

Le b.a.ba du pont en H

Ph. Dondon © Copyright Enseirb-Matmeca 2013

Avertissement :

N'étant ni spécialiste des moteurs, ni des modélisations des procédés, cette page aborde les ponts en H du point de vue électronique. Pour plus détails sur la modélisation des moteurs, des asservissements, se référer aux cours des collègues automaticiens.

1. Introduction

Avant de discuter la structure et le fonctionnement d'un pont en H, encore faut-il en comprendre l'intérêt et la nécessité. Pour cela, prenons une analogie simple entre un moteur électrique DC et un cycliste :

Soit donc un cycliste démarrant au feu (vert).

Il faut une impulsion initiale longue pour lancer le vélo.

Puis, une fois lancé, on peut pédaler :

1° en continu avec un appui permanent moyen sur les pédales (tension continue aux bornes du moteur). La vitesse du vélo (du moteur) sera lissée et constante si le couple résistant est constant.

2° en discontinu (découpage) :

-Avec des cycles T de « pédalage (T_{on}) // roue libre (T_{off}) » très longs ($T=T_{on}+T_{off}$), la vitesse du vélo (du moteur) va onduler fortement autour d'une valeur moyenne.

Dans ce cas, chaque phase d'appui sur les pédales est intense, presque impulsionnel : il faut appuyer très fort pour compenser la perte de vitesse pendant la phase de roue libre. Au pire, on peut voiler le cadre ou casser les pédales. (Risque de destruction du moteur si le courant est trop important).

-Avec une fréquence de découpage rapide, la vitesse du cycliste sera mieux lissée.

Il y a donc un rapport certain entre la constante de temps des muscles du cycliste (ou électrique $\tau = L/R$ du moteur), et la période de découpage T_{dec} . On prend raisonnablement $T_{dec} < 10 \cdot \tau$ pour un lissage « correct ». Cependant, si l'on pratique le « découpage » dès le démarrage au feu, la période T ne doit pas être trop petite (c-a-d la fréquence de découpage pas trop élevée) car le T_{on} doit être suffisamment long pour permettre de lancer le vélo (vaincre le couple de cédage au démarrage, frottement etc.); Tout le monde sait bien qu'il faut un effort initial plus important pour mettre le vélo en mouvement que pour entretenir celui-ci, une fois lancé.

Il y a donc une limite basse et une limite haute pour la fréquence de découpage.

Mais dans les tous cas, le rapport cyclique (temps d'appui sur les pédales/temps de cycle), T_{on}/T fixe la vitesse moyenne d'avance du vélo (à couple résistant donné).

Attention : En descente, le vélo entraîne le cycliste : on passe en mode génératrice (avec un pignon fixe, le vélo entraînerait les jambes du cycliste). Mais dans les autres cas, on reste en régime moteur (hélas, pour les cyclistes...)



question : Mais qu'en est-il du moteur ?

Un moteur CC alimenté sous une tension continue, consomme un courant en général important (plusieurs ampères). Il faut donc une alimentation de puissance. Pour contrôler sa vitesse, on pourrait penser à faire varier cette tension d'alimentation. Malheureusement, ceci est difficile d'un point de vue électronique, surtout si l'on veut faire un asservissement qui doit répondre rapidement.

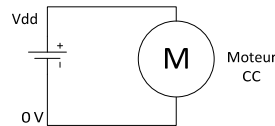


Figure 1 : Moteur CC

Il est plus facile de travailler en discontinu, ou encore « tension hâchée » : Le pilotage du rapport cyclique permet de contrôler la tension moyenne appliquée au moteur donc sa vitesse.

2. Le pont en H

Le découpage le plus simple auquel on pense est celui qui comporte un interrupteur comme indiqué en figure 2 actionné par un signal PWM (signal logique de rapport cyclique commandé) :

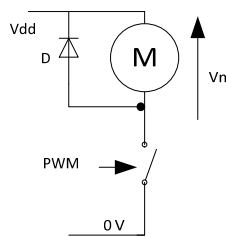


Figure 2 : Hacheur basique

Notons la présence obligatoire de la diode D dite de roue libre : en effet, le moteur étant un élément inductif par nature, le courant le traversant ne peut pas s'annuler brusquement ($L \cdot di/dt$ ne peut pas tendre vers l'infini). Par ailleurs, ce découpage simple effectué par le signal PWM permet de piloter le moteur que dans un seul sens de rotation : la tension moyenne à ses bornes est toujours positive.

Pour piloter le moteur dans les deux sens, il est nécessaire de passer à la structure en H. selon la paire d'interrupteur activée T1, T4 ou T3, T2 le courant passera dans un sens ou dans l'autre.

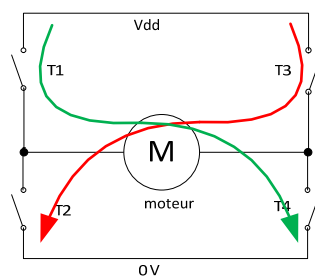


Figure 3: Pont en H

D'un point de vue électronique, les interrupteurs sont réalisés par des transistors MOS discrets. Mais ils existent aussi des circuits intégrés en demi-pont ou pont-entier incluant MOS ou SENSEFET logique de commande, sécurité diverses, car certaines technologies modernes le permettent pour des tensions de pont allant jusqu'à 60V et des courants de quelques dizaines d'ampères.

L'intérêt des MOS, si bien choisis, est qu'ils ont une résistance R_{on} à l'état passant, très faible, ce qui limite les pertes de conduction au minimum. Par ailleurs, ils ont une diode intrinsèque interne que l'on peut utiliser en roue libre :

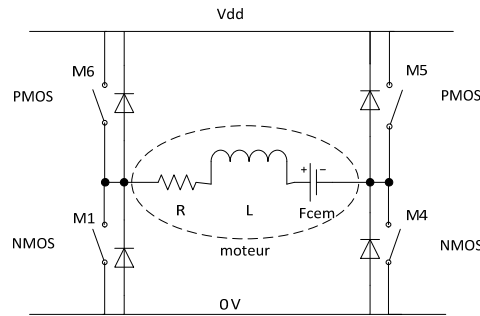


Figure 4 : pont en H transistor MOS

question : Transistors NMOS ou PMOS ?

Les deux transistors « du bas » sont forcément de type NMOS. Ceux du haut peut être des PMOS ou des NMOS avec chacun ses avantages et inconvénients. (Attention aux connexions Source, Drain...)

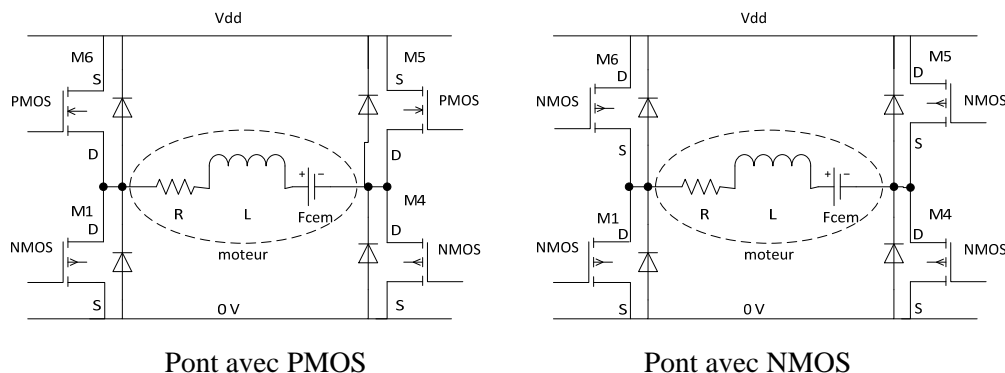


Figure 5 : pont à transistors MOS

- Si l'on prend 4 NMOS : le montage est parfaitement symétrique, la mobilité des électrons étant la même dans chaque transistor, les temps de commutations sont identiques et quasiment pas besoin de temps mort lorsqu'on manœuvre M6 et M1, ou M4 et M5. Cependant, il est nécessaire de prévoir un « bootstrap » (en général simple condensateur à rajouter sur le driver du MOS) pour le pilotage des NMOS du haut.
- Si l'on prend 2 NMOS et 2 PMOS (en haut), la commande logique est simplifiée, (résistance de tirage entre grille et Vdd, diode zener, et capacité de liaison sur la grille du PMOS). La mobilité des électrons étant différente dans les transistors P et N, il est nécessaire de choisir le transistor P apparié conseillé par le constructeur et de prévoir un temps mort en cas de manœuvre de M6 et M1, ou de M4 et M5.

question : Quelle Commandes possible du pont ?

Il y a plusieurs façons de faire fonctionner un pont. Raisonons pour la marche avant. Sachant que pour la marche arrière, le raisonnement est identique. Il suffit d'inverser le rôle des transistors.

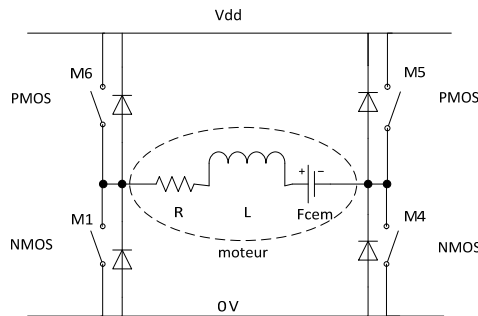


Figure 6 :

Pour la marche avant, il faut M1 et M5 « OFF »

On peut alors soit mettre :

- M6 « ON » en permanence et appliquer le signal PWM sur M4
- M4 « ON » en permanence et appliquer le signal PWM sur M6
- simultanément le signal PWM sur M4 et M6

Remarque: La solution a) n'est pas possible lorsque les transistors du haut sont de type NMOS, en raison de la capacité bootstrap qui ne « tient pas la charge en continu ». Entre les possibilités b) et c), il y a quelques différences abordées dans la suite du texte.

3. Simulation des formes d'ondes avec SPICE

Les simulations suivantes sont inspirées du fonctionnement de la Carte driver DRI 0008 avec 2 demi pont BTS 7960 Infineon.

Remarque : En l'absence de charge (moteur ou autre) c-a-d sortie du pont à vide, les niveaux de tensions en sortie ne sont pas matérialisées (« tristate » avec les 4 MOS « OFF » en même temps).

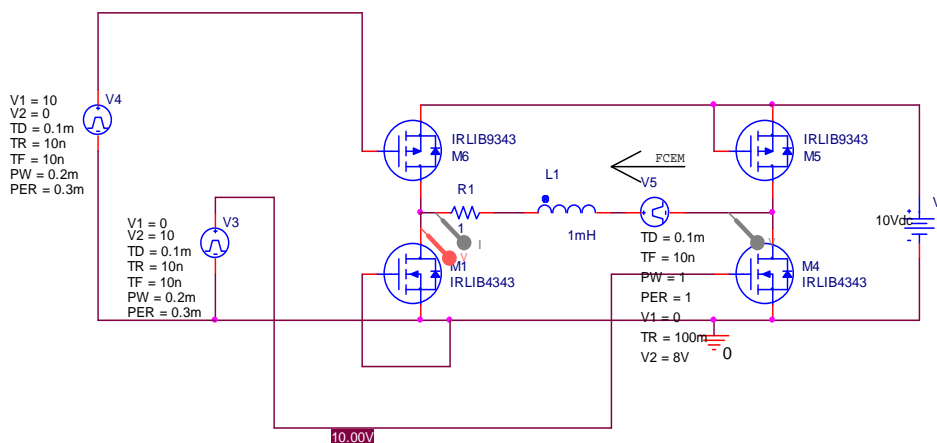


Figure 7

M4 et M6 commutent simultanément. M1, M5 bloqués=>marche avant. La F_{cem} augmente « artificiellement » progressivement (rampe spice sur 100ms), pour simuler le démarrage moteur. (Attention simulation électrique qui n tient pas compte du comportement mécanique réel du moteur)

Au démarrage ; la F_{cem} est voisine de zéro. => Tension appliquée au moteur +10V =>appel de courant fort au démarrage. Rapport cyclique de 2/3 : Le courant instantané monte pendant les 2/3 du temps, et n'a pas le temps de revenir à zéro pendant la phase de roue libre (diodes M1 et M5 passante) (au max 1/3 du temps).

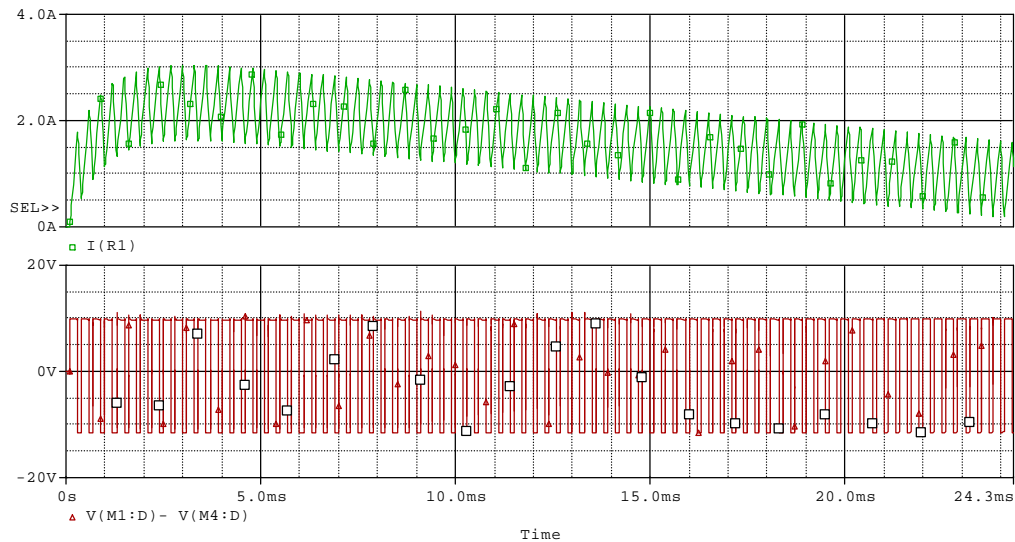


Figure 8 : Courant (vert), tension(rouge) aux bornes du moteur

En régime établi : la F_{cem} est arrivée à 8V. On applique +10V sur le moteur, le courant monte mais beaucoup moins qu'en phase de démarrage. Puis phase de roue libre (Diode M1 et M5 passantes $V_{moteur} = -10V$ le courant diminue et s'annule. Puis moteur « comme en l'air », la tension à ses bornes est égale à la F_{cem} ici 8V.

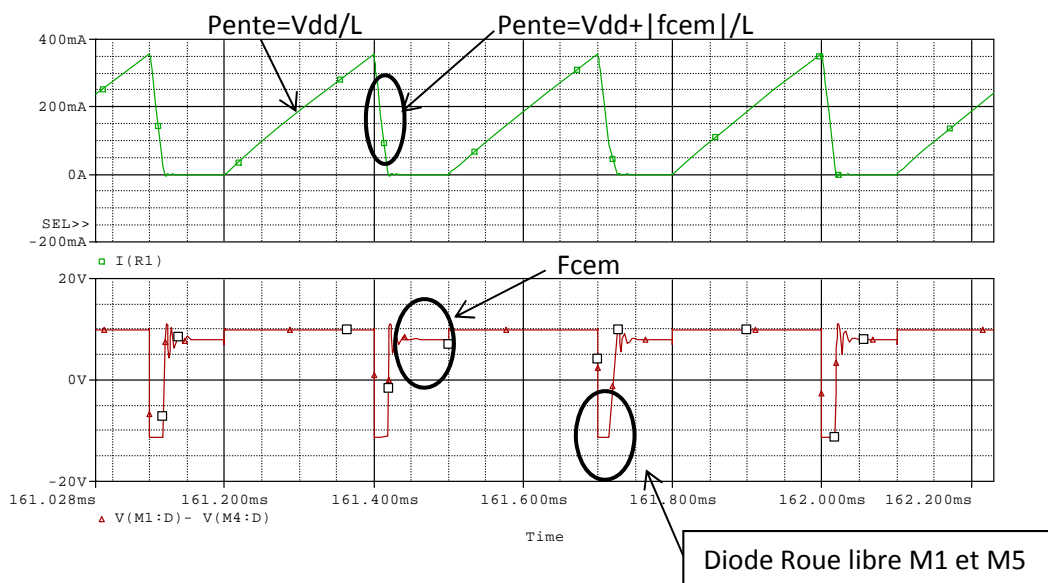


Figure 9 : zoom régime établi discontinu

Si on multiplie la fréquence de découpage par 10, le courant est lissé. Le courant ne s'annule pas et on ne voit plus la phase où la tension aux bornes du moteur est égale à la F_{cem} .

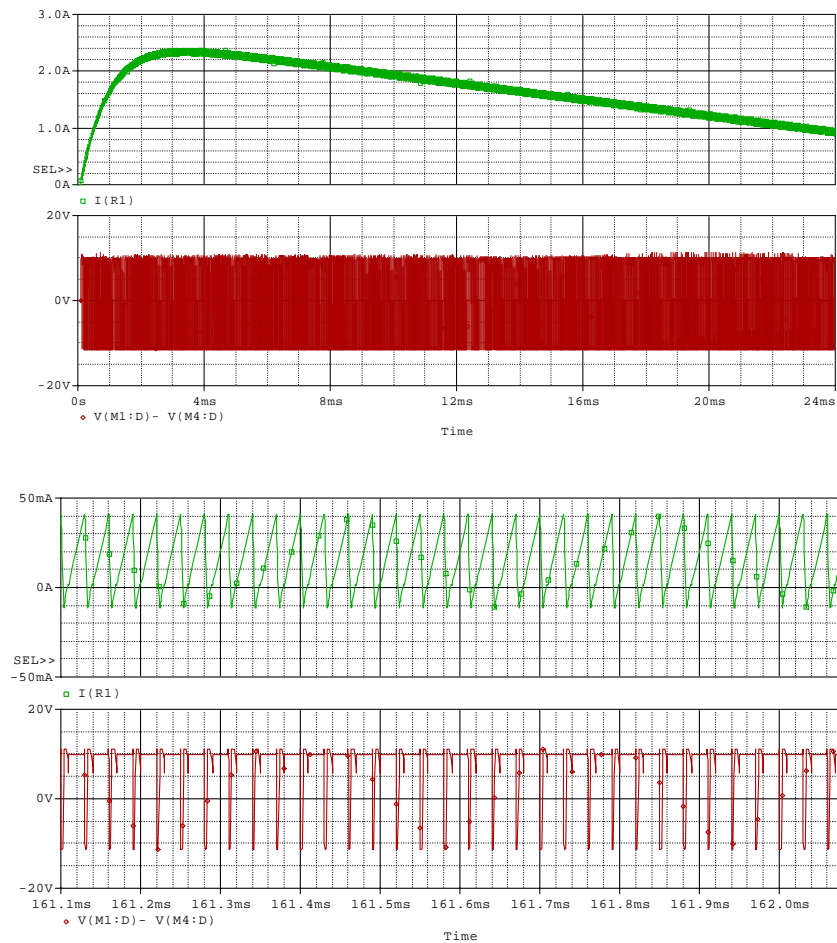


Figure 10 : Effet d'une fréquence de découpage supérieure

Si le rapport cyclique est $< 50\%$, on est forcément en régime discontinu : en effet, vis-à-vis du courant, au démarrage, la pente de descente est égale à celle de montée (car $f_{cem} = 0V$ au début), puis après, pente descendante supérieure à celle de montée car $f_{cem} > 0$, avec ce montage et quel que soit le moteur.

Par ailleurs, si la fréquence de découpage est trop élevée dès le démarrage, le courant n'a pas le temps de monter et donc le moteur risque de ne pas démarrer.

Par contre en mode continu, plus la fréquence de découpage est élevée plus l'ondulation de courant sera faible et donc le couple régulier.

Si la fréquence de découpage est trop faible le moteur va accélérer, puis ralentir à chaque cycle.

IL faut donc, pour bien démarrer, mettre un échelon au démarrage (simulé par les switch contrôle en temps (dans le schéma ci-dessous), pour laisser le temps au courant de monter puis découper a une fréquence assez rapide pour réduire l'ondulation.

Moteur voiture R=1ohm L=100uH piloté par pont selon fonctionnement carte driver DRI0008

simu démarrage et regime permanent

Les 2 MOS M4 et M6 sont actionnés en diagonale simultanément pour marche avant par exemple. Les deux autres sont bloqués.

Le moteurs voit donc au rythme de la PWM une tension appliquée +10V puis -10V

il y a un moment où les 4 MOS sont OFF en même temps. Alors, le courant "remonte" par les diodes de M1 et M2 pour continuité du courant dans le moteur. Pendant cette phase rouge libre, et selon les valeurs de L et R le courant moteur diminue et peut même s'annuler. Le moteur est alors comme "en l'air". A ce moment, la tension aux bornes du moteur est égale à la FCEM.

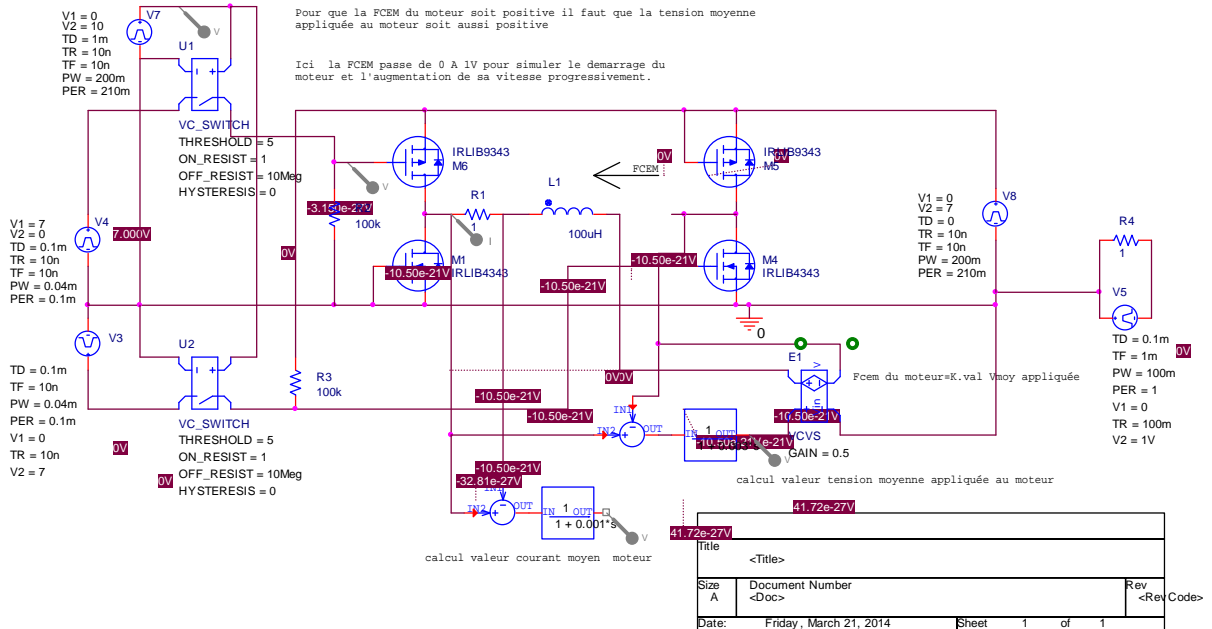


Figure 11 : Schéma de simulation amélioré

Les deux figures 12 et 13 ci-après sont obtenues avec échelon initial pour « bien démarrer », puis rapport cyclique 50%, avec inductance de lissage 1mH.

Courbe rouge, tension moyenne appliquée au moteur. Courbe bleue, courant moyen.

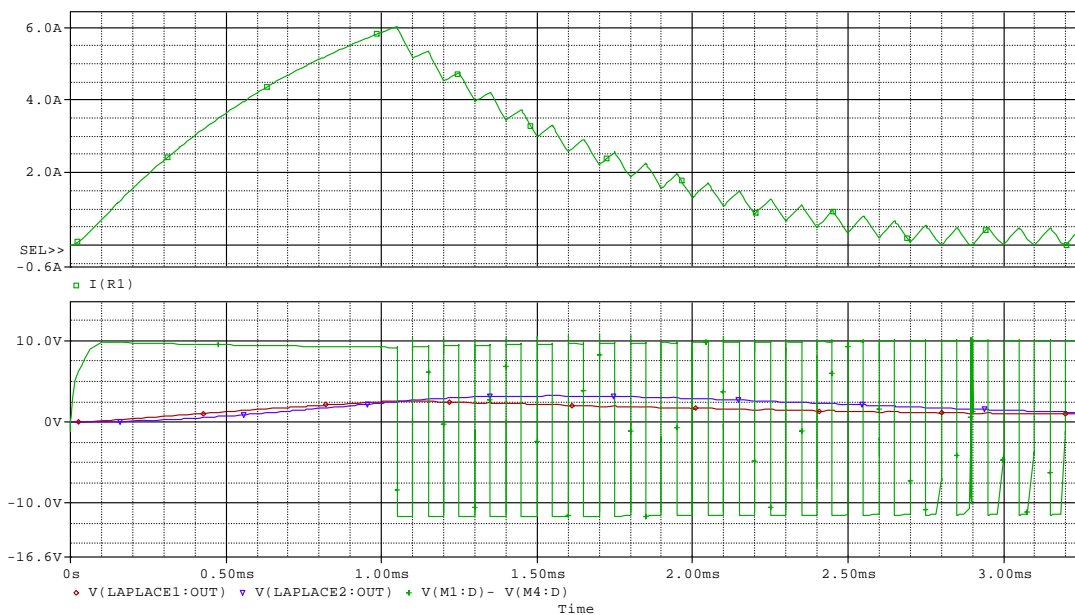


Figure 12 :

Régime permanent atteint avec grande f_{cem} (4V) => retour en discontinu après le démarrage.

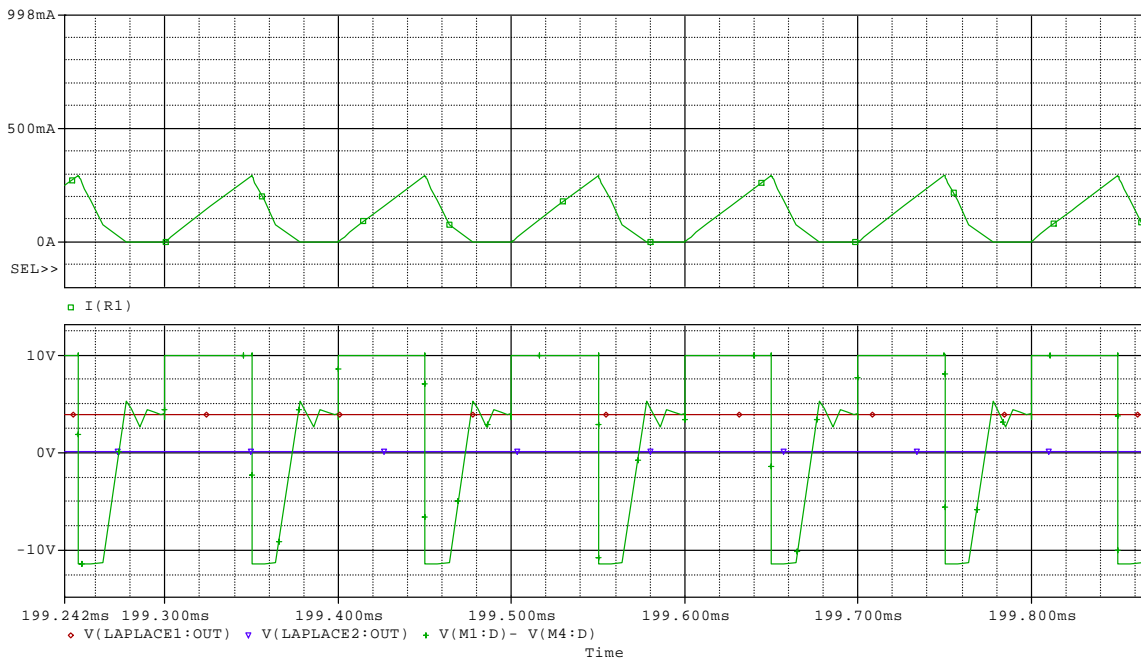


Figure 13 : En régime permanent, discontinu

Pour les simulations suivantes, on prend un rapport cyclique 2/3 et une F_{cem} finale plus faible (2V), inductance de lissage 1mH=>on reste en mode continu tout le temps cf. figures ci-après :

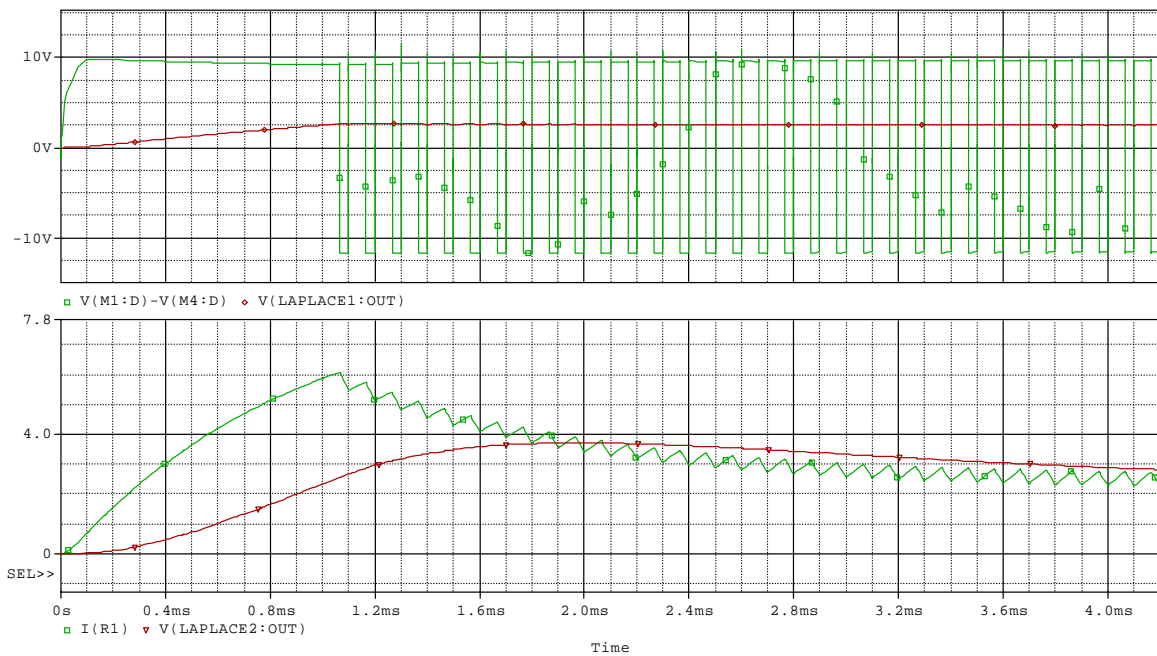


Figure 14 : Régime continu, démarrage

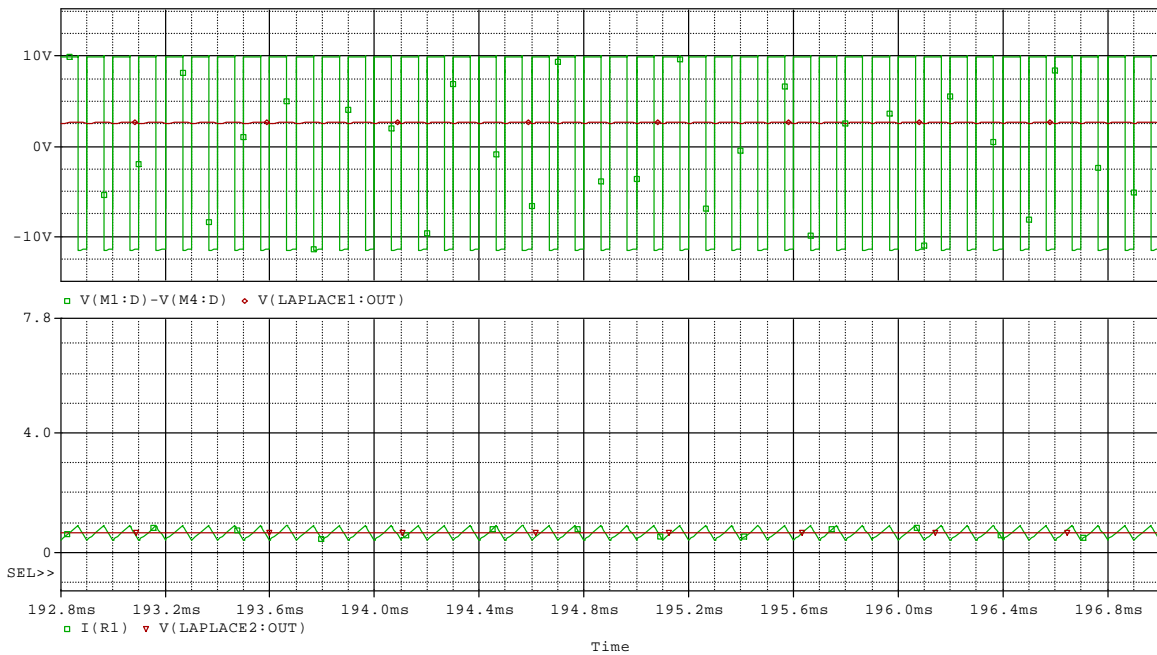


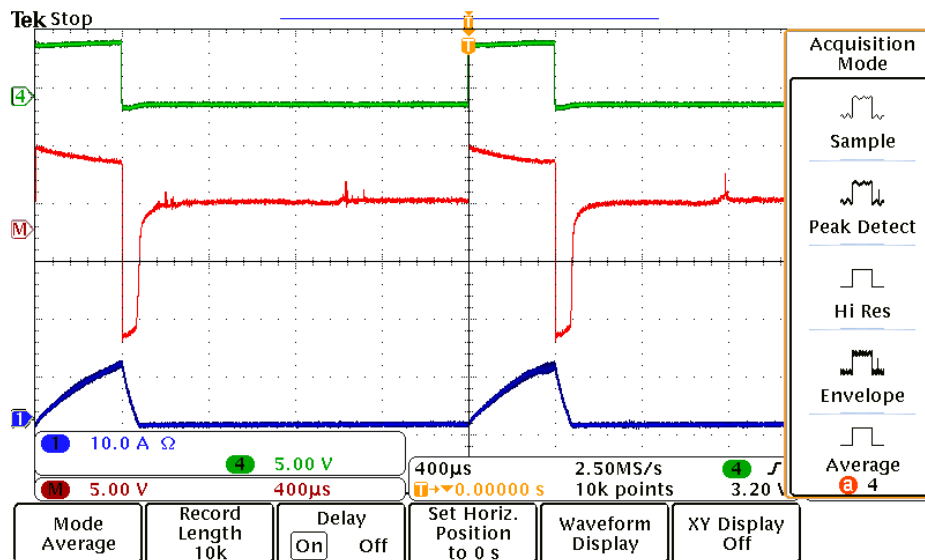
Figure 15 : Mode continu, régime permanent atteint

3. Relevés des formes d'ondes sur moteur CC 7.2V, 5A, voiture miniature électrique avec carte driver DRI 0008

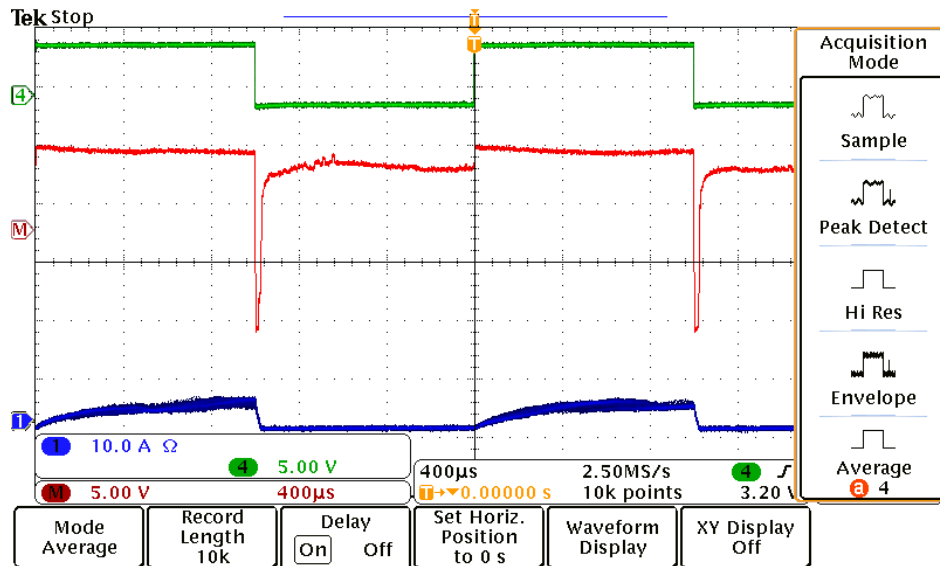
Trace verte : PWM 5V/div

Trace rouge : tension aux bornes du moteur 5V/div

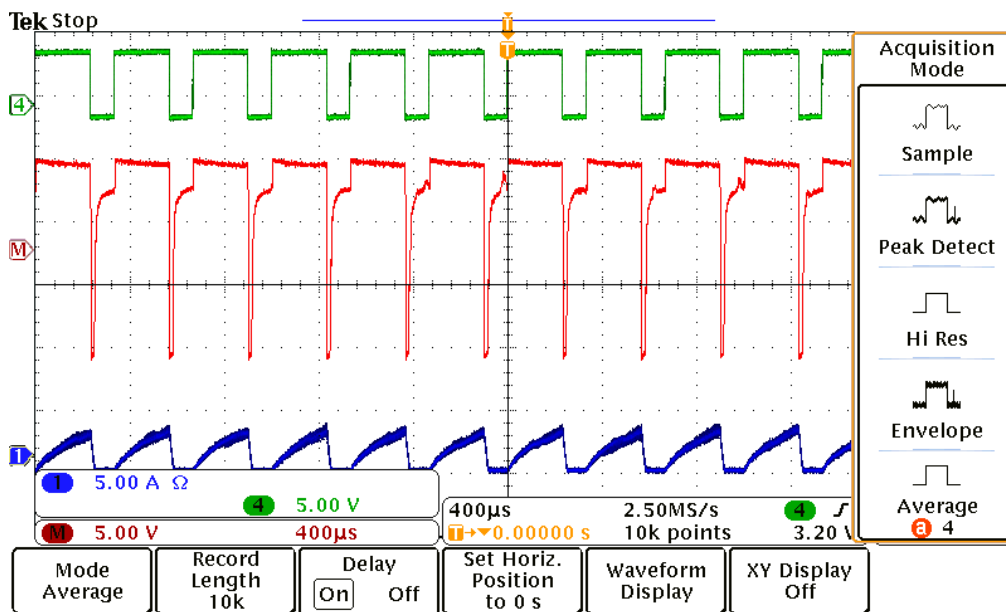
Trace bleue : courant



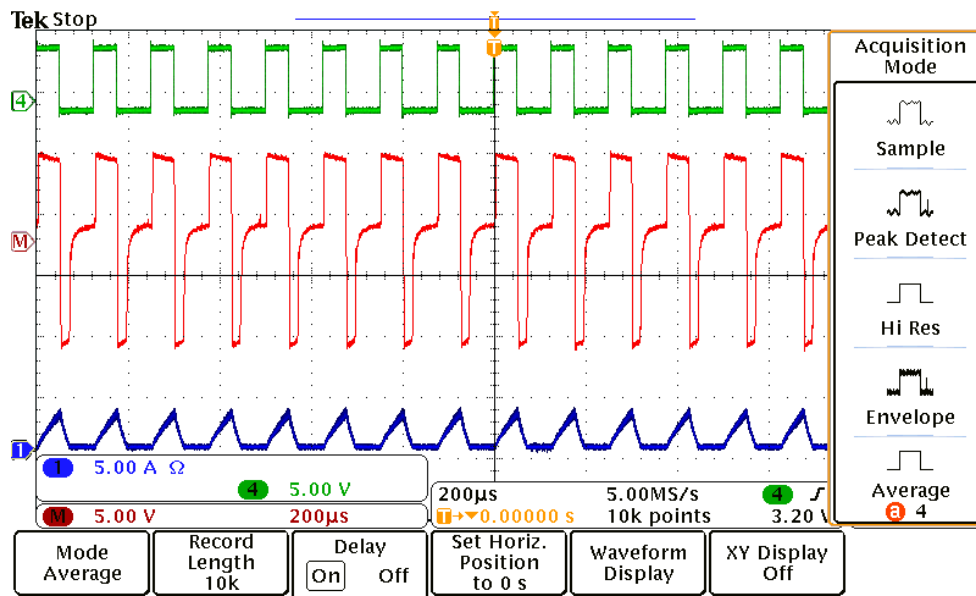
Courbe 1 : Fréq de découpage 500Hz, rapport cyclique 20%, moteur à vide => mode discontinu, la f_{cem} est visible sur le plateau intermédiaire (ici env. 2V), vitesse de rotation faible



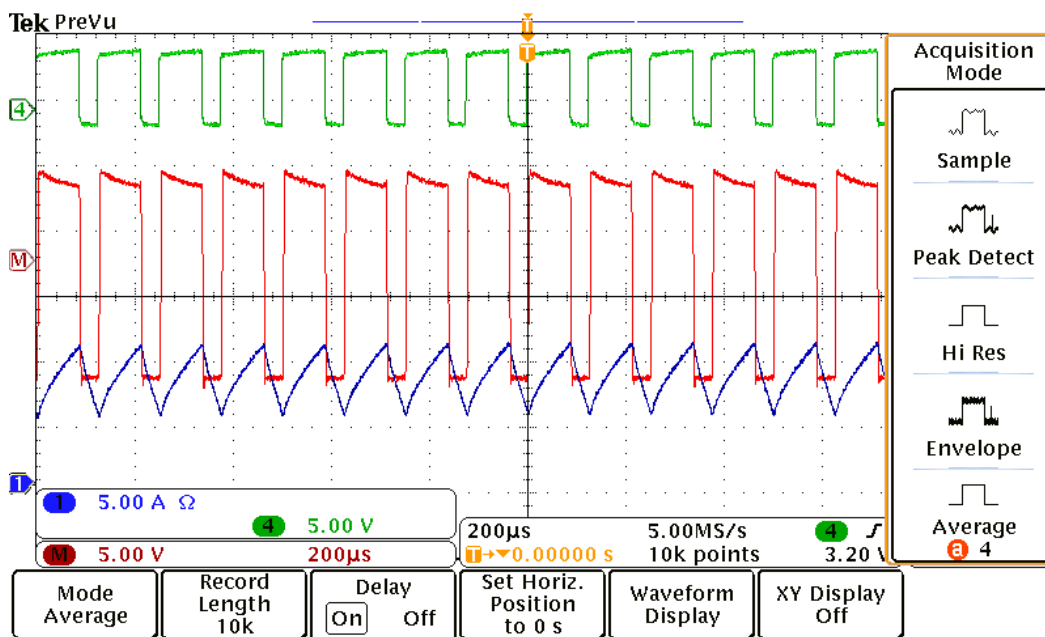
Courbe 2: Freq de découpage 500Hz, rapport 50% la f_{cem} augmente (ici env 5V) (vitesse de rotation +grande) toujours à vide =>courant plus faible que sur la courbe 1.



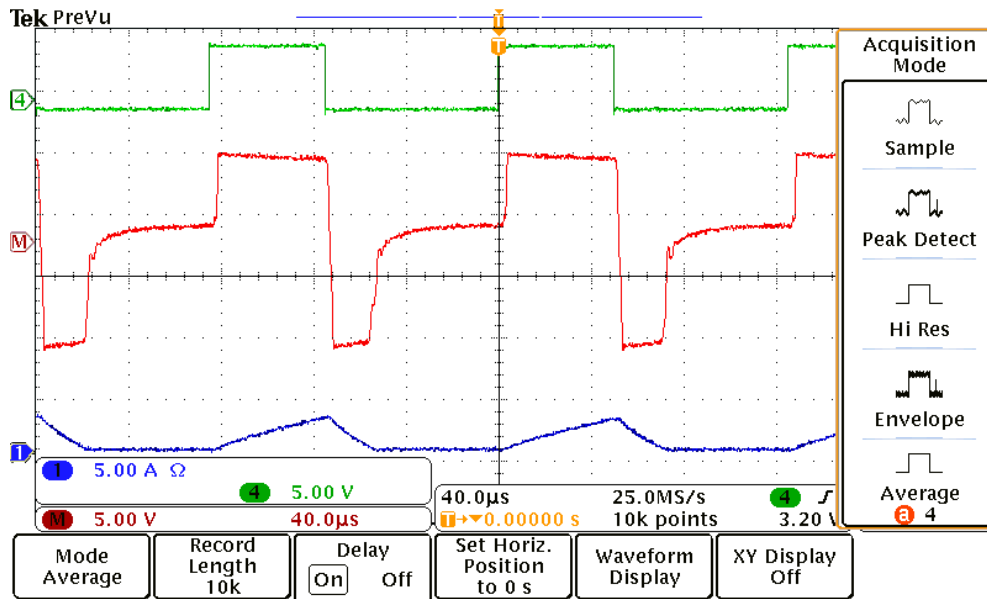
Courbe 3: Freq découpage 2 kHz, Rapport cyclique 60% toujours discontinu, la F_{cem} augmente encore un peu (5.5V), le courant baisse encore par rapport à la courbe 2.



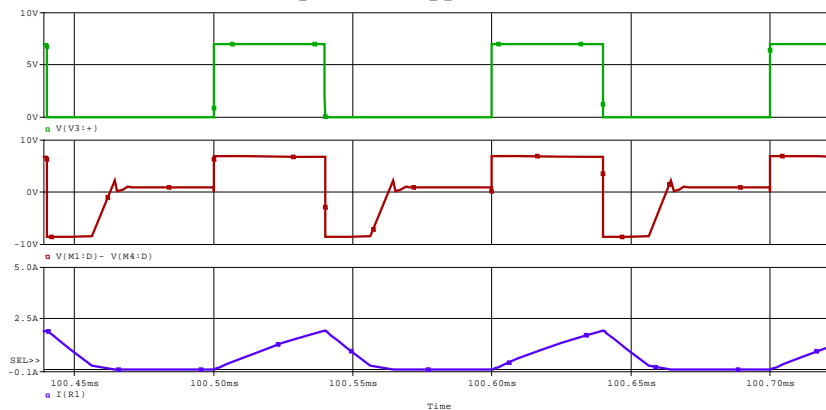
Courbe 4: Freq 10kHz : rapport cyclique 40%, mode discontinu (f_{cem} faible)



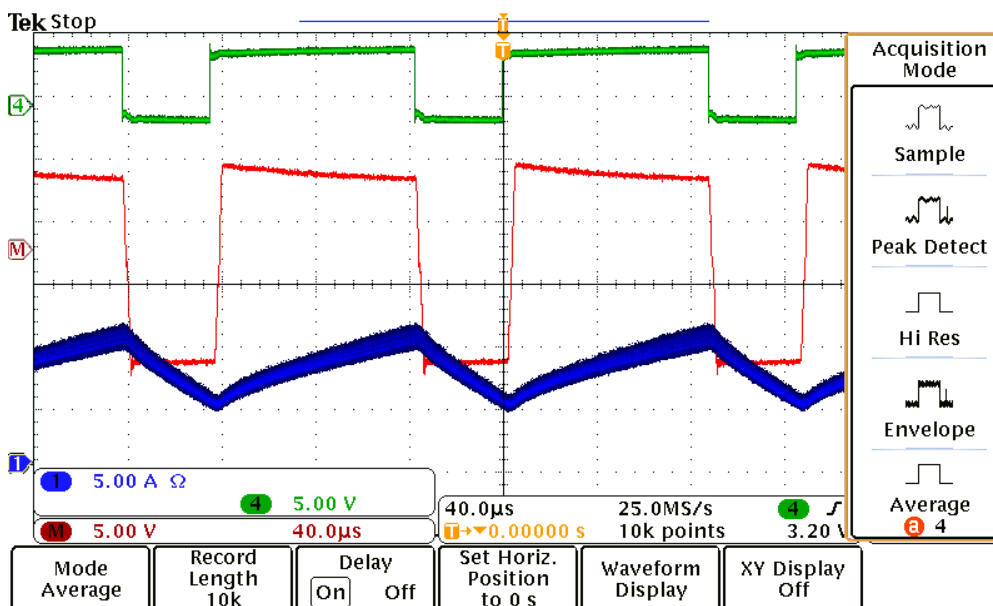
Courbe 5: Freq 10kHz, rapport 70%, mode continu (couple résistant qui ralentit les roues), on ne voit plus le plateau intermédiaire sur la courbe rouge correspondant à la f_{cem}. Le courant ne revient plus à zéro (mode continu).



Courbe 6 : Zoom de la courbe 4 sur Freq 10kHz, rapport 40%, mode discontinu >fcem faible



Courbe 6bis : comparaison simulation SPICE correspondante (cf. courbe 6)



Courbe 7 : Zoom de la courbe 5 Freq 10kHz, rapport 70% mode continu (couple résistant frottement sur les roues)

Conclusion :

- Conforme aux simulations SPICE
- En discontinu on voit le palier F_{cem} . Sur la courbe rouge, En continu ce palier n'apparaît plus.
- Si F augmente, l'ondulation diminue, mais difficulté de démarrer =>augmenter le rapport cyclique quand F augmente, pour pouvoir démarrer.

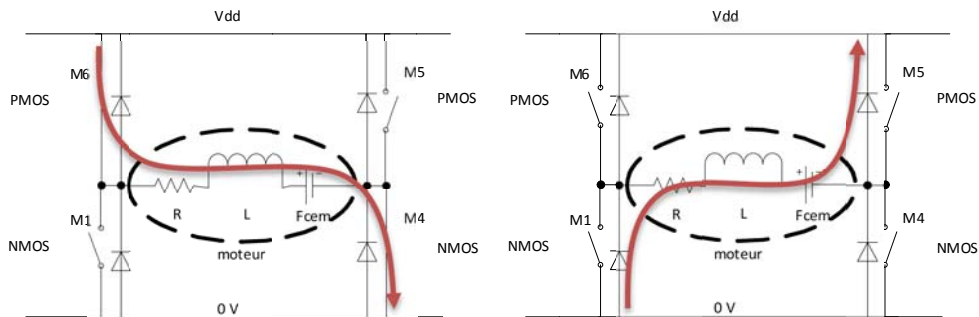
question : Quelle différence entre la commande PWM sur un seul MOS ou simultanée sur les 2 MOS ?

Les chronogrammes sont comparés pour un même rapport cyclique de 40% :

1° Marche avant : M1 et M2 « Off » PWM appliqué sur M6 et M4 simultanément.

Phase 1 : M6 et M4 « On »

Phase 2 : M6 et M4 « Off » roue libre M1 M5



Phase 3 (éventuelle si discontinu) : M6 et M4 « Off » une fois courant annulé, moteur « en l'air ».La tension au bornes du moteur est égale à la f_{cem} .

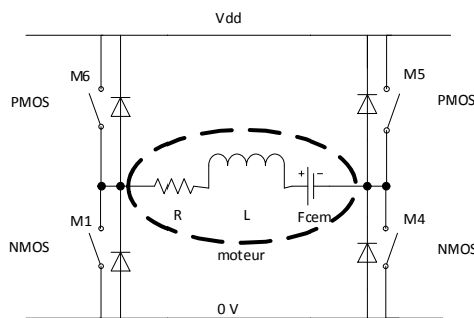


Figure 16 : 3 phases de fonctionnement

Marche avant : M1 et M2 « Off » PWM appliqué sur M6 et M4 simultanément

Avec PWM sur M4 et M6, le courant est discontinu, sa valeur moyenne plus faible et on voit le plateau f_{cem} apparaître.

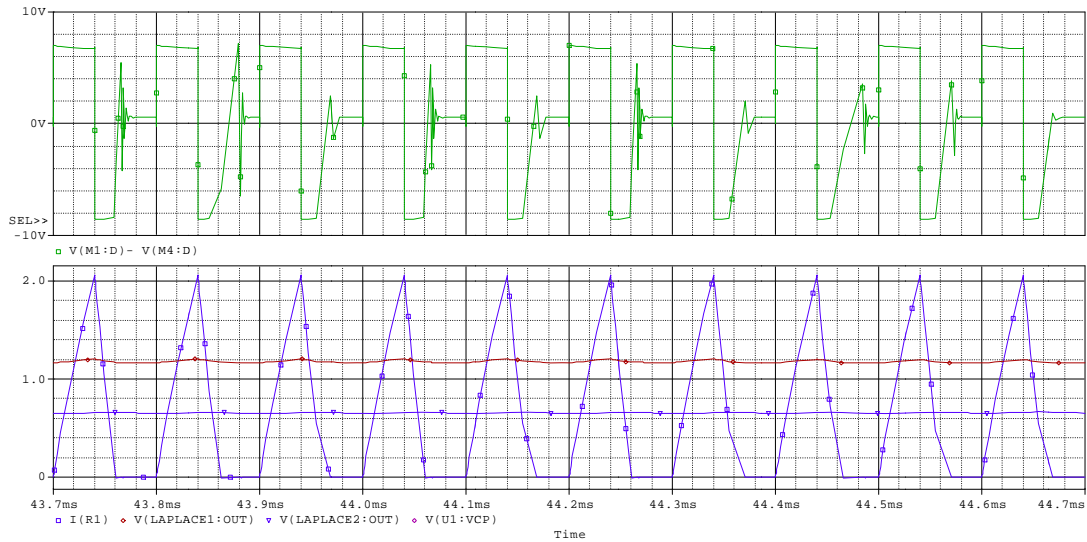


Figure 17: Tension aux bornes du moteur (vert), courant (bleu)

2° Marche avant : M1 et M2 « Off » PWM uniquement sur M4, M6 toujours passant.
La phase 2 devient comme indiqué figure 18 et il n'y a pas de phase 3 :

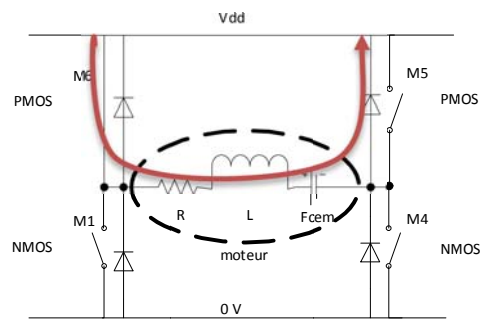


Figure 18 : phase 2

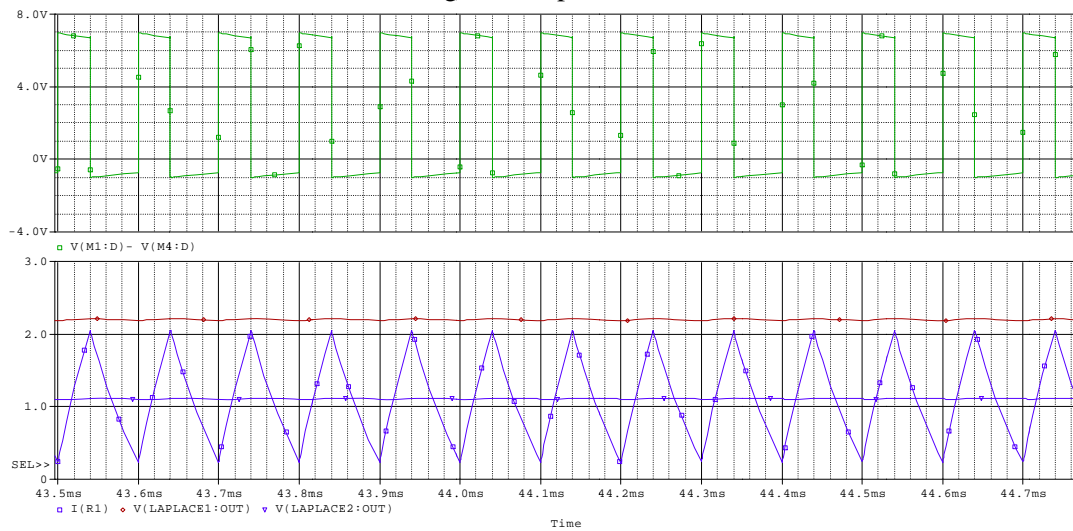


Figure 19 : Chronogramme tension (vert) et courant (bleu)

Avec seulement PWM sur M4 le courant est continu et la tension appliquée aux bornes du moteur fait des carrés 0V-Vdd à 1 vd près.

Conclusion: Lorsque le rapport cyclique augmente progressivement, le courant devient continu plus « rapidement » dans la configuration 2° « PWM appliqué sur M4 » que dans la configuration 1° ou les 2 MOS M4 et M6, sont commutés simultanément par la PWM.

Par contre, les MOS fonctionnent de façon identique dans le cas 1° et vieillissent donc de la même façon. Ca qui n'est pas le cas dans l'autre configuration. Cependant, je laisse aux spécialistes de la fiabilité le soin d'indiquer si cela peut ou non avoir un impact sur la durée de vie des composants.