

Etude des variateurs de courant, du type Boost, appliqués à la récupération d'énergie de freinage d'un véhicule

E. Hanitrarina^{1,2}, F. P. Andrinirinaimalaza^{1,2}, D. Maxwell¹, C. B. Andrianirina^{1,2}

¹ Institut Supérieur des Sciences et Technologies de l'Université de Mahajanga

² Laboratoire de Génie Electronique et Informatique, Institut Supérieur des Sciences et Technologies de l'Université de Mahajanga

Correspondant : philibert.andrinirinaimalaza@gmail.com

Résumé

Les flux d'énergie dans les systèmes de production d'énergie électrique font recours à diverses conversions énergétiques qui sont, pour la plupart, indispensables. La conversion continu-continu en fait partie. Souvent, cette conversion est assurée par des hacheurs : abaisseur (Buck), élévateur (Boost) ou abaisseur-élévateur (Buck-Boost). Dans la présente communication, on prend en considération l'utilisation des variateurs de courant, type boost. Ce sont des convertisseurs de l'électronique de puissance, souvent sollicités par divers domaines, y compris le domaine du transport. Avec l'apparition des véhicules électriques, ils se voient être parmi les éléments qui vont assurer le meilleur échange d'énergie de l'ensemble. Et surtout, son implication dans le freinage régénératif dudit véhicule est mise en exergue. En partant du concept de récupération d'énergie de freinage, on va relayer le type de convertisseur utilisé, souvent réversible en courant. Et sans entrer dans le détail, le schéma bloc du véhicule électrique étudié, muni du différentiel électronique est illustré. Les résultats obtenus lors de la simulation sous Matlab/Simulink démontrent bien la faisabilité de la récupération d'énergie de freinage.

Mots clés : Variateurs de courant, Boost, Freinage régénératif, Gestion énergétique, Véhicule

1. Introduction

D'une part, depuis plusieurs années, le prix du pétrole n'a cessé de se fluctuer. Sa raréfaction et les méfaits des gaz néfastes à l'environnement ont déclenché une partie des récentes études sur notre système de transport. Une prise de conscience collective a entraîné des réglementations toujours plus strictes sur les émissions de polluantes et la consommation des véhicules, qui sont ainsi devenues deux critères primordiaux pour la conception de nouveaux véhicules. Les pollutions sonores et gaz à effet de serre ainsi qu'une consommation de carburant en constante augmentation, impliquent de plus en plus cet objet de consommation au cœur des débats autour de l'énergie [1], [2], [3]. De plus, les excessives utilisations des véhicules font partie des facteurs de la prolifération de la pollution atmosphérique. Cette dernière favorise l'accroissement du réchauffement climatique.

Pour répondre au défi d'une réduction encore accrue des consommations et émissions, l'industrie automobile d'aujourd'hui s'est tournée vers les véhicules électriques et/ou hybrides. Lors de la présente communication, seuls, les véhicules électriques sont considérés, vu qu'on n'utilise qu'une seule source de tension via un système de puissance électrique [4], [5]. Cette dernière est reliée à l'ensemble par un système de conversion continu-continu assurant le maintien constamment de la tension du bus continu et surtout la bonne gestion des flux d'énergie du véhicule [6], [7].

D'autre part, la présence de une ou plusieurs motorisations électriques, avec ses systèmes de conversion d'énergie, dans ces types de véhicules rend possible la récupération des énergies lors de leurs freinages [8], [9].

C'est pourquoi, on va faire une étude des variateurs de courant, du type Boost, appliqués à la récupération d'énergie de freinage d'un véhicule.

En passant par une brève présentation des différents types de freinages (mécanique et électrique), il est nécessaire de connaître le genre d'énergie pouvant être récupérée. Pour ce faire, le mécanisme assurant la récupération d'énergie de freinage propose une meilleure description de la réversibilité en courant du convertisseur Boost étudié. Les résultats et discussions sur les simulations vont être présentés afin de quantifier l'énergie de freinage restitué.

2. Méthodes et matériels

Quels que soient le système de freinage et son emploi, un frein absorbe une énergie mécanique extérieure pouvant être soit une énergie potentielle due à la gravité (cas des appareils de levage), soit une énergie cinétique (cas des véhicules), soit les deux à la fois (cas, par exemple, d'un véhicule lancé abordant une descente). L'énergie mécanique absorbée est restituée par le frein sous une autre forme qui dépend du système de freinage considéré.

2.1 Freinage des véhicules

Par définition un équipement de freinage est ensemble des dispositifs de freinage équipant un véhicule et qui ont pour fonction de diminuer ou d'annuler sa vitesse ou de le maintenir immobile s'il se trouve déjà à l'arrêt [1]. Freiner, c'est absorber de l'énergie du système mécanique. Selon l'utilisation faite de cette énergie absorbée, on distingue plusieurs types de freinages : le freinage mécanique et le freinage électrique.

2.1.1 Freinage mécanique

Son fonctionnement repose sur la dissipation de l'énergie cinétique du véhicule en énergie thermique.

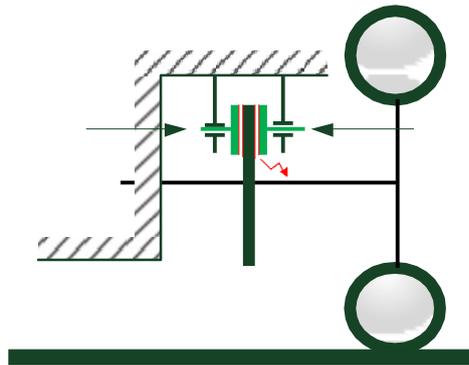


Figure 1 : Principe du freinage mécanique

Le frottement de pièces mobiles (rotors) sur des pièces fixes (stators) est généralement utilisé. Le frein est donc un système d'absorption de chaleur. Son efficacité est liée à la capacité de ses constituants d'absorber de la chaleur et d'y résister, et au coefficient de frottement entre eux.

2.1.2 Freinage électrique

Lors d'un freinage électrique, l'énergie cinétique de la partie en mouvement est convertie en énergie électrique qui peut être dissipée en chaleur dans une résistance ou alternativement, réinjecté dans leur source (régénération). A noter que le freinage électrique ne peut pas assurer l'immobilisation du moteur (du système), pour cela, il on faut de frein mécanique. Pourtant, les principaux avantages d'utilisation de freinage électrique sont de réduire l'usure du frein mécanique et ainsi de pouvoir récupérer l'énergie cinétique [4].

Un procédé pour freiner un moteur électrique, c'est d'inverser le sens du courant de l'excitation (pour le moteur à courant continu à excitation séparée), d'intervertir deux fils du trois phases (pour le moteur triphasé) ou d'inverser la tension d'alimentation (pour le moteur à courant continu à aimants permanents).

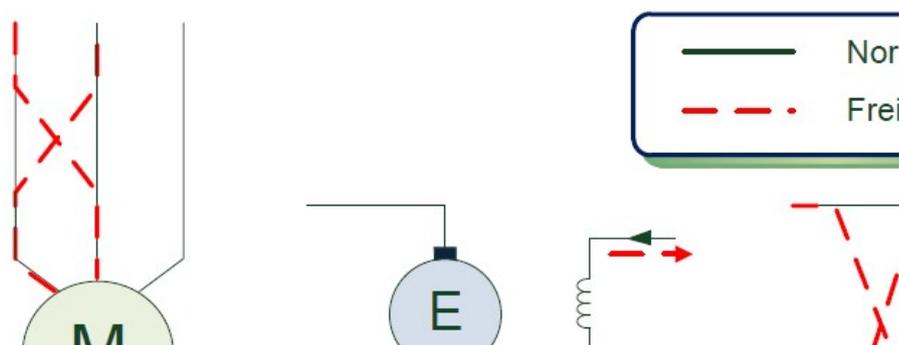


Figure 2 : Principe de freinage de moteur électrique

Les freins constituent un organe de sécurité important :

- sur les véhicules, ils permettent de réguler la vitesse, et de s'arrêter, donc notamment d'éviter une collision (freinage d'urgence)
- sur les machines ayant des pièces en mouvement, la gestion du mouvement est un élément important du travail de la machine.

2.2 Récupération d'énergie de freinage

2.2.1 Energie de freinage

L'énergie cinétique (de freinage) est l'énergie que possède un corps du fait de son mouvement par rapport à un référentiel donné. Pour un point matériel, l'énergie cinétique est égale au travail des forces appliquées nécessaires pour faire passer le dit corps du repos à son mouvement [2], [3], [5].

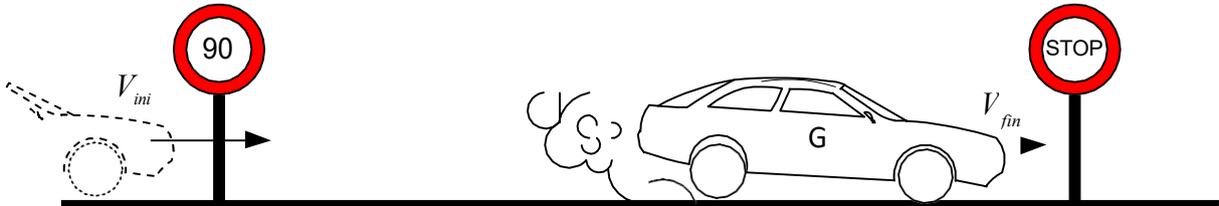


Figure 3 : Illustration de freinage

Cette énergie a pour expression :

$$E_c = \frac{1}{2} m V_x^2 \quad (1)$$

L'énergie cinétique récupérable est la différence entre l'énergie initiale, c'est-à-dire l'énergie au point de décélération, et l'énergie finale.

$$E_{CR} = \Delta E_C = E_{C_{fin}} - E_{C_{ini}} = \frac{1}{2} m (V_{x_{fin}}^2 - V_{x_{ini}}^2) \quad (2)$$

2.2.2 Principe de la récupération de cette énergie

Lorsque l'on relâche la pédale d'accélérateur, le moteur ne fournit plus d'énergie au véhicule.

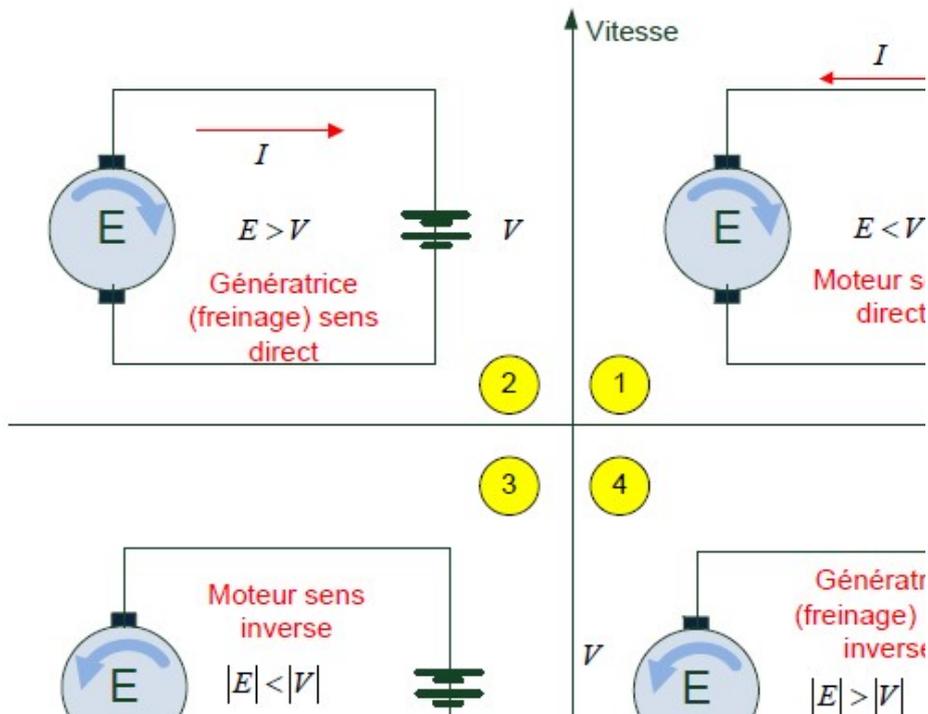


Figure 4 : Fonctionnement à quatre quadrants d'un moteur

C'est l'énergie cinétique qui continue à le faire avancer. Pour freiner, il faut convertir cette énergie cinétique en une autre forme d'énergie, ici en énergie électrique.

Pour cela, on exploite la réversibilité de la chaîne d'énergie électrique en faisant fonctionner les moteurs en mode générateurs (2ème quadrant, figure 4). Lors d'une descente, la vitesse du véhicule augmente, afin de garder cette vitesse constante, on a intérêt à récupérer aussi l'énergie qui la causé. Il s'agit ici de l'énergie potentielle.

C'est là qu'intervient le variateur de courant du type Boost, bien sûr, réversible en courant.

2.3 Modélisation et commande d'un convertisseur de courant, type Boost

2.3.1 Hacheur Boost

Appelé aussi « hacheur parallèle ou hacheur élévateur ou hacheur survolteur », son circuit électrique est donné par la figure 5. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive) [6], [9].

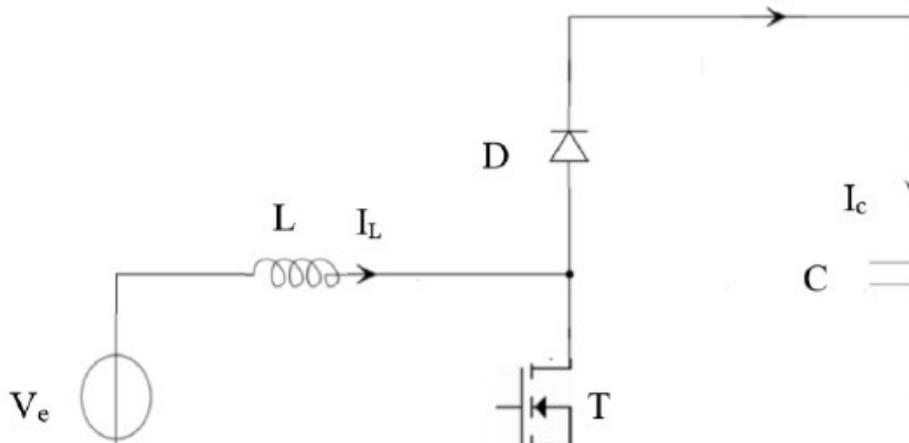


Figure 5 : Convertisseur de courant, type Boost

Le transistor T est fermé pendant la fraction αT de la période de commutation T.

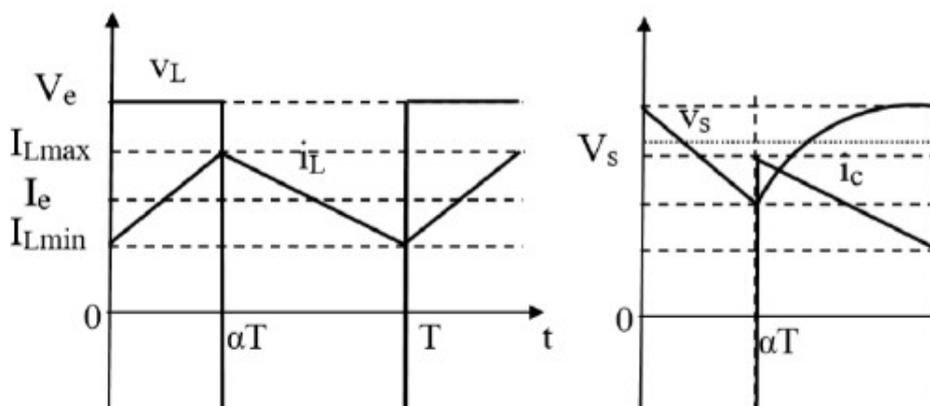


Figure 6 : Formes d'ondes d'un hacheur Boost

L'énergie est stockée dans l'inductance L, la charge est déconnectée du montage (diode D bloquée). Lors du blocage du transistor, l'énergie emmagasinée dans l'inductance est déchargée dans le condensateur et la résistance de charge.

En mode de conduction continue, on a les formes d'ondes de courant et de tension de la figure 6. On déduit de cette figure la tension de sortie en valeur moyenne :

$$V_s = \frac{1}{1-\alpha} V_e \quad (3)$$

Le rapport cyclique α étant compris entre 0 et 1, la tension de sortie moyenne peut varier de V_e et plus.

2.3.2 Réversibilité en courant de ce hacheur

Dans un tel système, le changement du sens de parcours de l'énergie est lié au changement de signe du courant alors que la tension reste constante, voir figure 7.

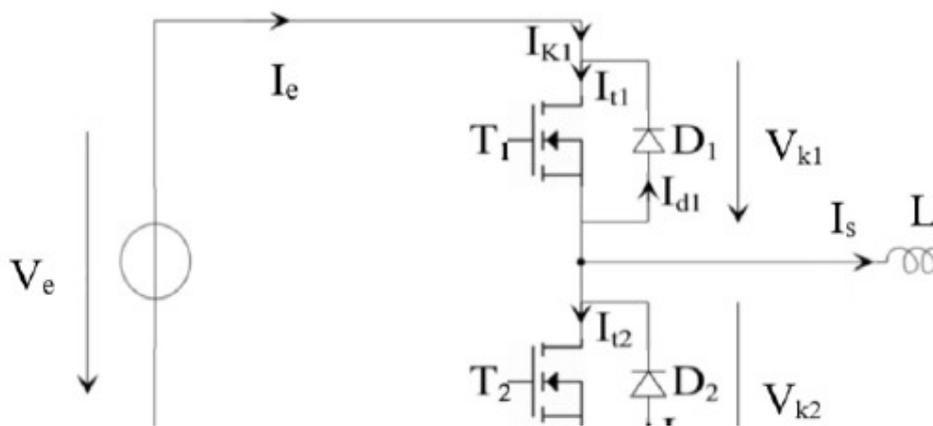


Figure 7 : Réversibilité en courant du convertisseur

Le courant I_s en sortie peut changer de signe lors d'une période de commutation, ce qui sollicite la conduction séquentielle de chacun des quatre interrupteurs.

2.4 Structure générale du modèle de véhicule considéré

La simulation, de l'ensemble des composants qui composent électriquement le véhicule et un système générant le couple résistant (capteur), est compliquée. La figure 8 représente un schéma bloc simplifié du système à étudier [7], [8].

Le bloc consigne de vitesse et de l'angle de braquage donne la référence générale du véhicule, c'est-à-dire la vitesse voulue et le braquage du volant. Le bloc différentiel électronique intègre le calcul des consignes de vitesse des deux moteurs et de la synchronisation.

Chaque bloc système est composé par le contrôleur, l'onduleur et le moteur. Et le capteur, à partir de la mesure de vitesse de rotation de chaque moteur, on estime la puissance de traction et la vitesse longitudinale du véhicule. En connaissant ces valeurs, on peut aussi estimer les couples résistants.

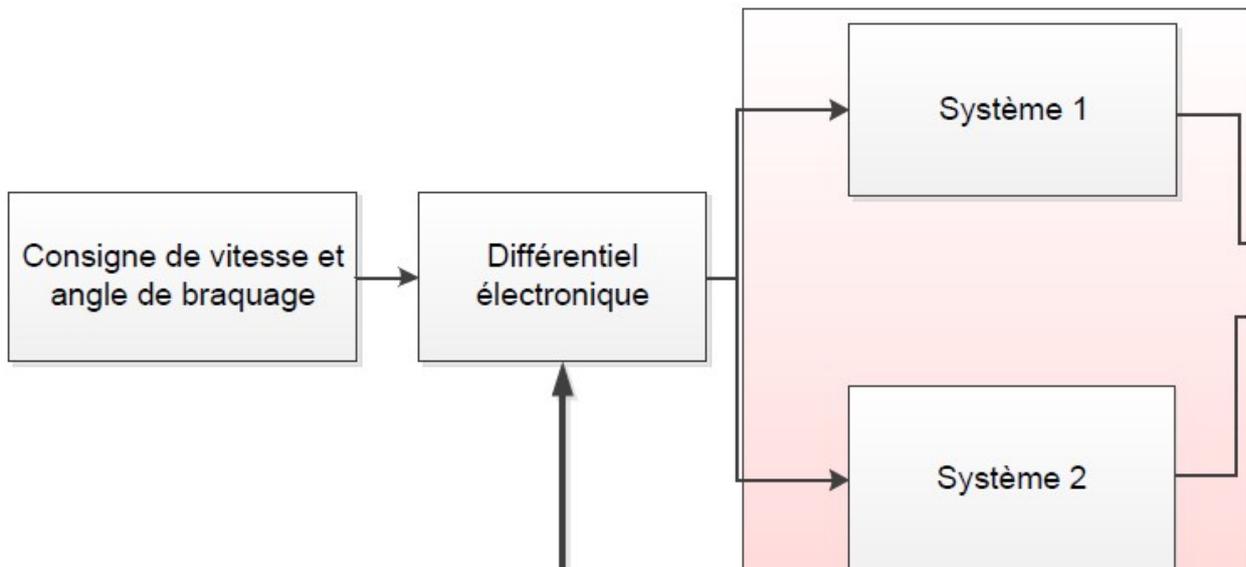


Figure 8 : Configuration simplifiée du système considéré

3. Résultats et discussions

Sous Matlab/Simulink, le modèle de la figure 9 ci-après a été pris en compte.

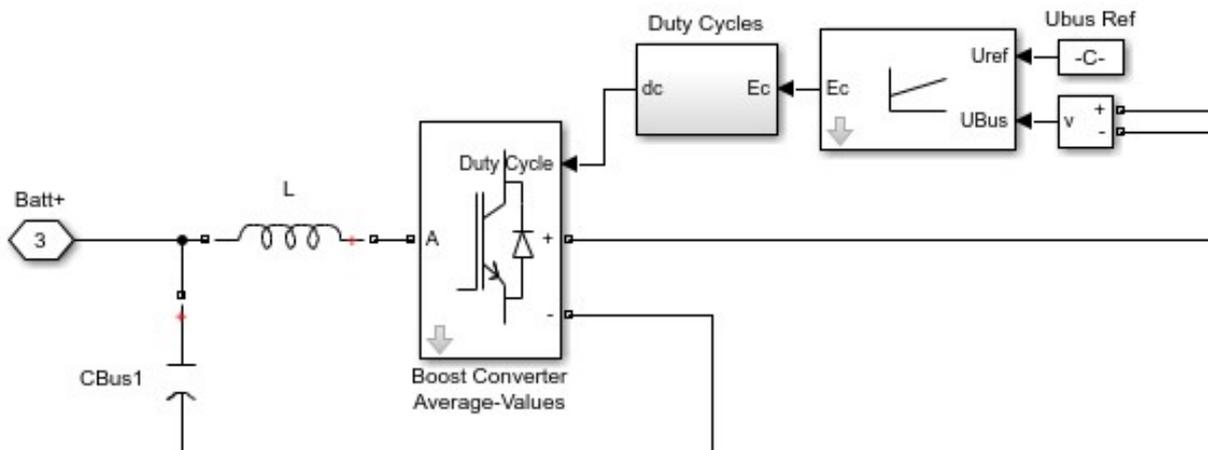


Figure 9 : Modèle Simulink des éléments de réglage et de commande du convertisseur Boost

3.1 Vitesse de rotation des moteurs et vitesse longitudinale de l'ensemble

Pour la simulation de l'ensemble, au départ, le consigne de vitesse est au 50% de l'accélérateur et on augmente linéairement ce vitesse jusqu'à 100% avec $t_{acc} = 0,8s$. A partir ce cet instant, on maintient la vitesse jusqu'à $t_2 = 1,4s$; pour parcourir un virage, on rétrograde à 80%; à cette vitesse on braque d'un angle $\delta = 5,1566^\circ$ à gauche soit un virage de rayon $R = 20,57m$, figure 8, jusqu'à et on revient à $t_3 = 1,8s$, un parcours droit. Pendant le braquage, on constate l'effet du différentiel.

Sur la figure 10, on voit que la référence de vitesse du premier moteur diminue et symétriquement l'autre augmente par rapport à la consigne de vitesse générale.

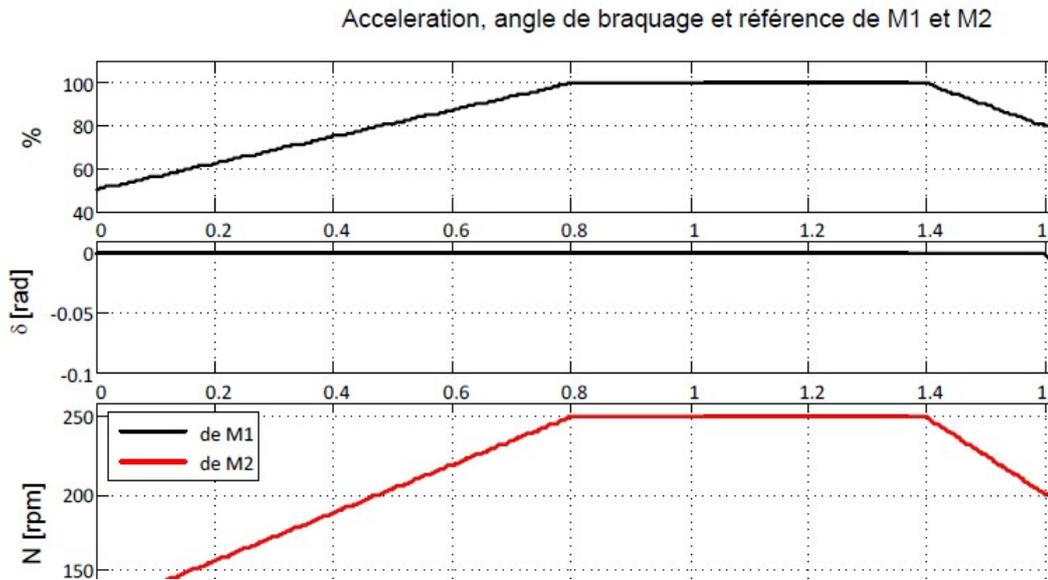


Figure 10 : Les consignes et références

La différence de vitesse est $\Delta\omega = 5,24 \text{ rad/s}$ (l'équivalent de 50 rpm). Les vitesses de rotation, illustré à la figure 11, de chaque machine suivent bien les références qui ont été imposées. A l'instant de la décélération (ou freinage), il y a un peu de retard (négligeable) et ensuite les vitesses des moteurs diminuent jusqu'à ce prochaine référence.

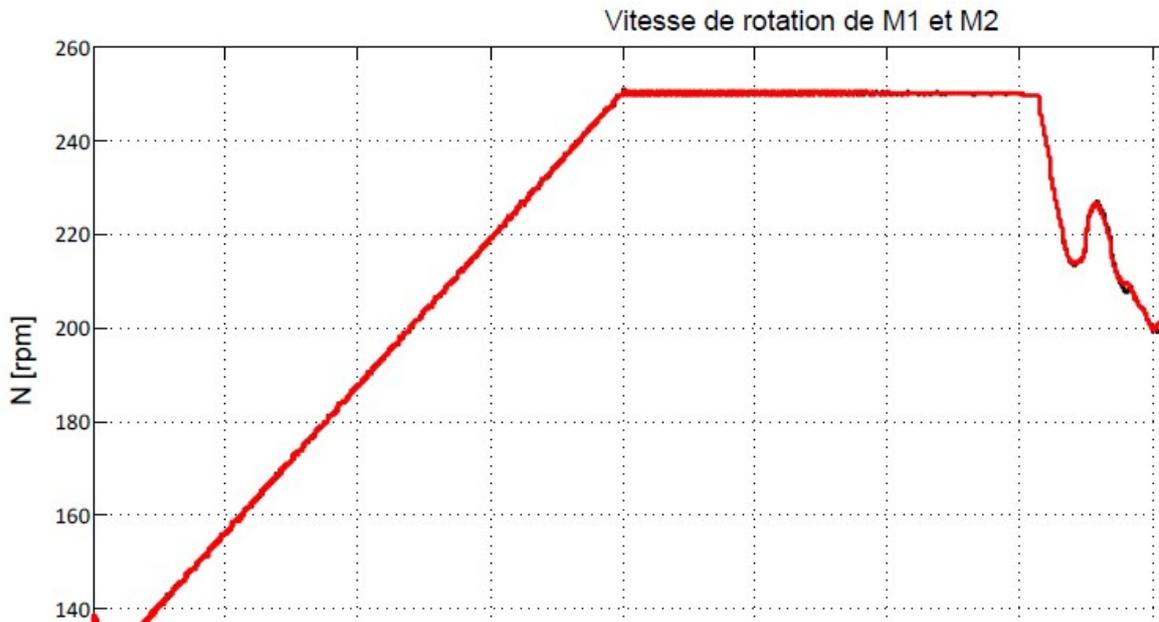


Figure 11 : Allures des vitesses de rotation des moteurs

Une remarquable réponse de vitesse inattendue est apparue lors du point maximal de braquage, un saut brusque de vitesse.

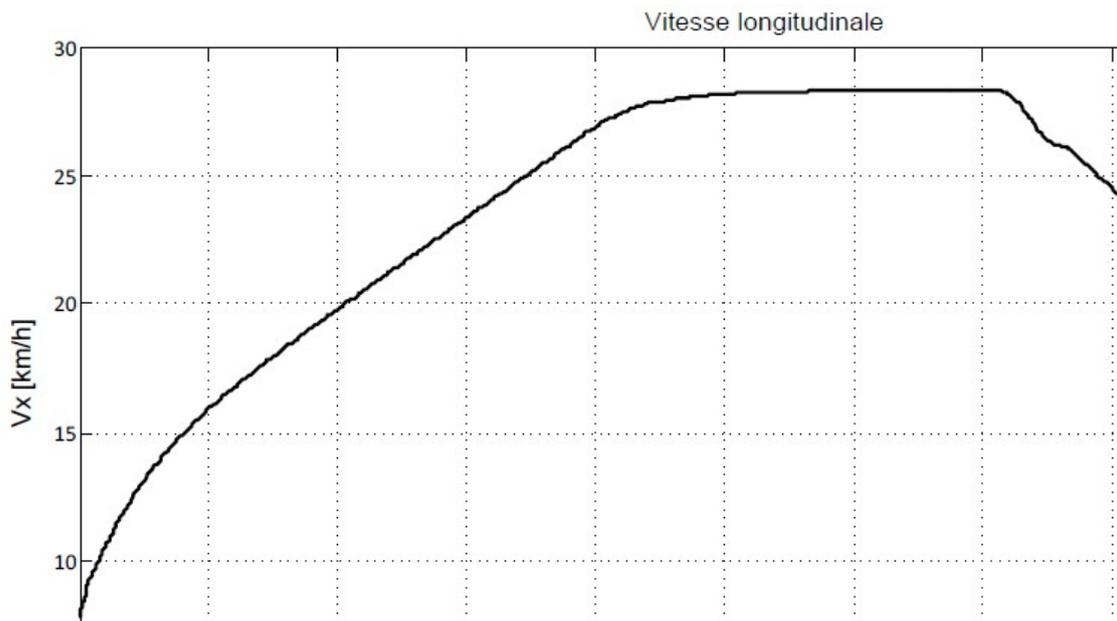


Figure 12 : Vitesse longitudinale de l'ensemble

L'accélération totale du véhicule a permis de rouler à une vitesse $V_x = 28,27 \text{ km/h}$. Pour une roue de rayon $R_r = 0,3 \text{ m}$. La différence entre la vitesse de deux roues n'a pas d'influence sur la vitesse longitudinale du véhicule.

3.2 Puissance de traction

La puissance de traction est calculée à partir de la vitesse longitudinale, à partir de la simulation

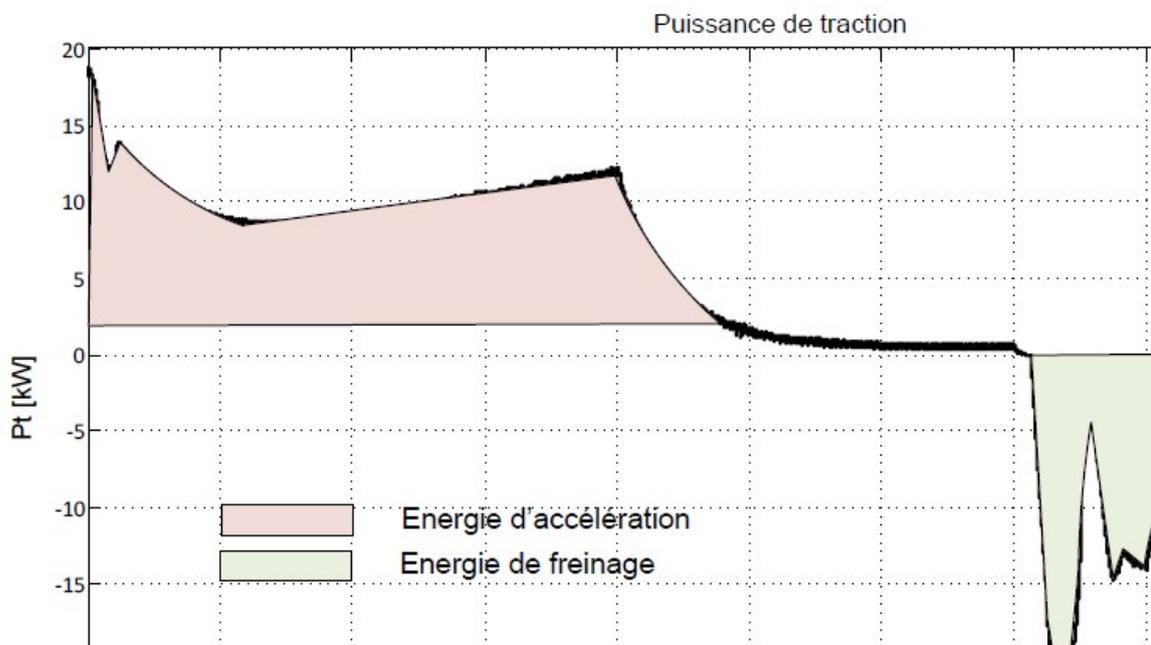


Figure 13 : Puissance de traction du véhicule

du système complet, on essaye de faire une autre simulation pour avoir la connaissance de caractéristique de l'accélération ou de décélération.

La puissance de traction résultant (ou mesuré) semble impossible pour la traction du véhicule, parce qu'il atteint une valeur maximale $P_{\max} = 18kW$ au démarrage du système. Et pendant la phase d'accélération il est à l'entour de $P_{\max} = 10kW$. Ces valeurs ne sont pas impossibles mais juste, en effet, la présence de la force d'inertie du système qui est très importante lors d'une phase d'accélération, variation de vitesse qui est en courte durée. A vitesse stabilisée, la puissance demandée rejoint sa valeur normale

Pendant une pendant de décélération brusque, en court temps, le pic de puissance récupérable atteint aussi une valeur très important $P_{r\max} = 24kW$ et l'énergie récupérable pendant ce temps est estimé à $E_r \approx 3,2398.10^3 J$, cette énergie doit être limitée pour n'est pas détériorer les systèmes. Alors on doit avoir un autre système évacuateur de pas détériorer les systèmes. Alors on doit avoir un autre système évacuateur de cette énergie dès que les batteries sont chargées, ou utiliser un frein mécanique en cas de freinage brusque. Les freinages d'urgence et de stationnement ne peuvent pas être garantis par le système de freinage par récupération.

4. Conclusion

L'objectif de cette communication est de situer la place des convertisseurs de courant, Boost, dans la mise en œuvre d'un freinage régénératif. La réversibilité du hacheur est assurée par la commande par modulation de largeur d'impulsion. L'utilisation de régulateur PI (Proportionnel-Intégral) a été prise en compte pour le maintien de la stabilité de la tension au niveau du bus continu du véhicule électrique.

Bibliographie

- [1] Christophe ESPANET, « Modélisation et conception optimale de moteurs sans balais à structure inversée, Application au moteur-Roue, » Université de FRANCHE-COMTE
- [2] Loïc BOULON, « Modélisation multiphysique des éléments de stockage et de conversion d'énergie pour les véhicules électriques hybrides », Université des Sciences et Technologies de Lille, 2009
- [3] The Dung NGUYEN, « Etude de stratégies de modulation pour onduleur triphasé dédiées à la réduction des perturbations du bus continu en environnement embarqué », Laboratoire d'Electromécanique, Université de Technologie de Compiègne,
- [4] Boualem BADJI, « Caractérisation du comportement non linéaire en dynamique du véhicule », Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2009
- [5] Andrian CIOCAN, « Contribution à l'analyse et à la commande du véhicule automobile », Thèse de doctorat, Université de Picardie Jule Verne-Amiens, 2005
- [6] Frédéric GILLON, « Modélisation et optimisation par plans d'expériences d'un moteur à commutations électroniques », Thèse de doctorat, Université de Lille, 1997

- [7] Aïman NOUH, « Contribution au développement d'un simulateur pour les véhicules électriques routiers », Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard
- [8] F. Philibert Andrinirinaimalaza, « Contribution à l'optimisation du rendement énergétique d'un véhicule électrique alimenté hybride », Thèse de doctorat, Université d'Antsiranana, 2020.
- [9] Damien PAIRE, « Dimensionnement et gestion d'énergie de systèmes d'entraînements électriques hybrides : Application à un ascenseur avec récupération d'énergie », Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2010.