (5kΩ avec la résistance brancher en parallèle) afin de faire varier la valeur de la tension de sortie.

## Relevés



On voit bien que lorsque l'entrée simulée est à 0 (pas d'appui sur la pédale d'accélération), alors la sortie est à 0.

Illustration 27: Relevé pour  $R_{entrée} = R_{min} = 0 \text{ k}\Omega$

Ensuite lorsque l'entrée simulée est maximale (pied au plancher), alors la sortie est à 10V. C'est bien ce que l'on souhaitait, avoir en sortie une tension qui varie entre 0 et 10V, proportionnellement à l'appui sur la pédale d'accélération.

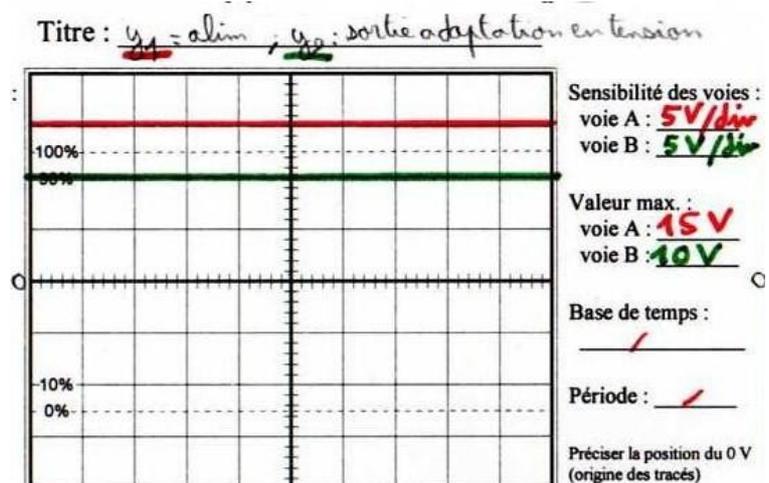


Illustration 28: Relevé pour  $R_{entrée} = R_{max} = 5 \text{ k}\Omega$

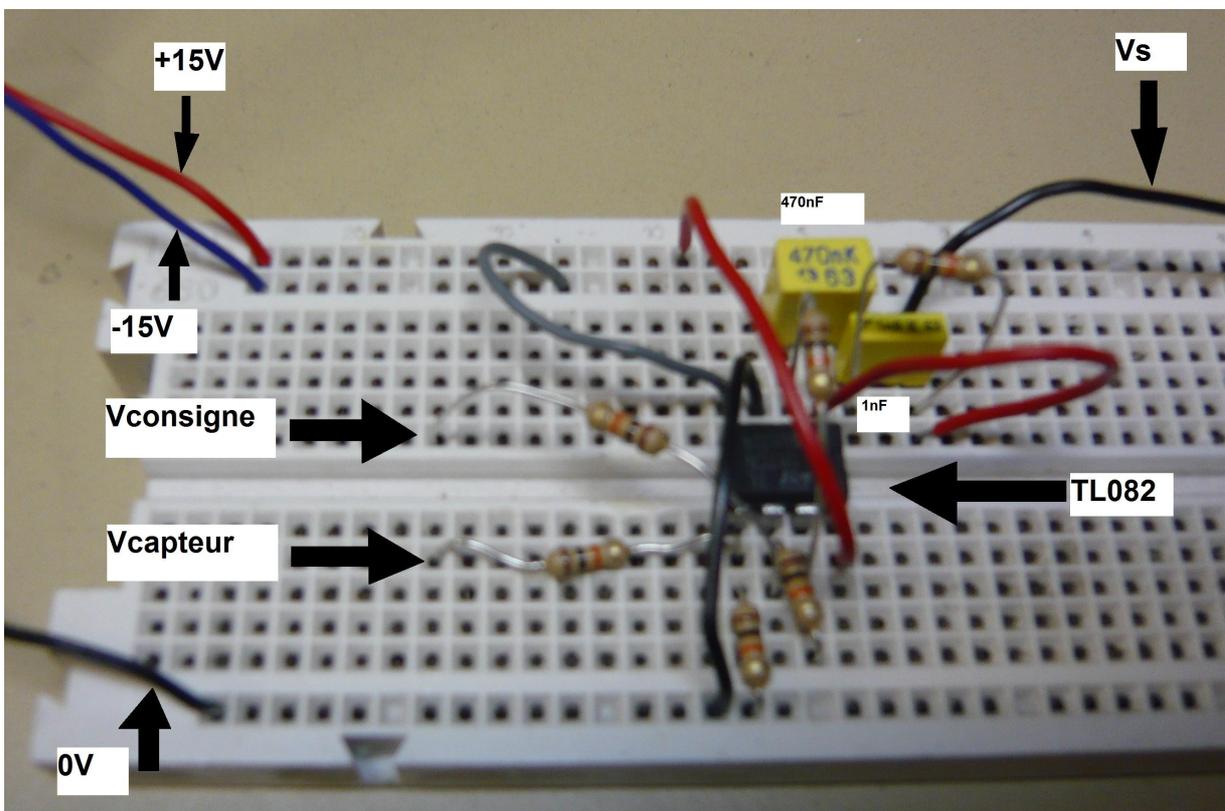
→ Le montage adaptateur en tension, très simple, est validé.

### **3.1. Correcteur PI et soustracteur**

Préparation du test:

- Utilisation d'une alimentation +15V/ -15V pour l'alimentation de l' AOp TL082
- Utilisation d'une alimentation variable 0/+10V pour effectué la variation de la tension de consigne en entrée du correcteur PI.
- Utilisation d'une alimentation variable 0/+10V pour effectué la simulation d'une variation du courant dans le moteur en entrée du correcteur PI.

Plaque test:



*Illustration 29: Plaque test pour le correcteur PI*

#### **Soustracteur**

- Appareils de mesure nécessaires :
  - Un oscilloscope branché en sortie du soustracteur (donc à la résistance R7)
- Alimenter la l' AOP en +15V/-15V continue
- Fixer la valeur de Vconsigne pour une valeur comprise entre 0 et 10V
- Faire varier la valeur de Vcapteur pour relever l'action du soustracteur, Vcapteur-Vconsigne

## Relevé :

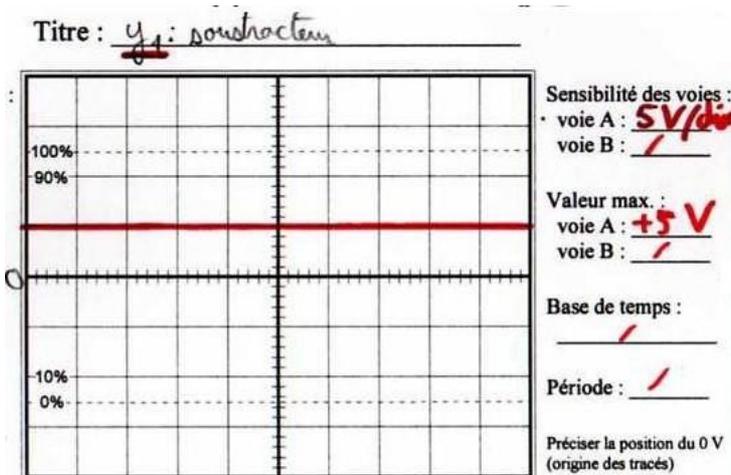


Illustration 30: Relevé pour  $V_{\text{consigne}}=10V$  et  $V_{\text{capteur}}=5V$

En envoyant une consigne de 10V et en recevant dans la boucle de retour une information par le bloc capteur indiquant 5V, on constate alors que le soustracteur effectue correctement la différence car on obtient en sortie la différence des deux tensions : 10V. On fera attention à bien respecter les entrées et leur correspondance aux entrées de l'amplificateur.

## Correcteur PI

- Appareils de mesure nécessaires:
  - Un oscilloscope branché en sortie du correcteur PI donc  $V_s$  afin de relever ce signal pour différentes valeurs de  $V_{\text{consigne}}$  en fonction de la variation de  $V_{\text{capteur}}$ .
- Alimenter l' AOp en +15V/-15V continus.
- Fixer la valeur de  $V_{\text{consigne}}$  pour une valeur comprise entre 0 et 10V.
- Faire varier la valeur de  $V_{\text{capteur}}$  aux environs de  $V_{\text{consigne}}$  pour relever le comportement de  $V_s$  qui variera en fonction de l'erreur qui, si l'erreur est positive alors  $V_s$  vaudra  $+V_{\text{sat}}=15V$  et si l'erreur est négative alors  $V_s$  vaudra  $-V_{\text{sat}}=-15V$ .

## Relevés

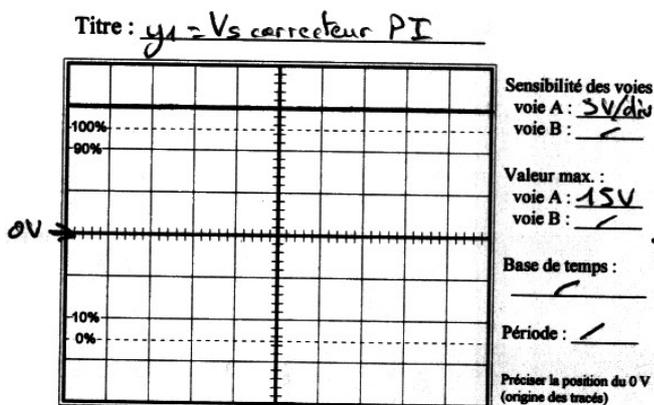


Illustration 31: Relevé pour  $V_{\text{consigne}}=5V$  et  $V_{\text{capteur}}=4,5V$

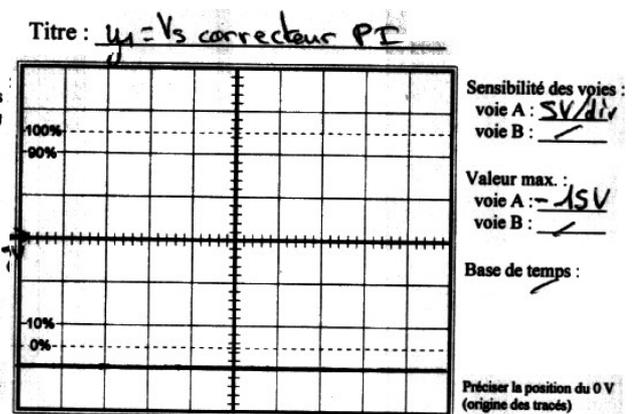


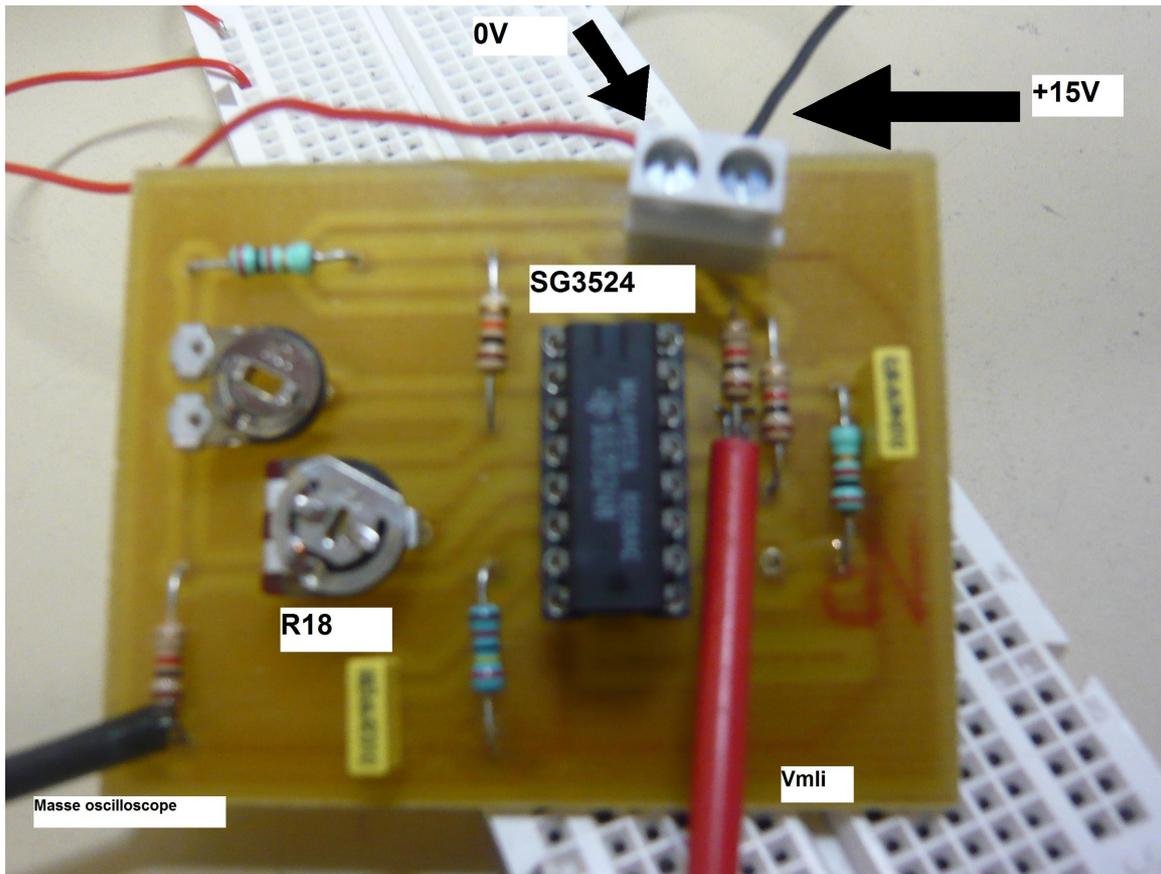
Illustration 32: Relevé pour  $V_{\text{consigne}}=5V$  et  $V_{\text{capteur}}=4,5V$

### 3.1. Modulation à largeur d'impulsion (MLI)

Préparation du test:

Utilisation d'une alimentation +15V/ -15V pour l'alimentation du SG3524 afin de permettre la création d'un MLI

Plaque test:



*Illustration 33: Plaque de test pour la création de la MLI*

Procédure de test

- Appareils de mesure nécessaires  
-Un oscilloscope branché en sortie du circuit intégré SG3524 ( aux bornes de R10 ou R13 )
- Alimenter le circuit SG3524 en 0V/+15V continus
- Faire varier la valeur du potentiomètre R18 pour modifier la valeur de  $\alpha$  et donc modifier le signal de la MLI.

## Relevés

Titre :  $y_1: V_{MLI}$  pour  $\alpha = 0,1$

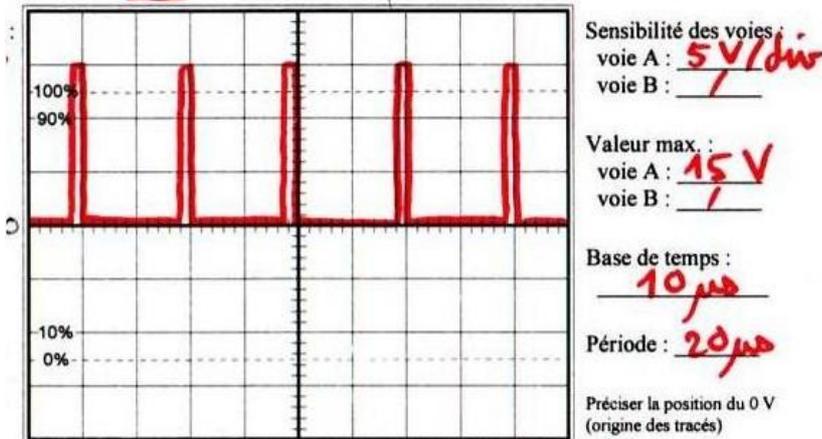


Illustration 34: Relevé pour  $\alpha = 0,1$

Titre :  $y_1: V_{MLI}$  pour  $\alpha = 0,5$

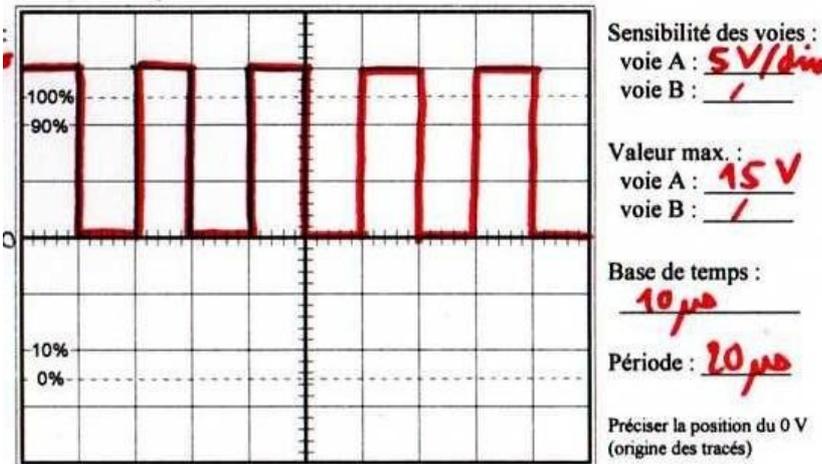


Illustration 35: Relevé pour  $\alpha = 0,5$

Titre :  $y_1: V_{MLI}$  pour  $\alpha = 0,9$

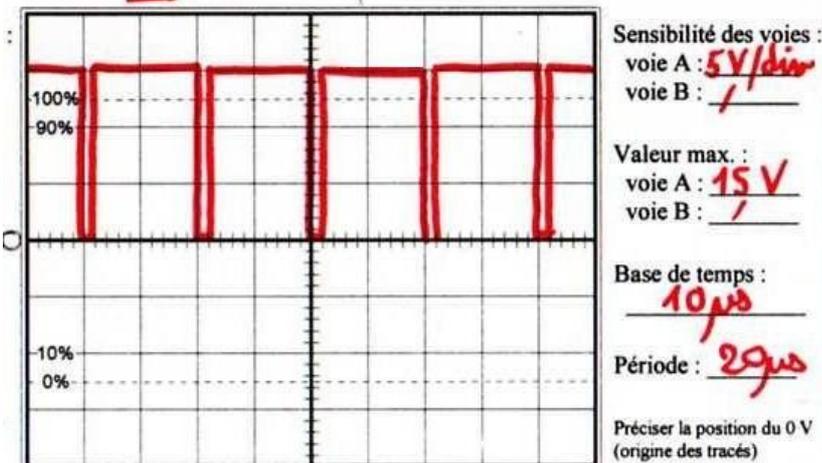


Illustration 36: Relevé pour  $\alpha = 0,9$

On obtient bien une variation significative du rapport cyclique. On remarquera malgré tout que la valeur minimale que l'on peut obtenir de ce facteur n'est pas 0 mais un peu moins de 0,1. De même, la valeur maximale pouvant être obtenue est un peu plus de 0,9 et non pas 1 !

Ainsi l'obtention d'un signal continu en sortie du bloc MLI se fera par l'intermédiaire de la partie logique de commande inséré juste en sortie du SG3524 afin de bien récupérer le signal modulé et de pouvoir l'utiliser (transmission du signal) ou non (mise à la masse du signal) selon le choix de l'utilisateur (mise en marche avant ou arrière, ou mise à l'arrêt).

## **4. Création de la carte et finalisation**

### **4.1. Schéma final**

Après avoir rassemblé et connecté tout les blocs entre eux, on obtient le schéma complet.

→ voir annexes 1 et 2

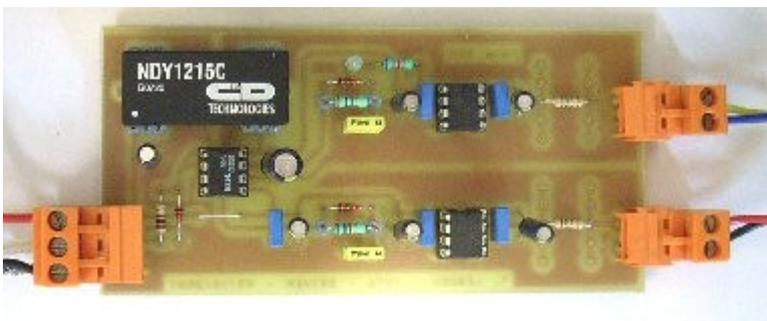
### **4.2. Typon**

Puisque notre carte comportera beaucoup d'éléments électroniques qui sont liés, nous avons décidé de créer le typon (dessin réel des pistes) sur deux couches : la couche du dessus (TOP) et la couche de la partie arrière de la carte (BOTTOM)  
→ voir annexes 3 et 4 (pour la couche composants)

### **4.3. Liste du matériel**

Pour la liste des composants, les coût et les valeurs : annexe 7

### **4.4. Carte drivers de transistors MOSFET**



*Illustration 37: Carte "Drivers de transistors MOSFET"*

Cette carte créée lors des années précédentes permet de commander les transistors de puissance MOSFET. Composée de deux IR2183 et de deux amplificateurs de puissance, elle permet la commande des transistors suivant le signal qu'on lui envoie (le signal MLI).

Nous aurions pu utiliser cette carte pour commander les transistors (voir partie 5 : Incidents).

### **4.5. Finalisation**

Après perçage et soudure de la plupart des composants (certains n'étant pas encore disponibles), on peut admirer la carte quasiment finalisée en annexe 8.

#### **4.6. Validation des contraintes**

Au commencement du projet, nous avons établi plusieurs contraintes pour respecter le bon fonctionnement de tout le montage afin de résister aux divers facteurs pouvant survenir et détériorer l'appareillage ou attenter à la sécurité des utilisateurs.

Dans un premier temps, nous avons défini la contrainte en température. En effet, le kart peut fonctionner durant des température allant entre 0°C (plein hiver) et 40°C (plein soleil en été). Pour cela nous avons dû choisir nos composants en fonction de la température, les autres facteur de montage (électriques) étant aussi pris en compte.

La résolution de la deuxième contrainte a été de penser à un système évitant toute intrusion dans le système pour répondre à des besoins de sécurité. En effet, les risques d'humidité sont important pour un fonctionnement sur une piste de karting en extérieur avec une météo variable. Nous devons veiller également à la sécurité de l'utilisateur et des personnes aux alentours du kart, qui pourraient subir un choc électrique, le courant circulant dans le hacheur étant important. Pour cela, nous avons songé à utiliser une boite de dérivation électrique étanche contre l'humidité et scellée à l'aide d'une serrure ou d'un petit cadenas empêchant toute intrusion non autorisée. Cette boite sera étanche avec l'ajout d'un joint sur le pourtour de son l'ouverture.

Ensuite, une autre contrainte à régler était celle de mouvement. En effet, la carte lors du fonctionnement du kart peut subir des chocs dus aux imperfections de la piste ou des chocs par d'autre karts. Pour remédier à cela, il serait utile d'ajouter des coins de caoutchouc sur les coins de la boite de dérivation ainsi qu'une fixation souple de cette boîte au kart.

Une boite de 30cm x 30cm suffira à respecter les conditions de places sur le kart et permettra d'ajouter d'autres cartes électroniques (par exemple la commande de l'éclairage).

## **5. Incidents**

Durant les six premières semaines, le projet s'est déroulé sans incident majeur avec une étude du système à réaliser en conformité avec le planning. Mais à partir de la semaine 45 jusqu'à la semaine 50, le travail effectué a été hors sujet ! En effet, lors de la découverte du sujet, ses limites n'ont pas été correctement définies. Croyant alors que nous devons réaliser les parties allant du montage adaptateur, correcteur PI puis de la création d'une MLI variable jusqu'à la commande des transistors, nous avons étudié la totalité de ce montage. Nous avons ainsi perdu 4 semaines dans notre emploi du temps que nous aurions utilisé à concevoir notre typon ainsi que divers tests. La moitié de notre carte ne sert donc strictement à rien. Mais les rectifications n'ayant été faites qu'à la dernière séance, nous avons décidé de graver malgré tout notre plaque afin d'avoir concrètement le résultat de nos recherches, même si la partie driver de transistors ne fonctionnera pas.

Nous avons donc réalisé une carte double couches car la totalité du montage n'entrait pas dans une dimension correcte pour être embarquée à bord du kart. Lors du tirage de la plaque, nous avons insolé avec une durée de 2m30. Pour un double face, ce temps d'insolation est trop long. Ainsi pendant la phase de gravure de la carte les pistes ont été totalement détruites (rongées par l'acide). Cette plaque était alors inutilisable. Pour la deuxième gravure, nous avons insolé avec une durée de 2m, ce qui a suffi à ne pas traverser les pistes camouflées par le masque du calque.

Un autre problème est survenu lors du tirage de la première plaque. Devant aligner quatre calques parfaitement, un décalage s'est fait lors de l'insolation, ce qui fait que les deux faces n'étaient pas totalement en face et donc ce problème se serait perpétré lors du perçage. Pour la deuxième insolation, nous avons alors fixé les calques sur la plaque au moyen de Scotch pour éviter tout mouvement des calques et ainsi ne pas reproduire l'erreur précédente. Nous avons aussi dû faire face à une piste détruite lors de la seconde gravure. Pour remédier à ce problème, nous avons soudé une patte de résistance pour remplacer cette piste perdue.

## **Conclusions**

Ce projet nous a permis de réaliser l'étude complète d'un hacheur quatre quadrants pour moteur à courant continu. L'étude s'est majoritairement concentrée sur la correction proportionnelle intégrale et sur la création d'une modulation à largeur d'impulsion. Le projet étant défini comme l'étude d'un hacheur quatre quadrants, nous avons étudié la totalité du montage alors que nous devions étudier seulement les parties relevant de la correction PI et de la création d'une MLI variable.

Même si la carte n'est pas complètement finalisée, les tests portants sur la correction PI, sur la comparaison entre la chaîne directe et la chaîne de retour, et sur la génération d'un signal MLI évoluant selon la consigne de l'utilisateur sont concluants. Même si ce n'était pas de notre ressort d'étudier la commande des transistors cela nous a apporté une réflexion supplémentaire qui s'est révélée intéressante.

L'étude du projet complet nous a beaucoup apporté, en termes d'autonomie, de réflexion et de recherches de solutions appropriées à un problème donné. Nous avons dû nous répartir le travail et nous concerter lors de prises de décision comme la sélection d'une solution par rapport à un vaste panel de possibilités.

Cela nous a également permis de faire une utilisation avancée d'un logiciel de conception électronique professionnel, ce qui pourra se révéler utile lors de nos stages ou notre entrée dans le monde professionnel.

## **Index des illustrations**

Illustration 1: Synoptique général.....	5
Illustration 2: Synoptique détaillé.....	6
Illustration 3: Planning.....	8
Illustration 4: Adaptateur en tension.....	9
Illustration 5: Montage comparateur.....	10
Illustration 6: Intégrateur Pur.....	12
Illustration 7: Intégrateur compensé.....	13
Illustration 8: Proportionnel Intégrateur.....	14
Illustration 9: Bloc correcteur PI.....	14
Illustration 10: Allure de la réponse indicielle.....	16
Illustration 11: Principe de la variation de vitesse par MLI.....	17
Illustration 12: Montage test conseillé par le constructeur (ST Microelectronics).....	18
Illustration 13: Schéma du circuit générateur MLI utilisé.....	19
Illustration 14: Câblage des Drivers de transistors.....	20
Illustration 15: Circuit passe-bas atténuateur.....	21
Illustration 16: Chronogramme entrées-sorties des IR2183.....	21
Illustration 17: Interrupteurs du hacheur 4 quadrants.....	22
Illustration 18: Carte "logique de commande".....	22
Illustration 19: Typon de la carte logique.....	22
Illustration 20: Schéma de principe du hacheur 4 quadrants.....	23
Illustration 21: Modes de fonctionnement hacheur.....	23
Illustration 22: Caractéristique $U_c=f(t)$ du hacheur.....	24
Illustration 23: Caractéristiques $E=f(I_c)$ et $\Omega=f(\Gamma)$ du moteur à courant continu.....	25
Illustration 24: Filtrage et sécurité de l'alimentation.....	26
Illustration 25: Alimentation +5V / 0V par pont diviseur de tension.....	27
Illustration 26: Plaque test pour l'adaptation en tension.....	28
Illustration 27: Relevé pour .....	29
Illustration 28: Relevé pour .....	29
Illustration 29: Plaque test pour le correcteur PI.....	30
Illustration 30: Relevé pour $V_{consigne}=10V$ et $V_{capteur}=5V$ .....	31
Illustration 31: Relevé pour $V_{consigne}=5V$ et $V_{capteur}=4,5V$ .....	31
Illustration 32: Relevé pour $V_{consigne}=5V$ et $V_{capteur}=4,5V$ .....	31
Illustration 33: Plaque de test pour la création de la MLI.....	32
Illustration 34: Relevé pour $\alpha = 0,1$ .....	33
Illustration 35: Relevé pour $\alpha = 0,5$ .....	33
Illustration 36: Relevé pour $\alpha = 0,9$ .....	33
Illustration 37: Carte "Drivers de transistors MOSFET".....	34
Illustration 38: Schéma électrique global (page 1).....	40
Illustration 39: Schéma électrique global (page 2).....	41
Illustration 40: Typon de la carte face composants (TOP).....	42
Illustration 41: Typon de la carte face soudures (BOT).....	42
Illustration 42: Placement des composants.....	43
Illustration 43: Logigramme de la carte "Logique de commande".....	43
Illustration 44: Carte vue face soudures.....	44
Illustration 45: Carte vue face composants.....	44

→ L'ensemble de ces illustrations proviennent, soit des sites internet référencés page suivante, soit ce sont des éléments issus de créations personnelles.

## **Références**

- [1] **Thierry LEQUEU**, "*Banque de données de Thierry LEQUEU*", [En ligne]. <<http://www.thierry-lequeu.fr/>> (Page consultée le 14 Décembre 2008).
- [2] **International Rectifier**, "*Documentation technique du IR2183*", [En ligne]. <<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/irf/ir2183.pdf>> (Page consultée le 12 Décembre 2008).
- [3] **STMicroelectronics**, "*SG3524: REGULATING PULSE WIDTH MODULATORS*", [En ligne]. <<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet2/2/04lt77e84pldgysdlrpl6tcrwfy.pdf>> (Page consultée le 12 Décembre 2008).
- [4] **STMicroelectronics**, "*TL082: GENERAL PURPOSE J-FET - DUAL OPERATIONAL AMPLIFIERS*", [En ligne]. <<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/stmicroelectronics/2300.pdf>> (Page consultée le 12 Décembre 2008).
- [5] **Advanced Power Technology Europe**, "*Phase leg MOSFET Power Module*", [En ligne]. <<http://www.thierry-lequeu.fr/data/APTM10AM02F.pdf>> (Page consultée le 14 Décembre 2008).
- [6] **Routoure JM**, "*Travaux pratiques : Présentation de l'EEADEUG A, 1ère année.*", [En ligne]. <[http://www.greyc.ensicaen.fr/~routoure/enseignement/DEUG/trois/3eme.html#fig\\_integrateur](http://www.greyc.ensicaen.fr/~routoure/enseignement/DEUG/trois/3eme.html#fig_integrateur)> (Page consultée le 8 Décembre 2008).
- [7] **Wikipedia**, "*Modulation de Largeur d'Impulsion*", [En ligne]. <[http://fr.wikipedia.org/wiki/Modulation\\_de\\_largeur\\_d%27impulsion](http://fr.wikipedia.org/wiki/Modulation_de_largeur_d%27impulsion)> (Page consultée le 8 Décembre 2008).
- [8] **Jacques WEBER**, "*Systèmes de contrôle en boucle fermée*", [En ligne]. <[http://pagesperso-orange.fr/jacques.weber/systemes\\_boucles/controle\\_boucle\\_fermee.html#6Les\\_correcteurs](http://pagesperso-orange.fr/jacques.weber/systemes_boucles/controle_boucle_fermee.html#6Les_correcteurs)> (Page consultée le 8 Décembre 2008).
- [9] **Académie de TOULOUSE**, "*REFLEXIONS A PROPOS DE TRAVAUX PRATIQUES sur DERIVATEUR ET INTEGRATEUR*", [En ligne]. <<ftp://ftp.ac-toulouse.fr/pub/pha/res-peda/tplpi/phm03.doc>> (Page consultée le 8 Décembre 2008).
- [10] **INSA ROUEN**, "*Les correcteurs*", [En ligne]. <<http://asi.insa-rouen.fr/enseignement/siteUV/auto/didacticiel/notions/correcteurs.htm>> (Page consultée le 8 Décembre 2008).
- [11] **Académie de CAEN**, "*Le moteur à courant continu à aimants permanents*", [En ligne]. <<http://www.discip.ac-caen.fr/sti/stibacs/modules.php?name=News&file=article&sid=171>> (Page consultée le 8 Décembre 2008).
- [12] **Lyçée Pierre Émile Martin, Bourges**, "*Les convertisseurs de puissance*", Documents de cours Terminale STI Électrotechnique, (3 Mars 2006).

# ANNEXES

## ANNEXE 1

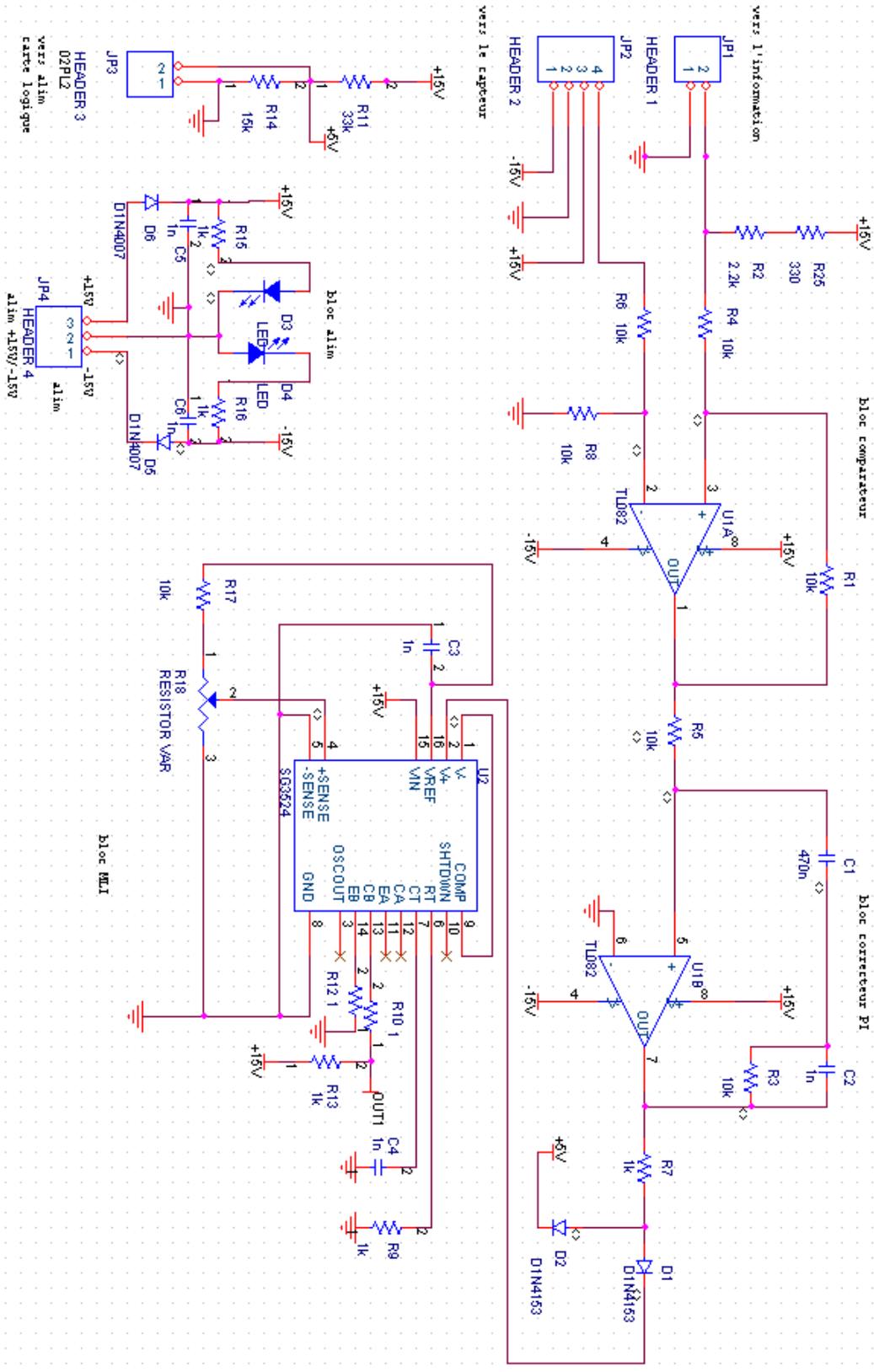


Illustration 38: Schéma électrique global (page 1)

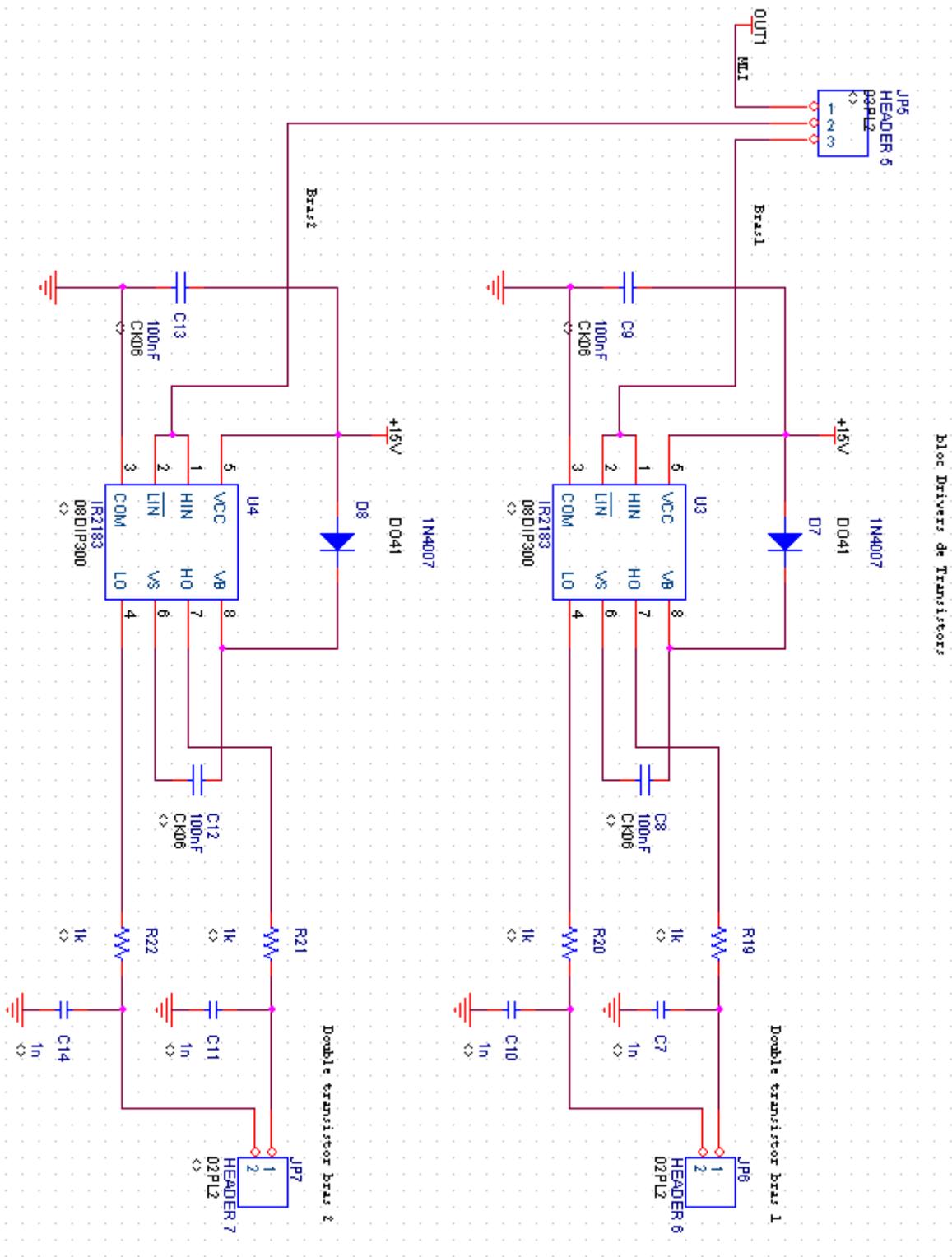


Illustration 39: Schéma électrique global (page 2)

ANNEXE 3

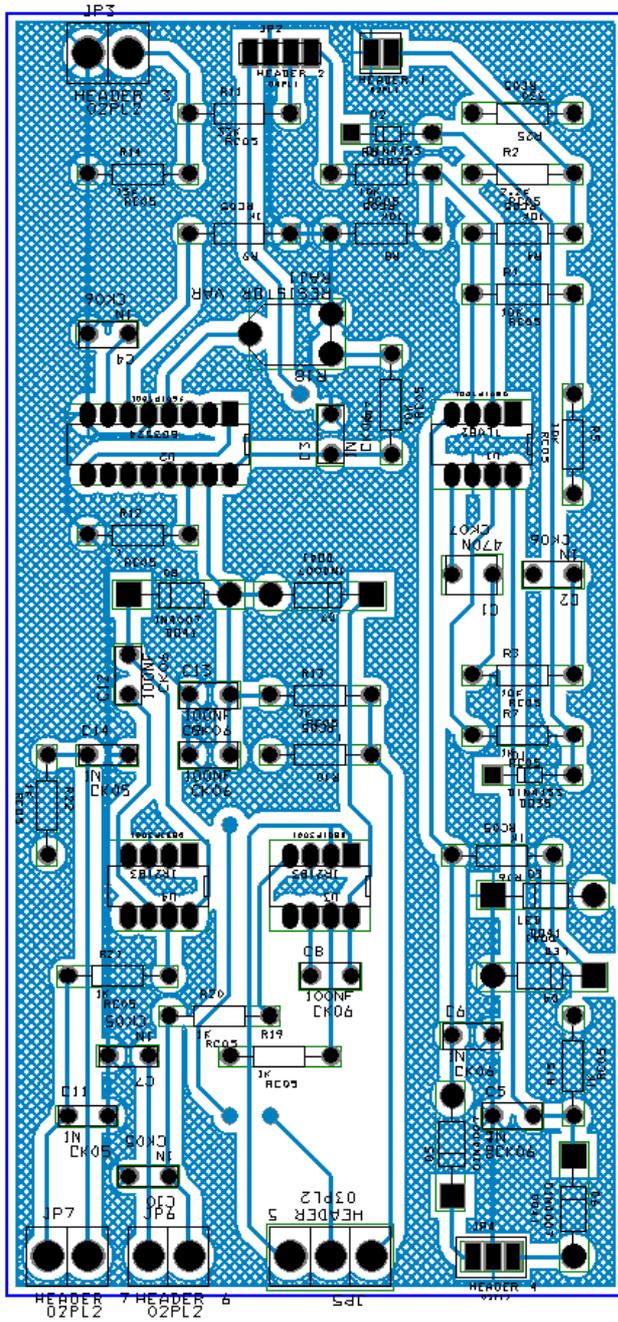


Illustration 40: Typon de la carte face composants (TOP)

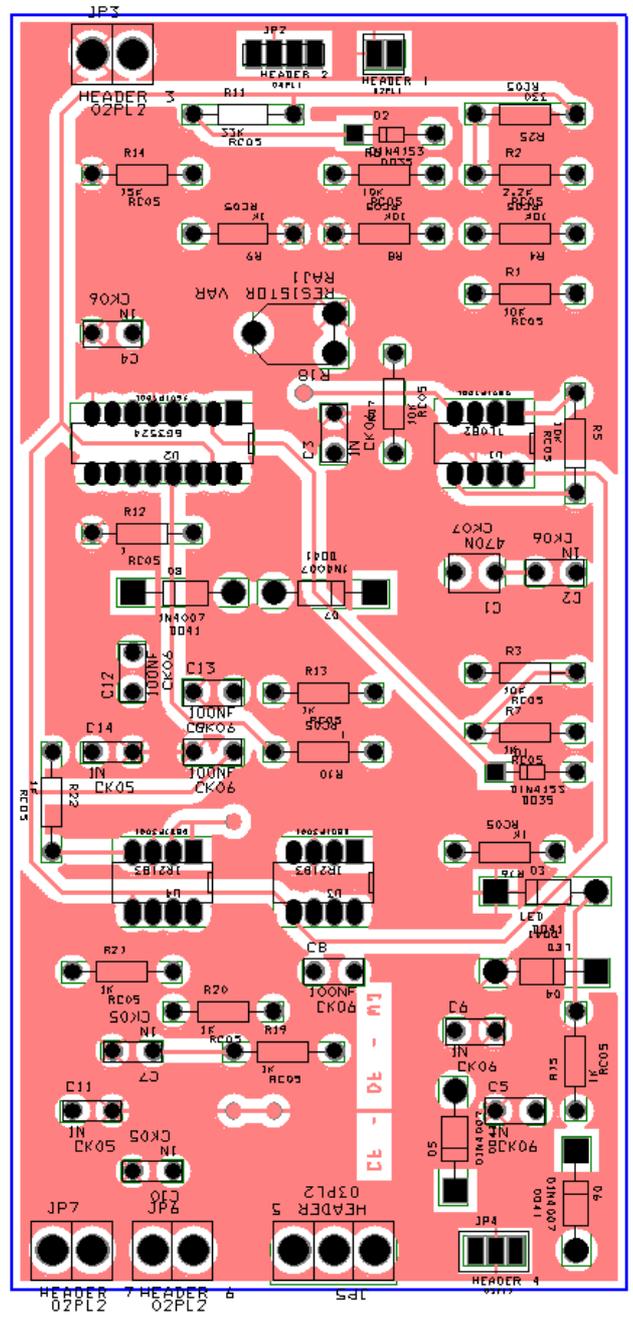


Illustration 41: Typon de la carte face soudures (BOT)

# ANNEXE 4

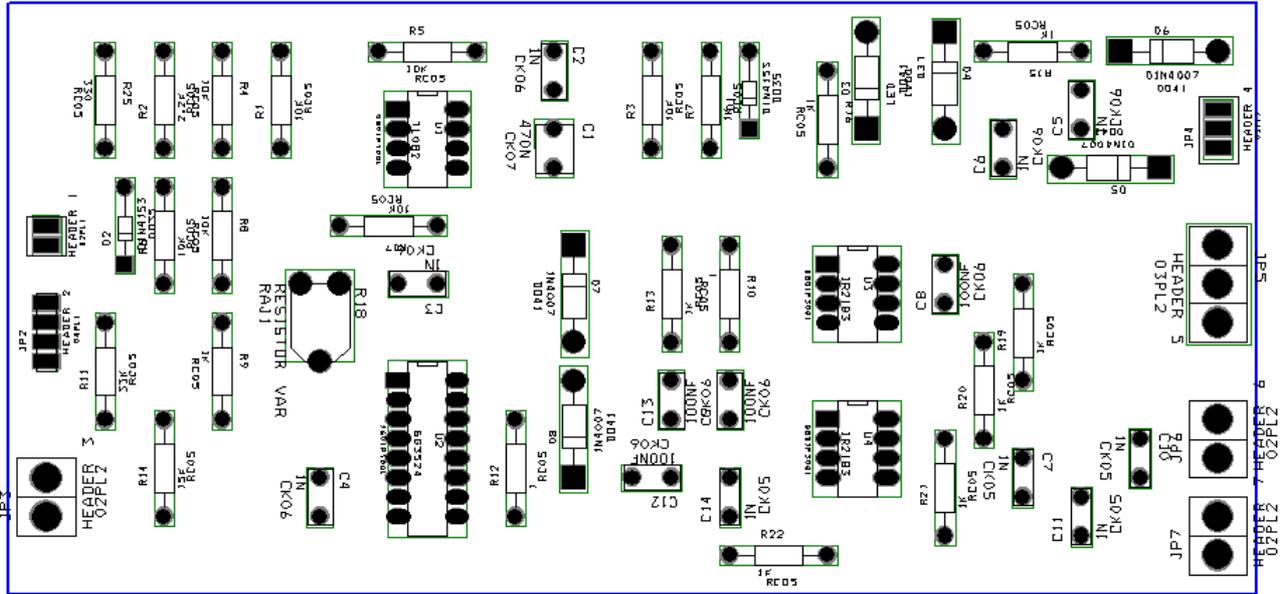


Illustration 42: Placement des composants

# ANNEXE 5

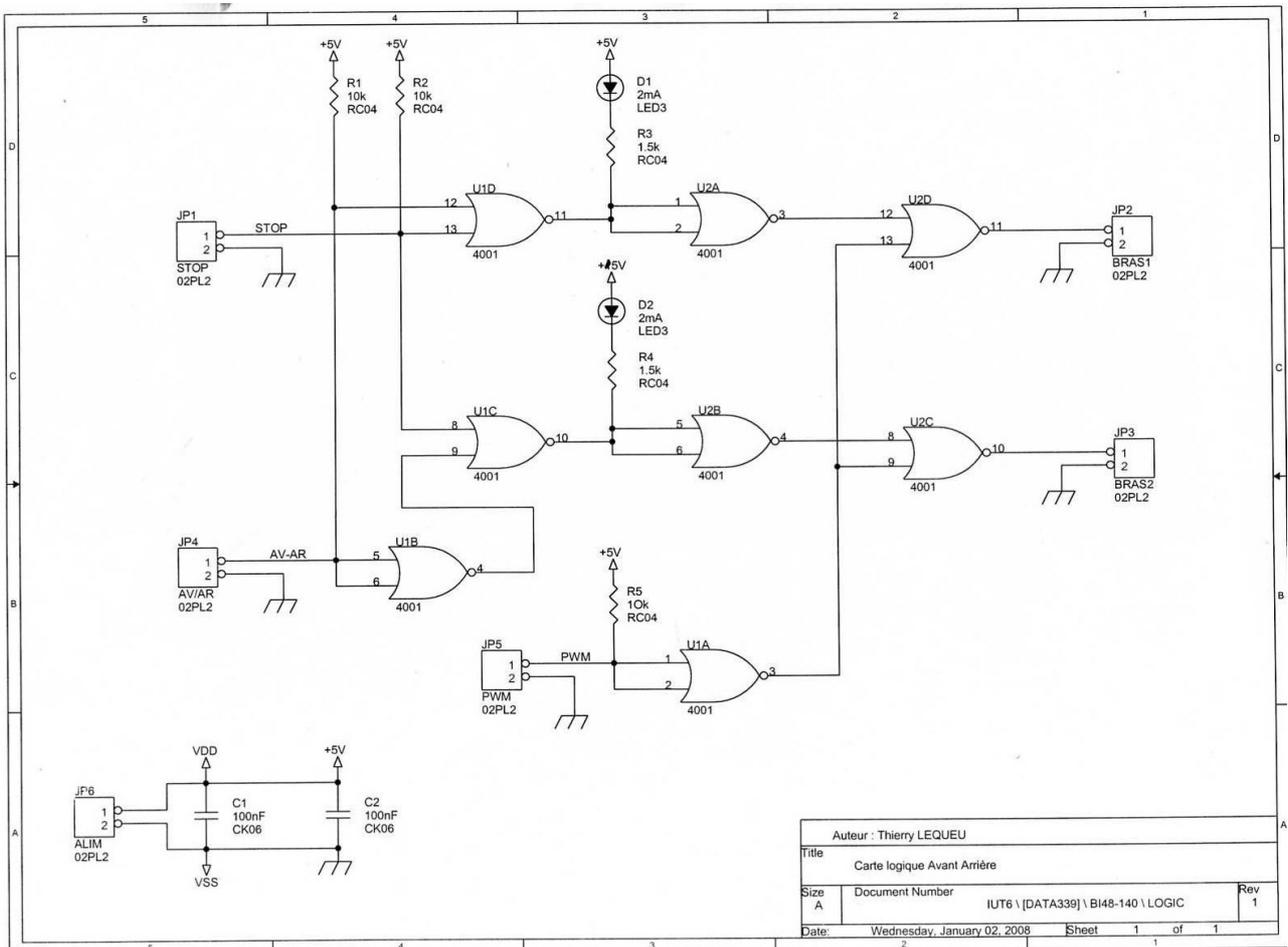


Illustration 43: Logigramme de la carte "Logique de commande"

## ANNEXE 6

→ Photos de la carte en cours de finalisation

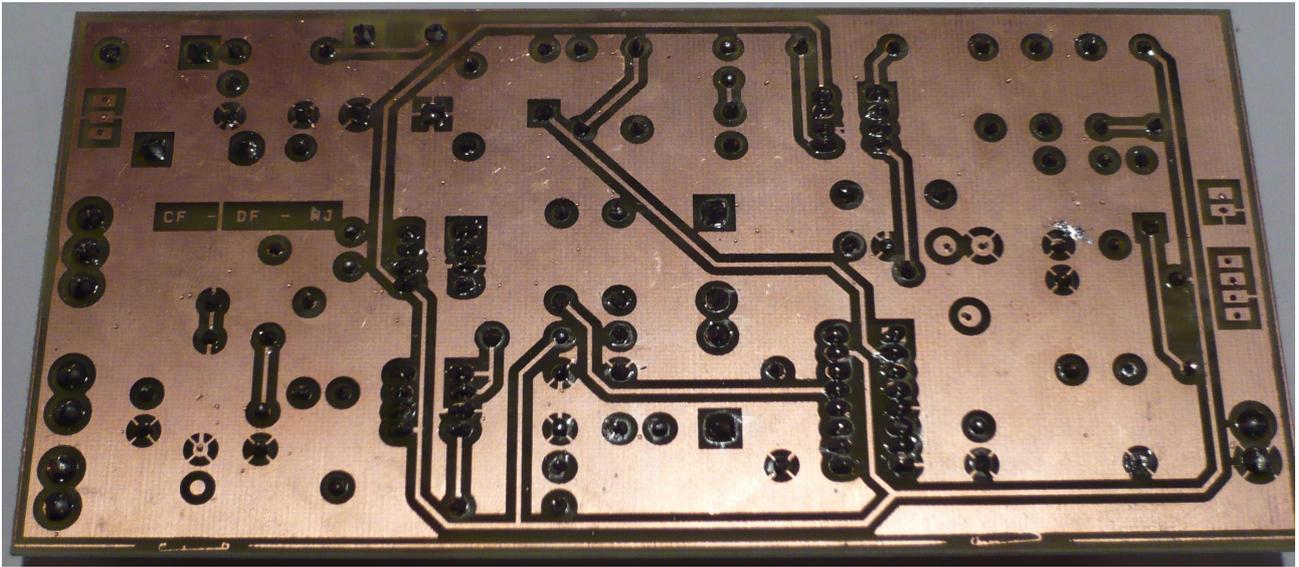


Illustration 44: Carte vue face soudures

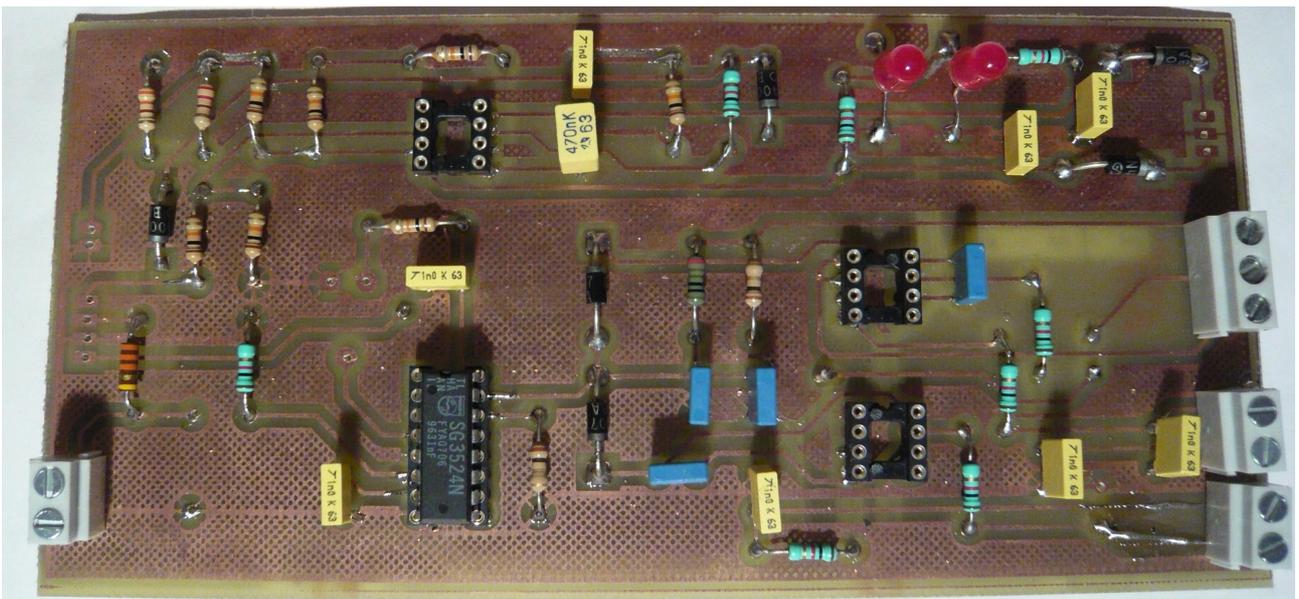


Illustration 45: Carte vue face composants

## ANNEXE 7

Tableau comparatif des composants utilisés

Item	Quantité	Référence	Designation	Valeur	Puissance Tension	Technologie Fabricant	Empreinte physique	PRIX (€)
Condensateur	1	BQ074E0474K-	C1	470nF	100V	Polyester	CK06	0,39
	9	BQ014E0102K-	C2, C3, C4, C5, C6, C7, C10, C11, C14	1nF	100V	Polyester	CK06	1,28
	4	BQ074G0104K-	C8, C9, C12, C13	100nF	250V	Polyester	CK06	1,17
Diode	4	D1N4153	D1, D2		9,1V		D041	0,1
	2	D1N4007	D5, D6, D7, D8		9,1V		D041	0,1
LED	2	L-8131D	D3, 42		2,0V		D041	0,86
	4	25,340,3253,0	JP1, JP3, JP6, JP7	2 bornes			02PL1	5,41
Connecteur	2	25,340,3353,0	JP4, JP5	4 bornes			04PL1	3,78
	1	25,340,3453,0	JP2	3 bornes			03PL1	2,41
	7	232219314103	R1, R3, R4, R5, R6, R8, R17	10kΩ	1W	Couche métallique	RC05	1,02
	1	232219514222	R2	2,2kΩ	3W	Couche métallique	RC05	0,25
	9	231291511002	R7, R9, R13, R15, R16, R19, R20, R21, R22	1kΩ	0,6W	Film mince	RC05	0,24
Résistance	2	W21-1R0J1	R10, R12	1Ω	3W	Bobinée	RC05	0,92
	1	232219314333	R11	33kΩ	1W	Couche métallique	RC05	0,24
	1	230619853153	R14	15kΩ	1W	Couche métallique	RC05	0,24
	1	PC910,10K,RS	R18	10kΩ	1W	Cermet	RC05	3,6
	1	232219314334	R25	330Ω	1W	Couche métallique	RC05	0,15
	1	T1082	U1A, U1B		±3,5 → ±18V		08DIP300L	0,38
Circuit intégré	1	SGS524	U2		+8 → +40 V		16DIP300L	1,15
	2	IR2183	U3, U4		600V		08DIP300L	2,7
<b>Total:</b>								<b>26,37</b>