

Gestion et dimensionnement de l'énergie embarquée pour un véhicule électrique à faible consommation

Arnaud Sivert, Franck Betin, Sebastien Carriere, Amine Yazidi : arnaud.sivert@iut.u-picardie.fr
 U.P.J.V Université de Picardie Jules Verne,
 Laboratoire des Technologies innovantes (L.T.I), équipe Énergie Électrique et Systèmes Associés (EESA)
 Institut Universitaire de Technologie de l'Aisne GEII, 02880 SOISSONS

RESUME – Pour réaliser un véhicule électrique à faible consommation d'énergie, un compromis difficile doit être trouvé entre le poids, la puissance, l'autonomie et le prix. Ces véhicules ont pu être réalisés grâce aux nouveaux matériaux composites et aux nouvelles batteries li-po. Mais, pour augmenter la durée de vie des batteries qui peut représenter 35% du prix du véhicule électrique, ce document démontre les avantages d'une commande à puissance constante pour le moteur, par rapport à une commande à couple constant. Cet article exposera une gestion et l'utilisation de super condensateurs pour diminuer la sollicitation du taux de décharge de la batterie sur un véhicule. Enfin, une comparaison du prix de l'énergie entre différents types de cycles motorisés électriques (vélo droit, tricycle caréné, Twizy) sera présentée en synthèse en fonction de la masse et de son aérodynamisme. Cette comparaison permet de dimensionner l'accumulateur et de déterminer l'autonomie du véhicule.

Mots-clés—commande de moteur à puissance constante, accumulateur, contrôleur de vitesse, conversion de l'énergie électrique, super condensateur, gestion de stockage de l'énergie, véhicule électrique, cycle motorisé électrique, eco marathon.

1. INTRODUCTION

Des véhicules à faible consommation énergétique électrique deviennent des acteurs nouveaux pour le transport dans nos villes encombrées [3]. Ces types de véhicules électriques ont vu le jour aux challenges éco-marathon et répondent à la demande d'une minimisation de la consommation de CO₂ ainsi qu'à la transition énergétique future [1, 2]. Les publications sur ces véhicules sont réduites car le développement est en général confidentiel. Des triporteurs, les cycles taxis, les vélos cargos et des tricycles entièrement carénés sont des véhicules d'actualités avec des masses de 50 à 150kg pour des vitesses moyennes de 45km/h. Cette masse et cette vitesse demandent une certaine puissance pour obtenir une accélération qui permet de se fondre dans la circulation de nos villes.

Un compromis difficile doit être trouvé entre la masse, la puissance, l'autonomie, la technologie de batterie et le prix. Ce document va présenter la consommation énergétique en fonction de la masse du véhicule. Le type et la puissance de moteurs généralement utilisés ainsi que la problématique du taux de décharge des batteries seront présentés. Pour minimiser le problème du taux de décharge de l'accumulateur, une comparaison entre la commande à force (couple)

constante et à puissance constante sera présentée, ainsi que la possibilité d'utiliser des super condensateurs.

Ensuite, la stratégie de commande du moteur avec pédalage sera présentée. Enfin, une comparaison du prix de l'énergie entre différents types de véhicules électriques sera présentée pour faire une synthèse.

2. CONSOMMATION DE VEHICULE

La consommation dépend de la vitesse du véhicule, de la force résistante, de l'aérodynamisme (k_{aero}), des pentes et des pertes dues aux roulements des pneumatiques [3, 7, 8]. En effet, la puissance résistive d'un véhicule est modélisée par l'équation suivante :

$$P_{resistance} (W) = k_{aero} \cdot Vit^3 + (k_{roulement} + k_{pente}) \cdot Vit \quad (1)$$

$$\text{Avec } k_{roulement} = M \cdot C_r / 3.6 \quad k_{pente} = M \cdot g \cdot \text{pente} (\%) / 3.6$$

où Vit est la vitesse de déplacement en km/h, C_r est coefficient de roulement des pneus en N/kg, M est la masse du véhicule, g est constante de gravitation. L'ordre de grandeur de ces coefficients en fonction des véhicules testés sont présentés dans ce tableau suivant :

Type de cycle	k_{aero} W/(km/h) ³	k_{roul} W/(km/h)
VTT	0,0066	7,3
Tricycle	0,0051	7,5
Vélo couché	0,004	5
Tricycle caréné	0,0018	5

Pour minimiser la consommation d'énergie, la puissance de pédalage humaine (100W à 200W) est utilisée en addition du moteur électrique. On peut observer la consommation entre différents véhicules sur la figure suivante. Celle-ci permet aussi de démontrer que seuls les véhicules légers permettent une faible consommation énergétique. Par conséquent, le tricycle caréné (appelé vélo-mobile) permet une consommation énergétique faible avec des vitesses honorables malgré une carrosserie de 20 kg. Ce carénage permet de minimiser le coefficient k_{aero} , et de s'affranchir des mauvaises conditions météorologiques.

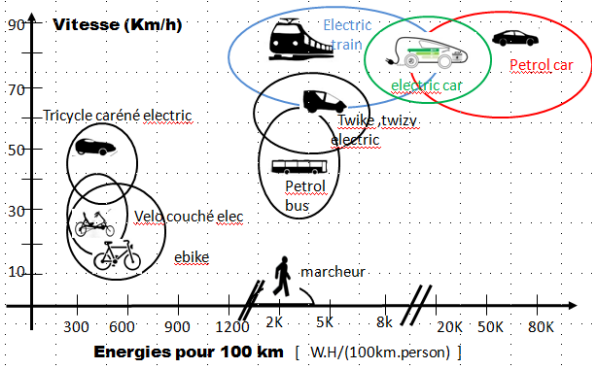


Fig. 1 vitesse moyenne en fonction de la consommation énergétique pour 100km et par personne [9]

La figure suivante permet de comparer la puissance en fonction de la vitesse demandée pour un vélo électrique droit de 120 kg (cycliste de 80kg+bagages) et un vélo-mobile (qui a une masse de 20 kg supplémentaire à cause de son carénage). La différence de consommation est très importante sur du plat, mais identique pour une pente de 5%.

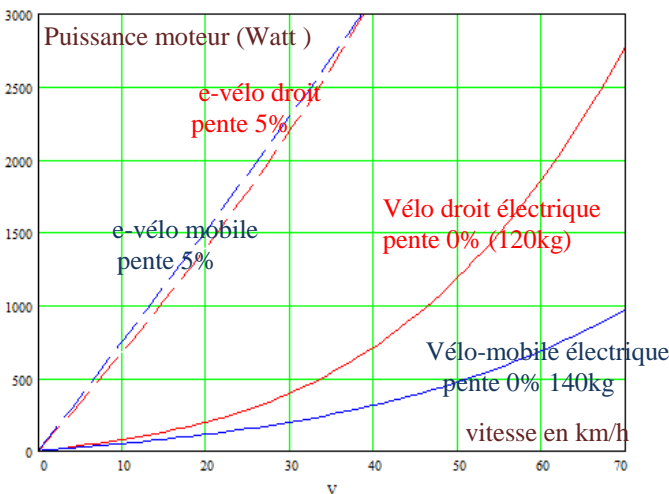


Fig 2 : Puissance moteur en fonction de la vitesse et de la pente.

Sur du plat et sans pédalage, le vélo-mobile a une consommation de 285 W.h pour 100km, à une vitesse moyenne de 35km/h. Cette consommation correspond à 3157km pour l'équivalent d'1 litre d'essence. Mais avec l'utilisation dans notre région avec du pédalage, la consommation passe à 540 W.h pour faire 100km. Il y a presque un facteur 2 [tableau 2] entre les conditions favorables (plat, sans vent, faible accélération) et l'utilisation quotidienne. Ce facteur se retrouve aussi pour une vitesse moyenne de 50 km/h.

Tableau 2 : consommation en fonction de la route

Type de cycle/ type de parcours	Divers	Plat	Divers	Plat
Vitesse moy (km/h)	35	35	50	50
Vélo couché (W h/100km)	800	570	1700	1200
Vélo-mobile (Wh/100km)	540	285	900	560

La différence d'autonomie entre le plat et la route quotidienne est due essentiellement aux accélérations mais surtout aux montées. Mais la consommation énergétique d'un vélo-mobile reste très faible par rapport à un scooter thermique qui demande 45000Wh/100km à 50km/h.

Une autonomie de 200km permet des étapes raisonnables. A partir des consommations précédentes une batterie de 1440W.h est donc nécessaire. Un bon compromis pour l'accumulateur ainsi que pour les transistors du contrôleur consiste à choisir une tension de 72V, soit une capacité énergétique de 20Ah. D'ailleurs toutes nos cycles, sur la figure ci dessous présente cette capacité énergétique et cette tension.



Fig. 3. Différentes réalisations de véhicules électriques (G à droite) Vélo couché, tricycle, karting, vélo mobile

De plus, il est déconseillé de décharger entièrement une batterie Lithium pour ne pas diminuer sa durée de vie. Une réserve de 20% de capacité énergétique est conseillée ce qui diminue l'autonomie de ce même pourcentage. Pour avoir une bonne dynamique du véhicule et se fondre facilement en agglomération, une puissance de moteur de 3000W peut être facilement réalisée pour un budget de 1500€ [3]. La vitesse de pointe avec cette puissance permet aux tricycles carénés d'atteindre 75 km/h sur du plat.

3. LES MOTEURS POUR LES CYCLES MOTORISES

Pour gagner de la place et simplifier la transmission mécanique, les moteurs pour cycles motorisés sont de types brushless outrunner qui font office de roue. Ces moteurs ont une vitesse de rotation d'environ 600 tr/min. Donc, ils ont un nombre de paires de pôles important (16 à 22). Le choix du nombre de paires de pôles permet d'avoir plus de couple ou de vitesse pour une même puissance nominale. Un moteur de 3000W pèse environ 7 kg et un moteur de 4000W passe à 9kg. Nous allons voir quelle est la commande la plus appropriée pour ces moteurs [4, 5].

4. COMMANDE AVEC FORCE (COUPLE) CONSTANTE

La force constante du moteur pendant les régimes transitoires est réalisée grâce à la limitation de l'intensité du moteur qui sera dans notre cas de 80A efficace. Donc, la force motrice au démarrage sera de 328 N car entre le courant moteur et la force, il y a une constante de 4,1 N/A. Cette constante est déterminée par la relation tension et vitesse qui est similaire à la relation courant et la force. La puissance max est donc de 5700W car la batterie a une tension de 72V. Cette tension permet d'atteindre la vitesse de 17,5m/s (63km/h).

La force constante provoque une accélération constante et une vitesse linéaire donnée par l'équation suivante (en négligeant la force résistive de l'air).

$$Vitesse(t) = \frac{(F_{\text{motor}} - F_{\text{resis tan t}})}{\text{Masse}} \cdot t + V(t=0) \quad (2)$$

Pour un véhicule de 100kg, les temps d'accélération et de décélération seront de 5,9 secondes pour atteindre 17,5 m/s. Sur la figure 4, la vitesse dynamique et la consommation d'énergie peuvent être observées sans négliger la force de résistance de l'air. Cette énergie est composée de l'énergie cinétique plus l'énergie requise par la force résistive déterminée par l'équation suivante :

$$E(\text{Wh}) = \frac{E_{\text{cinetic}} + E_{\text{force resistive}}}{3600} = \left(\frac{1}{2} M \cdot V^2 + F_{\text{resis tan t}} \cdot \frac{V}{t_{\text{acc}}} \cdot \frac{t^2}{2} \right) \cdot \frac{1}{3600}$$

Pendant l'accélération, l'énergie cinétique est relativement importante (4,2Wh), alors que l'énergie pour la force résistance est seulement de 0,5Wh. On peut observer l'énergie et le profil de vitesse sur la figure suivante.

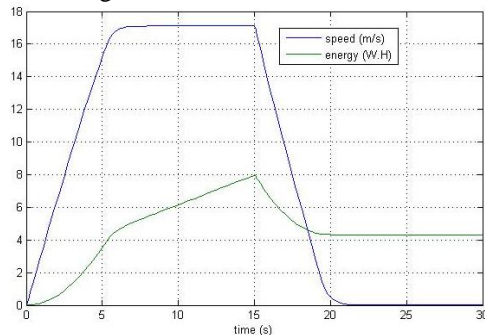


Fig. 4) dynamique de la vitesse et consommation de l'énergie pour une commande à force constante (Masse 100kg)

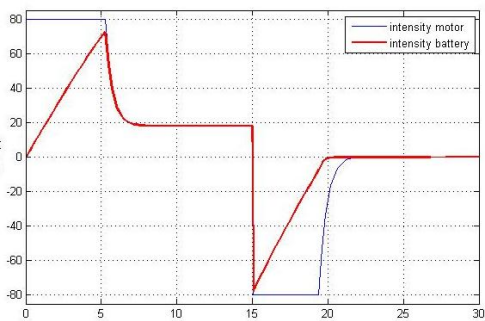


Fig. 5) Limitation de l'intensité moteur et intensité batterie sans super condensateur (tension batterie 72V)

Sur la figure précédente, on peut observer le courant moteur qui est limité pendant toute la phase d'accélération pour fournir une force constante. Mais, la force constante du moteur provoque un pic d'intensité important devant être fourni par les batteries pendant l'accélération ainsi que pendant la

décélération. Cependant, toutes les batteries sont limitées par un taux de courant de décharge et de charge de manière à ne pas les détruire, voir [tableau 3]. La première solution pour minimiser le taux de décharge pour une puissance maximale est d'augmenter la tension de l'accumulateur. Un bon compromis est une tension de 72V par rapport aux transistors du contrôleur qui supportent 100V. Il y a aussi un compromis entre la dynamique souhaitée et les courants maximum autorisés par la batterie. Le tableau 3 suivant montre les caractéristiques et le prix d'un accumulateur d'énergie en fonction du taux de décharge.

Ce tableau permet d'observer que le poids, le volume et surtout le prix augmentent lorsque le taux de décharge de la batterie est important. En outre, le courant de régénération doit être limité par le taux de charge de batterie. On peut observer que le prix des super-condensateurs est encore relativement important par rapport aux batteries. Les super condos peuvent supporter de très grands courants de charge et décharge mais ont une faible capacité énergétique. Néanmoins, ils acceptent un nombre de cycles 1 000 fois plus élevé qu'une batterie.

Pour minimiser les courants sortant et entrant des batteries, nous allons voir que la commande de puissance constante est plus appropriée que celle à force constante.

5. COMMANDE AVEC PUISSANCE CONSTANTE

Lorsque le courant de la batterie est limité, le moteur fonctionnera à puissance constante $P_{m \text{ limit}}$ [5, 6]. Pour connaître les dynamiques du véhicule, il faut donc résoudre l'équation différentielle (4). En négligeant la force résistante, l'équation peut être résolue et donne la dynamique de vitesse (5) et du déplacement (6).

$$\frac{P_{m \text{ limit}}}{V} = M \frac{dV}{dt} + F_{\text{Re sis tan t}} \quad (4)$$

$$V(m/s) = \sqrt{\frac{2 \cdot P_{m \text{ limit}}}{M} \cdot t^{1/2}} \quad (5) \quad D(m) = \sqrt{\frac{2 \cdot P_{m \text{ limit}}}{M} \cdot \frac{2}{3} \cdot t^{3/2}} \quad (6)$$

Avec la force résistante non négligée, l'équation différentielle (4) n'est pas résoluble donc elle sera simulée sur la figure 6.a et 6.b. Au démarrage, si on limite la puissance à 2880W (72V, 40A) correspondant à la puissance moyenne lors de l'accélération de la figure 5, il faudra aussi 6 secondes pour atteindre la vitesse de 17,5 m/s (63 km/h).

L'énergie consommée sera donc identique pour les 2 commandes (figure 4 et 6.b). On peut remarquer que grâce à la commande à puissance constante, la dynamique de vitesse est plus importante par rapport à celle de la force motrice.

Table 3 : Comparaison de différents types de batteries 72V/20Ah 1440Wh

Type de Batteries	Dimensions (cm) & Volume (cm ³)	Masse	Prix en 2013	Taux charge max	Taux de décharge max	R par element
li-po 20 Ah 18S (4V)	(0.8*20.6*10) 3000	7.5 kg	620 €	20 A = 1C	60 A = 3C	1 mΩ
li-po 20 Ah 18S (4V)	(1*22*10) 3960	9 kg	1000 €	50 A = 2.5C	360 A = 15 C	0.5 mΩ
Li-fer 20 Ah 22S(3.3V)	(0.8*22.8*16) 6600	11 kg	650 €	20 A = 1C	60 A = 3C	5 mΩ
Super capa 30S(2.6V) 1600F/75 V 45Wh	(Ø6.0*8.5) 9100 Samwha	10.5 kg	1100€	60A	1240 A max 60A	1.8 mΩ
Super capa 30S 50F/75 V 1.4Wh	(Ø1.8*4) 400 S Samxon	0.6 kg	90 €	14A	70 A max 14 A	6 mΩ

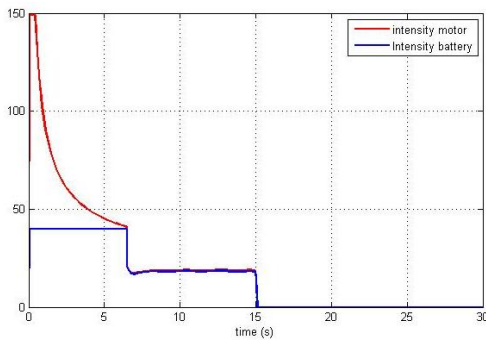


Fig. 6.a) puissance constante avec limitation du courant batterie sans super condo (tension batterie 72V)

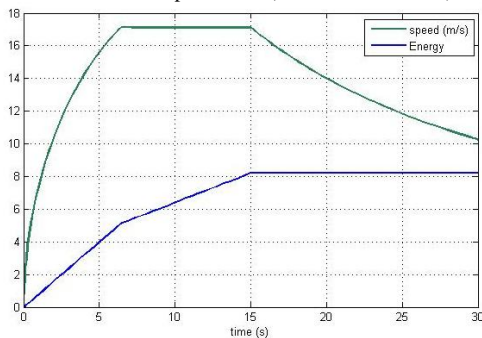


Fig. 6.b) dynamique de la vitesse et énergie pour une commande à puissance constante (Masse 100kg)

Mais avec une puissance constante, le courant batterie est constant (40A) pendant toute l'accélération et n'atteint plus 80 A (figure 6.a). Par conséquent, il y a une sollicitation de la demande du courant de la batterie bien plus faible. Donc, avec une commande à puissance constante, l'intensité maximale des batteries n'est jamais dépassée. Mais, il y a un grand courant moteur pour les vitesses faibles donc les transistors sont fortement surdimensionnés (2 transistors IRF 4110 à 6 € pouvant supporter 180A ont été mis en parallèle). L'utilisation des 2 transistors permet de minimiser la taille du refroidisseur). C'est le microcontrôleur PIC 18F6580 qui régule le courant batterie, mais il y a aussi la mesure du courant moteur qui détermine l'échauffement équivalent du moteur pour le protéger. La commande du moteur brushless se fait sans capteur pour augmenter la fiabilité du véhicule. Mais le moto variateur perd un peu de couple au démarrage par rapport à une commande avec capteur.

Avec la commande à force constante, la limite de l'intensité du moteur est de 2 à 3 fois le courant nominal du moteur. Ainsi il est possible de dépasser la puissance maximale du moteur lorsque la pente de la route est importante et donc de le détruire ainsi que l'accumulateur. Un relais thermique est également nécessaire pour protéger le moteur, mais il vaut mieux utiliser des capteurs de température pour surveiller directement le moteur et aussi les batteries.

Dans le tableau 3, l'accumulateur a une capacité énergétique de 20Ah et permet de fournir facilement un taux de décharge de 60A (3C) ce qui est bien supérieur à la demande d'un variateur qui a une limite le courant batterie à 40A sous 72V (2880W lors de l'accélération). Mais pour diminuer le

prix, la masse et l'encombrement de la batterie, si l'on fait le choix d'une batterie de 10Ah (30A maximum) alors le taux de décharge de cet accumulateur va être dépassé avec un variateur qui demande 40A. Mais, il est possible d'utiliser des supers condensateurs pour obtenir ce courant.

6. LES SUPER-CONDENSATEURS

Il est intéressant d'associer l'avantage des super-condensateurs (qui permettent de fournir de fortes puissances) à celui des batteries (pour leur grande capacité énergétique). Il faut trouver un compromis acceptable entre le volume, le poids et le prix. Mais, il faut aussi gérer la charge et la décharge des deux sources d'énergie : des convertisseurs spécifiques doivent limiter le courant sortant et entrant des batteries et des super-condensateurs. Ces convertisseurs doivent aussi surveiller et limiter la tension maximale de chaque élément et des super-condensateurs grâce au circuit B.M.S (Battery Management Security). Pour solutionner ceux-ci, la batterie et les super-condensateurs fournissent l'énergie à un bus continu DC par l'intermédiaire de deux hacheurs réversibles en courant (hacheur 1 et hacheur 2). Ce bus continu permet d'alimenter le variateur du moteur du véhicule.

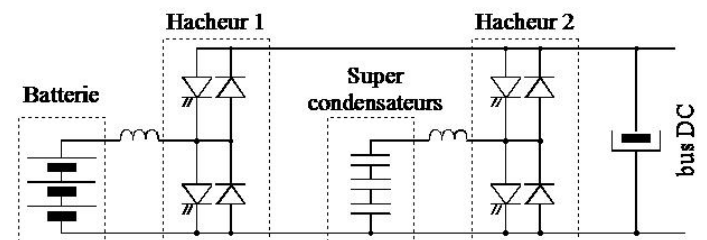


Fig. 7) Présentation de l'« alimentation hybride » batterie et super condensateur [11]

Ces deux convertisseurs ont pour rôle d'adapter les niveaux de tensions entre le bus continu, la tension des batteries et celle des super-condensateurs. En effet, pour les super-condensateurs, cela permet d'adapter la variation de la tension (ΔV) inévitable liée à la variation d'énergie ΔW qui correspond à l'équation suivante :

$$\Delta W (\text{Joule}) = \frac{1}{2} C_{SC} (v_{\max}^2 - v_{\min}^2) = \frac{1}{2} \cdot C_{SC} \cdot \Delta V^2 \quad (7)$$

où, C_{sc} est la capacité et V la tension sur ces bornes.

Le principe de la commande des 2 hacheurs est de pouvoir maintenir constante la tension du bus DC qui alimentera le variateur du véhicule. La régulation des deux hacheurs peut se faire avec des microcontrôleurs bas de gamme PIC 18F6580 en utilisant des régulateurs simples de type logique floue [10].

Les manettes de frein ont été équipées d'interrupteurs pour couper le fonctionnement du moteur, commander les hacheurs ainsi que le feu stop. Lors de l'action sur les freins mécaniques, il y a un freinage électrique de 10A (1C pour des batteries de 10A.h donc une récupération de 720W). Si la poignée d'accélération est à 0% et qu'il n'y a pas de pédalage alors il y a un léger freinage électrique de 5A (360W) seulement sur les batteries. Cette puissance de régénération permet d'avoir un petit freinage lors de descentes. Tous nos cycles motorisés sont

propulsés (moteur à l'arrière) et ne permettent pas d'avoir un grand freinage à l'arrière. En effet, il faut freiner 70% à l'avant et 30 % sinon c'est le drift assuré (drift : glissement du train arrière vers l'avant). Si les batteries viennent d'être chargées et qu'on entame une grande descente, la batterie étant pleine, le BMS arrêtera la régénération. Il n'y aura plus de frein moteur ce qui sera préjudiciable pour la conduite du véhicule.

Notre stratégie a été de dimensionner les super condos pour minimiser le taux de décharge des batteries à 20A. Sachant que la tension des super condos a été choisie pour 24V en 2011 afin de minimiser le prix et l'encombrement (10 super condos mis en série). L'énergie de démarrage étant de 4.7W.h (7 et 3), aussi des condensateurs de 400F ont été choisis. Avec l'alimentation hybride, les super condos se rechargeront dès que le courant de la batterie est inférieur à 20A et dépendra de la vitesse. Le problème de cette stratégie est que suite à une première accélération à 2880W, il faut attendre un certain temps pour que les supers condos soient rechargés complètement. Le pilote aura parfois des accélérations moins vives et c'est aussi problématique pour la conduite.

Une autre solution bien plus simple que l'alimentation hybride précédente est de mettre en série 2 super-condos en parallèle sur chaque élément de batterie. En effet, ces dernières années le prix des super condensateurs (exemple : Samxon) a fortement diminué avec des résistances internes faibles. Le courant de pointe sera donc fourni par les super condensateurs. Aussi, la tension de seuil des super-condos ne sera jamais dépassée grâce à la tension de seuil des éléments de l'accumulateur (4.2V) qui est bien inférieure à celles de 2 super condos en série (5.4V). Lors de la première interconnexion des super-condos, il faut charger les super-condos à la même tension que les éléments de l'accumulateur pour minimiser le courant de transfert d'énergie. La charge peut se faire avec le chargeur de batterie. Mais comment définir la valeur des super condensateurs avec cette dernière solution ?

Si le temps d'accélération du véhicule est de 5 secondes avec un courant limité à 10A et une résistance interne de la batterie de 0,05 Ω, alors pour limiter le courant de décharge de la batterie à 2/3 de sa valeur (soit 6.6A), le condensateur peut être déterminé à partir de l'équation suivante :

$$C_{SC} = \frac{-t_{acc}}{R_{batt} \cdot \ln(1 - k)} = \frac{-5}{0.05 \cdot \ln(1 - 2/3)} = 45 F / 48 V$$

L'énergie de tous ces super condos pour 48V sera de

$$W = \frac{1}{2} \cdot \frac{C \cdot U_{CS}^2 \cdot nbr\ element}{3600} = \frac{1}{2} \cdot \frac{45 \cdot 3.5^2 \cdot 14S}{3600} = 1.2(W.H)$$

Les super condensateurs permettent de limiter le courant de décharge de la batterie et aussi de limiter sa chute de tension, comme on peut l'observer sur les figures 8 et 9.

D'ailleurs, sur la figure 8, on peut observer la chute de tension aux bornes de la charge avec 14 éléments lipofer≈49V et 2 super-condos de 200F en série par élément, donc avec 28 super condo. Le courant délivré au moteur est de 10A au démarrage du véhicule, puis de 5 A en régime nominal et enfin à 0A.

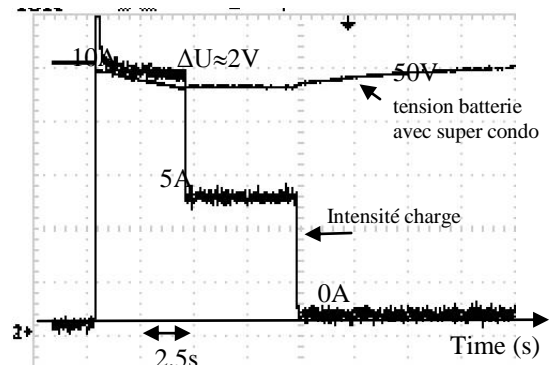


Fig 8 : Exemple tension et courant charge demandé par le contrôleur

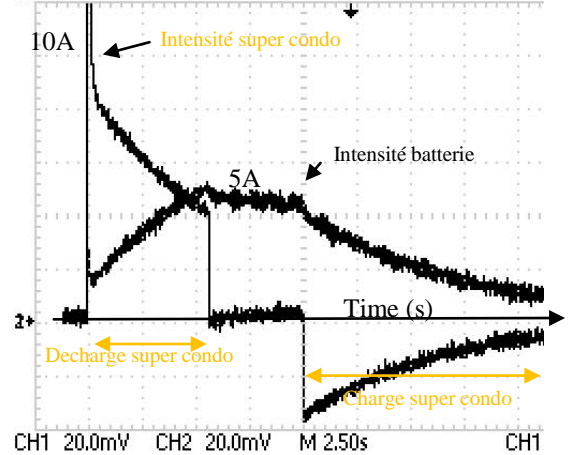


Fig 9 : Courants batterie et 2 supercondos de 200F en série par éléments

Sur la figure 9, on peut observer que l'addition du courant fourni par la batterie et les super condos correspond au courant de la charge. On peut observer que c'est le courant des super condos qui fournit le courant de démarrage du véhicule. Par conséquent, il y a une minimisation du courant impulsif par la batterie. Mais, lorsque le courant demandé par la charge est de 0A, alors la batterie recharge les super condos. L'inconvénient de cette stratégie est que si le temps d'accélération dure trop longtemps, le courant de la batterie atteindra le courant demandé par la charge.

Nous allons voir maintenant comment le contrôleur gère la commande d'un moteur de cycle.

7. STRATEGIES DE LA COMMANDE DU CONTROLEUR

Pour minimiser le taux de décharge de la batterie, nous avons vu qu'il valait mieux utiliser une régulation de la limitation de l'intensité de la batterie (contrôle moteur avec une puissance constante pendant le démarrage). Aussi pour pouvoir contrôler une poignée d'accélération, il faut contrôler la vitesse et la limitation de l'intensité de la batterie avec freinage électrique. Cette régulation de vitesse permet d'utiliser un capteur de sécurité sur le pédalier qui est appelé P.A.S (Power Assist System) [7, 8]. La stratégie d'un de nos contrôleurs a été réalisée de la façon suivante :

- S'il y a un pédalage très faible entre 0 à 0,1 tr/s, le moteur est en roue libre quelque soit l'action de la manette accélératrice. Donc, la consigne de vitesse sera à 0 km/h.

- S'il y a un faible pédalage entre 0,1 à 0,15 tr.s⁻¹, même si la manette est à 100%, la consigne ne sera que de 13 km/h permettant d'accélérer mais pas d'aller vite.
- S'il y a un pédalage supérieur à 0,15 tr.s⁻¹, la consigne de vitesse sera un certain pourcentage de la poignée accélératrice.
- Un freinage électrique s'établira seulement avec la manette à 0%, avec une vitesse supérieure de 13 km/h. En dessous de cette vitesse, le moteur sera en roue libre.
- Si le frein est actionné, le moteur freinera quelque soit la position de la manette.

Nous pouvons observer dans la figure 10, cette stratégie de commande avec un capteur de sécurité sur le pédalier. Le courant batterie est limité à 32 A. La batterie ici est de 48V, elle permet d'atteindre des vitesses de 43 km/h. Nous pouvons observer la gestion de contrôle de vitesse pendant l'accélération et le freinage.

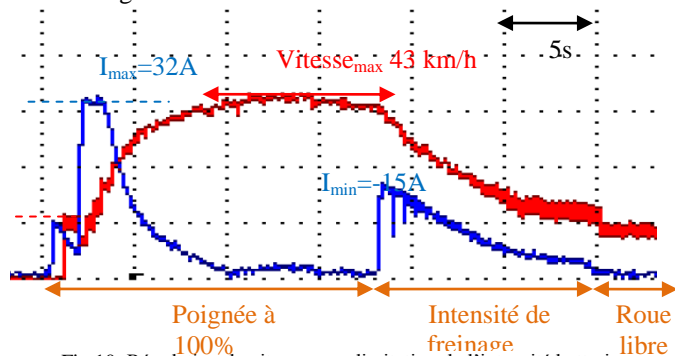


Fig 10: Régulation de vitesse avec limitation de l'intensité batterie avec une batterie de 48V et un capteur pédalier (Masse 100kg)

La récupération d'énergie est dangereuse si les batteries Li-Po sont chargées à 100%. Par conséquent, pour permettre un freinage électrique le taux de charge de la batterie doit être connu. C'est le rôle du circuit électronique appelé BMS (batterie management et sécurité) qui devra interdire la charge dans ce cas.

Sans capteur d'assistance et avec une régulation de vitesse, les dynamiques pratiques sont un peu différentes de la courbe théorique (Fig. 6.a et 6.b) qui était pour 100kg. On peut observer sur la courbe suivante la limitation du courant batterie à 42A (soit 2880W), puis le courant demandé en régime établi de vitesse. Malgré la masse de 140kg du vélo-moblie (avec un

cycliste de 80kg+bagages), on peut observer que la puissance de 2880W permet d'obtenir les mêmes dynamiques qu'une voiture classique donc de s'insérer dans la circulation quotidienne (par exemple traverser un carrefour en toute sécurité).

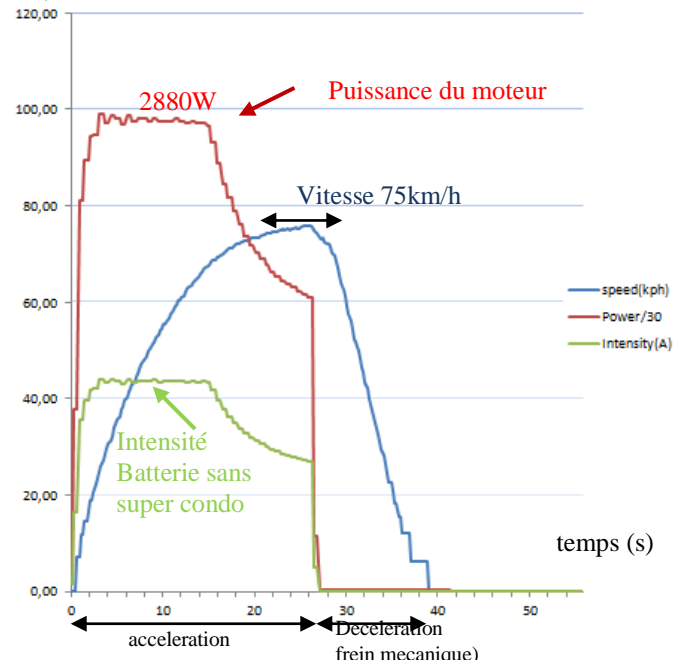


Fig 11 : Courbe d'accélération du vélo mobile (sur du plat, sans pédaler) avec M=140kg tension batterie 72V

Maintenant, que nous avons vu les dynamiques des véhicules et de la stratégie de commande, nous allons voir la consommation et le coût de nos cycles motorisés.

8. COUT DE DIFFERENTS VEHICULES ELECTRIQUES

Le coût de nos transports n'est pas lié seulement à la consommation de l'énergie. En effet, il faut prendre en compte le prix de la fabrication et l'obsolescence des batteries.

Par conséquent, le tableau suivant donne le prix d'un plein de véhicule pour 100 km, à la vitesse moyenne de 50km/h, avec un prix de l'électricité de 0.12€/kW.h. De plus, ce tableau donne une idée du coût de nos déplacements avec l'amortissement d'un véhicule sur 4 ans.

Tableau 4 : Coût de différents véhicules électriques			
	Vélo électrique 25 kg	Vélo mobile Elec 50kg	Twizy 450 kg
« Plein » pour 100km	0.48€	0.12 €	0.6 €
Abonnement, kilométrage par mois	0 € 1000 km/mois	0 € 1500 km/mois	50 €/mois 1500 km/mois
Prix batterie, (Nbr charge/mois)	500€/1.4kW.h (30)	500€/1.4kW.h (13)	4000 €/10kW.h (9)
Cout du véhicule	2000€	6000€	8000 €
Cout avec obsolescence de la batterie	1€/100km	0.81€/100km	5.6 €/100km
Cout/mois sur 4 ans	15€+52€/mois	1.8€+135€/mois	(59€+166€/mois)

Dans le tableau précédent l'amortissement du véhicule a été déterminé sur 4 ans avec une utilisation de 1500km par mois. Donc, le cout par mois est scindé en 2 chiffres entre la consommation et l'amortissement du véhicule. On peut remarquer que l'abonnement de la batterie est relativement cher. On peut remarquer que le coût de la consommation électrique est très faible par rapport à celle d'un scooter thermique dont le coût par mois sur 4 ans est de 112€+52€ (mais l'électricité n'est pas taxé à 80% comme le pétrole).

On peut remarquer que le nombre de cycles de charge par mois est très inférieur à celui que peut faire un accumulateur. En effet, une batterie peut faire 1000 cycles à 1500 cycles de charge et de décharge mais, au bout de 4 ans, la batterie ne fonctionnera plus car ces pôles seront oxydés.

La fabrication des vélo-mobiles est artisanale pour l'instant et son prix devrait baisser avec une industrialisation. La consommation de la Twizy est liée à sa masse importante, donc pour une autonomie de 80km, la batterie est relativement importante. Mais le prix de la batterie n'est pas répercuté sur le coût du véhicule, car la batterie est louée avec un abonnement.

Le tableau précédent permet de confirmer que le coût d'un véhicule électrique est fortement lié à sa masse et sa puissance.

9. CONCLUSIONS

Nous avons présenté les avantages de la commande à puissance constante du moteur permettant de minimiser le taux de décharge de la batterie pour un véhicule électrique. D'ailleurs, cette commande est utilisée depuis longtemps pour la traction électrique des chemins de fer. Cette publication démontre qu'il est possible d'utiliser des super condensateurs pour minimiser le taux de décharge car leur prix a fortement diminué ces dernières années. Mais la gestion de l'énergie provenant de la batterie et des super-condensateurs n'est pas si aisée à définir et à réaliser. Nous avons aussi prouvé qu'il était possible de réaliser des cycles motorisés avec des vitesses et des dynamiques honorables. Nous avons présenté que l'autonomie et la consommation d'un véhicule sont fortement liées à sa masse ainsi qu'à sa forme aérodynamique. Le prix de l'énergie électrique étant faible, alors le coût de la consommation est faible. Mais pour connaître le cout réel de ces moyens de transport, nous avons pris en compte l'amortissement d'un véhicule qui dépend surtout du cout de la réalisation et de la vétusté des batteries.

Les cycles motorisés électriques à faible consommation énergétique seront certainement un de nos transports alternatifs du futur car leurs coûts énergétiques viennent déjà concurrencer les véhicules à pétrole malgré le coût des batteries

10. REFERENCES

- [1] M. S. Carmeli, F. Castelli Dezza, G. Galmarini, M. Mauri and L. Piehari, **A vehicle with very low fuel consumption; realization, analysis and optimization**, in XIX International Conference on Electrical Machines, Rome, Italy, 2010.

- [2] José Fernández Ramos¹, Juan Jesús Fernández Lozano², Alfonso Gago Calderón **"Design of Electric Racing Vehicles: An experience of interdisciplinary project-based education in engineering"** EVS 27, octobre 2013
- [3] A.Sivert, T.lequeu **"Je construis mon véhicule électrique"**, édition Dunod, 2013, pp 140.
- [4] A.Sivert **"Le velo électrique"** Revue des départements Genie électrique & informatique GESI N°80, Decembre 2012, p26,33
- [5] A.Sivert, F.Betin, S.Carriere **"Difference force and constant power control applied to electrical bike"**, EVER ecologic vehicles & renewable energies de MONACO, Mai 2012, 6 pages
- [6] A.Sivert, F.Betin, J.Becar **"An Electrical Bike For Project Based Learning Platform"**, EVER ecologic vehicles & renewable energies de MONACO, Avril 2011, 6 pages
- [7] Samuel violin **"le velo à assistance électrique"** les cahiers de l'instrumentation N°9 Chauvin Arnoux octobre 2010
- [8] A.Sivert, **"Le velo électrique"**, iut en ligne : <http://public.iutenligne.net/etudes-et-realisations/sivert/veloelec/> 2011, 6 pages
- [9] site web IUT Aisne : **réalisation de véhicule électrique** <http://aisne02geii.e-kart.fr/>
- [10] Arnaud Sivert, Franck Betin, Jean-Paul Bécar **"A Fuzzy Logic Application for Go-Kart: a Battery Charger"** EVER Monaco, 2011, 6 pages
- [11] E. Hoang, G. Feld, B. Revol, D. Penard, **Eléments d'étude d'un système de stockage de l'énergie électrique : le supercondensateur**, La revue 3E.I, N°49, juin 2007, pp. 15-21

11. BIOGRAPHIE :



Arnaud Sivert est Maître de conférences à l'IUT de l'Aisne au département GEII (Génie Electrique et Informatique Industrielle) de Soissons. Depuis 2008, il encadre chaque année une équipe d'étudiants pour le challenge pédagogique international de kart électrique à Vierzon.

Depuis 2011, il encadre une équipe à différents types de challenges de véhicule faibles consommation d'énergie (éco marathon, solar cup, challenge de vélo électrique...)

Au Laboratoire des Technologies innovantes (L.T.I) avec l'équipe Énergie Électrique et Systèmes Associés (**EESA**), ses principaux intérêts de recherche sont les techniques de contrôle de pointe pour machines électriques et entraînements en particulier en utilisant des algorithmes de logique floue et le contrôle de la structure variable