



HAL
open science

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

Arnaud Sivert, Franck Betin, Carriere Sebastien

► **To cite this version:**

Arnaud Sivert, Franck Betin, Carriere Sebastien. Gestion et dimensionnement de l'énergie embarquée pour un véhicule électrique à faible consommation : eco marathon. Symposium de Génie Électrique 2014, Jul 2014, Cachan, France. hal-01065432

HAL Id: hal-01065432

<https://hal.science/hal-01065432>

Submitted on 18 Sep 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

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

Arnaud Sivert¹, Franck betin¹ : arnaud.sivert@iut.u-picardie.fr

U.P.J.V Université de Picardie Jules Verne, Laboratoire des Technologies innovantes (L.T.I),
 Institut Universitaire de Technologie de l'Aisne GEII, 02880 SOISSONS¹

RESUME – Les ingénieurs développant des véhicules électriques doivent trouver un compromis difficile 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 représentent 35% du prix du véhicule électrique, nous allons démontrer les avantages d'une commande pour le moteur à puissance constante, par rapport à une commande à force constante. 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 véhicules électriques 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-CLES –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.

1. Introduction

Des véhicules à faible consommation énergétique électrique deviennent des acteurs nouveaux pour le transport dans nos villes encombrés [1]. Ce genre de véhicule répond à la demande d'une minimisation de la consommation de CO₂ ainsi qu'à la transition énergétique future. D'ailleurs, les triporteurs, les cycles taxis, les vélos cargos et les vélos mobiles sont des sujets d'actualités avec des masses de 150 à 300kg. Mais, leurs masses demandent une certaine puissance pour avoir une accélération et une vitesse correcte pour se fondre dans la circulation urbaine. Pourtant, des cycles motorisés avec une puissance de moteur de 3000W à 4000W peuvent être facilement réalisés pour un budget de 1500€[2]. Sur la figure 1, des tricycles et vélos mobiles peuvent rouler à 80 km/h en pointe et pèse entre 100 kg et 150kg avec le pilote. Leurs autonomies est de 260km pour avoir une utilisation d'action convenable. La consommation énergétique de ces véhicules est atteindre une 560W.h pour 100km à 50 km/h de moyenne ou qui peut faire 1600km pour l'équivalent d'un litre d'essence. On peut observer les dynamiques du vélo mobile sur la figure 2.



Fig. 1. Différentes réalisations de véhicules électriques (G à droite) Vélo couché, tricycle, karting, vélo mobile

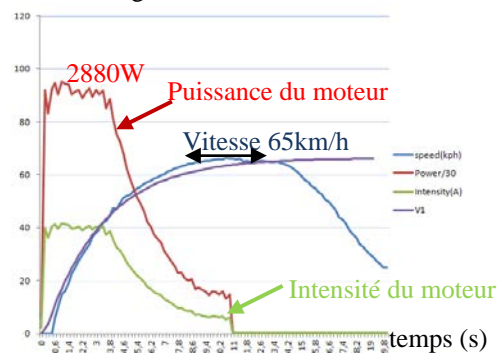


Fig 2 : Courbe d'accélération du cycle couché (sur du plat, sans pédaler) avec M=100kg

Dans un premier temps, nous allons présenter les moteurs pour les cycles motorisés, puis les avantages de la commande à puissance constante par rapport à la commande à force constante [3]. Ensuite, la gestion de charge et décharge de

super condensateurs pour minimiser le taux de décharge et de charge de l'accumulateur. Enfin, la gestion d'un capteur de pédalier et l'asservissement de vitesse du contrôleur sera présenté [4, 5, 6,7].

2. Les moteurs pour cycles motorisés

Pour gagner de la place et simplifier la transmission mécanique, les moteurs pour cycles motorisés sont de types brushless outrunner (aimants au rotor) qui font office de roue. Ces moteurs doivent avoir une vitesse de rotation d'environ 600 tr/min. Donc, ils ont un nombre de paires de pôles important (16 à 22) pour des fréquences maximales de contrôleurs de (150Hz à 250Hz). Le choix du nombre de paires de pôles, permet d'avoir plus de couple ou plus de vitesse pour une même puissance nominale. Nous allons voir quelle est la commande la plus appropriée à ces moteurs.

3. Commande avec force constante en régime transitoire

La force constante (équivalente au couple) du moteur pendant les régimes transitoires est réalisée avec la limitation de l'intensité moteur qui sera dans notre cas de 80 A efficace. Donc, la force motrice au démarrage sera de 328 N car entre le courant moteur et la force il y a une relation de 4,1 pour notre moteur. 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 correspondant à l'équation suivante si on néglige la force la force résistive de l'air.

$$V(t) = \frac{(F_m - F_{\text{resis tan t}})}{M} \cdot t + V(t=0) \quad (1)$$

Pour une masse de véhicule de 100kg, le temps d'accélération et de décélération sera 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 et de l'énergie requise par la force de résistance.

$$E(J) = E_{\text{kinetic}} + E_{\text{force resistive}} = \int F_m(t) \cdot v(t) \cdot dt \quad (2)$$

$$E (W.H) = \left(\frac{1}{2}M \cdot V^2 + F_{\text{resis tan t}} \cdot \frac{V}{t_{\text{acc}}} \cdot \frac{t^2}{2}\right) \cdot \frac{1}{3600} = (4,2+0.5) \quad (3)$$

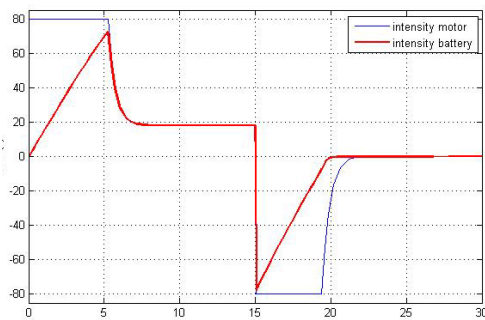


Fig. 3) Limitation de l'intensité moteur et intensité batterie

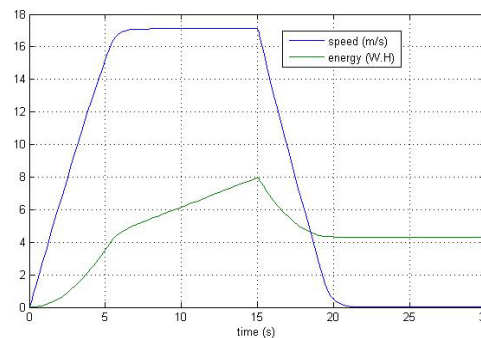


Fig. 4) dynamique de la vitesse et consommation de l'énergie pour une commande à force constante.

La force constante provoque un pic d'intensité important devant être fournis par les batteries pendant l'accélération (cf. figure 3) ainsi que pendant la décélération. Mais, toutes les batteries sont limitées par un taux de courant de décharge et de charge de manière à ne pas les détruire. **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 aura aussi un compromis entre la dynamique souhaitée et les courants maximums autorisés par la batterie. Le tableau suivant montre les caractéristiques et le prix d'un accumulateur d'énergies en fonction du taux de décharge.

Table 1 : Comparaison de différents types de batteries 72V/20A.H 1440W.H						
types of batteries	Size & Volume cm ³	Masse kg	Prix 2013	Taux charge max	Taux de décharge max	R _{total}
li-po 20 A.H 18S	(0.8*20.6*10) 3000	7.5 kg	620 €	20 A = 1C	60 A = 3C	1 mΩ
li-po 20 A.H 18S	(1*22*10) 3960	9 kg	1000 €	50 A = 2.5C	360 A = 15 C	0.5 mΩ
Li-fer 20 A.H 22S	(0.8*22.8*16) 6600	11 kg	650 €	20 A = 1C	60 A = 3C	5 mΩ
Super capa 30S 58 F/75 V 45W.H	(Ø4*7.6) 3650 maxwell	3.7 kg	900 €	20 A	200 A max 20 A	10 mΩ
Super capa 30S 1600F/75 V 1250W.H	(Ø6.0*8.5) 9100 samwha	10.5 kg	1100€	60A	1240 A max 60A	6 mΩ
Super capa 30S 50F/75 V 39W.H	(Ø1.8*4) 400 samxon	0.6 kg	90 €	14A	70 A max 14 A	1.8 mΩ

Ce tableau permet d'observer que le poids, le volume et surtout le prix augmentent lorsque le taux de décharge 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 décharge et de charge mais ils ont une capacité énergétique faible. Mais, ils acceptent un grand nombre de cycles de charges et de décharges 1 000 fois plus grand qu'une batterie.

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

4. Commande de moteur à puissance constante

Lorsque le courant de la batterie est limité, le moteur fonctionnera à puissance constante $P_{m \text{ limit}}$. Pour connaître les dynamiques du véhicule, il faut donc résoudre l'équation différentielle (2). En négligeant la force résistante, la résolution de l'équation (2) peut être résolue et donne la dynamique de vitesse (3) et du déplacement (4).

$$\frac{P_{m \text{ limit}}}{V} = M \frac{dV}{dt} + F_{\text{Resistant}} \quad (4) \quad V(\text{m/s}) = \sqrt{\frac{2 \cdot P_{m \text{ limit}}}{M}} \cdot t^{1/2} \quad (5) \quad D(\text{m}) = \sqrt{\frac{2 \cdot P_{m \text{ limit}}}{M}} \cdot \frac{2}{3} \cdot t^{3/2} \quad (6)$$

Avec la force résistante non négligée, l'équation différentielle n'est pas résoluble donc elle sera simulée sur la figure 5. Au démarrage, si on limite la puissance à 2880W (72V, 40A) correspondant à la puissance moyenne de la figure 3, 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). On peut observer que la dynamique simulée entre la figure 6 et la réelle de la figure 2 sont pratiquement identiques. Grâce à la commande à puissance constante, la dynamique de vitesse est plus importante par rapport à celle de la force motrice.

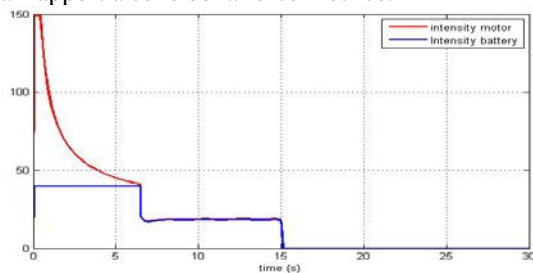


Fig. 5) puissance constante avec limitation du courant batterie

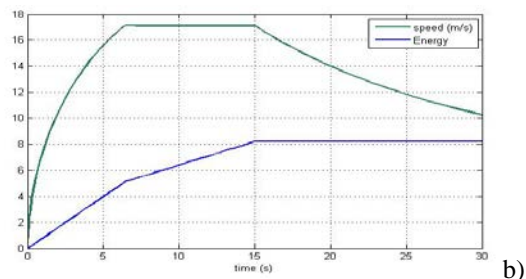


Fig. 6) dynamique de la vitesse et énergie pour une commande à puissance constante

Mais surtout avec une puissance constante, le courant batterie est constant à 40A pendant toute l'accélération et n'atteint plus 80 A (figure 3). Par conséquent, il y a une sollicitation de la demande du courant de la batterie bien plus faible. Donc, avec une commande de 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 supportés 180A ont été mis en parallèle). L'utilisation des 2 transistors permet de minimiser la taille du refroidisseur). C'est le microcontrôleur PIC 18F6680 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. 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 les batteries. Un relais thermique est également nécessaire pour protéger le moteur, mais il faut aussi utiliser de capteurs de température pour surveiller les batteries et le moteur.

Dans le tableau 1, la batterie sont pour 20A.h et permettent de fournir facilement un taux de décharge pour notre moteur de 40A en 72V. Mais pour diminuer le prix, la masse et l'encombrement de la batterie, si l'on fait le choix d'une batterie de 10A.h alors il faudrait utiliser des supers condensateurs.

5. Les super-condensateurs

Il est intéressant d'associer l'avantage des super-condensateurs qui permettent de fournir de fortes puissances et l'avantage des batteries qui ont une grande capacité énergétique. Il faut trouver un compromis entre le volume, le poids et un prix acceptable. Mais, il faut aussi gérer la charge et la décharge des deux sources d'énergie. Donc, 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 de la batterie et des super-condensateurs grâce au circuit B.M.S (battery management security). Une solution est que 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.

Ces deux convertisseurs ont pour rôle d'adapter, les niveaux de tensions entre le bus continu et la tension des batteries et la tension 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 :

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

Avec, C_{sc} valeur du super condensateur.

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 simple de type logique floue [8].

Les manettes de freins ont été équipées d'interrupteurs pour couper le fonctionnement du moteur, commander les hacheurs 1 ainsi que le feu stop. Lors de l'action sur les freins mécaniques avant, il y a un freinage électrique de 10A (1C pour des batteries de 10A.h et une récupération de 720W). Si la poignée d'accélération est à 0%, qu'il n'y a pas de pédalage alors il y a un léger freinage électrique de 5A (360W) seulement sur les batteries. Tous nos cycles motorisés sont en propulsions (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. Si l'on vient de charger entièrement les batteries et que l'on entame une grande descente, la batterie va être vite pleine, le BMS arrête la régénération. Il n'y aura plus de freinage dans ce cas, c'est préjudiciable pour la conduite.

Donc, les super condos vont être conditionnés seulement pour minimiser le taux de décharge à 20A alors que les batteries fourniront 20A. Sachant que la tension des super condos a été choisie pour 24V pour minimiser le prix et l'encombrement en 2011 avec 9 super condos ont été mis en série. L'énergie pour démarrer est de 4.7W.h de l'équation (7 et 5) alors les condensateurs de 58F 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 la gestion des super condensateurs est que suite à une première accélération à 2880W, il faut attendre un certain temps, pour qu'il soit rechargé à 100%. Donc, Le pilote a parfois des accélérations moins rapides et c'est aussi problématique pour la conduite.

Une autre solution bien plus simple que l'alimentation hybride 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 bien inférieures à celle de la batterie. Donc, le courant de pointe sera fourni par les super condensateurs. Remarque, la tension des supercondos ne sera jamais dépassée grâce à la tension de seuil des éléments de l'accumulateur qui est bien inférieure à celles de 2 supercondos en série.

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

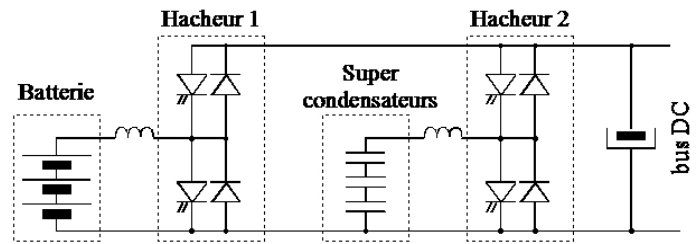


Fig. 7) Présentation de l'« alimentation hybride » batterie et super condensateur

6. Stratégies de la commande du contrôleur du moteur

Pour minimiser le taux de décharge de la batterie, nous avons vu qu'il fallait mieux utiliser une régulation de la limitation de l'intensité de la batterie (contrôle moteur avec une puissance constante pendant le démarrage) et pour pouvoir contrôler une poignée d'accélération, il faut contrôler la vitesse et de 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). 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⁻¹, 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%, au dessus d'une certaine vitesse 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 8, cette stratégie de commande avec un capteur de sécurité sur le pédalier. Le courant batterie est limitée à 30 A. La batterie de 48V permet d'atteindre des vitesses de 43 km/h. nous pouvons observer la gestion de contrôle de vitesse pendant l'accélération et le freinage.

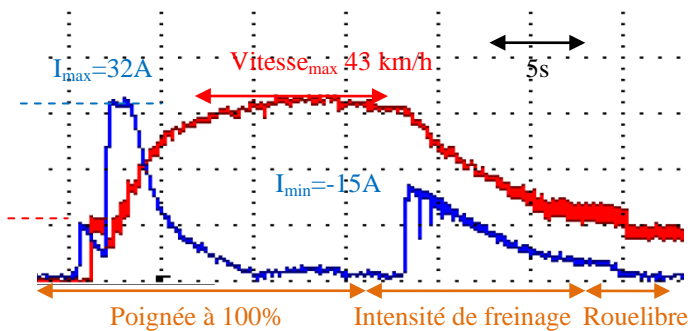


Fig 8: Régulation de vitesse avec limitation de l'intensité batterie avec une batterie de 48V et un capteur pédalier

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

Maintenant, que nous avons vu les dynamiques des véhicules, nous allons voir la consommation et l'autonomie de nos cycles motorisé qui va dimensionner la capacité énergétique de la batterie.

7. Consommation, dimensionnement de l'accumulateur, autonomie

La consommation dépend de la vitesse du véhicule à cause de la force résistante de l'aérodynamisme k_{aero} du véhicule et de la masse du véhicule à cause des pentes [1]. En effet, la puissance résistive d'un véhicule est modélisée par l'équation suivante :

$$P_{resistance} (W) = k_{aero} \cdot Vit^3 + (k_{frottement} + k_{pente}) \cdot Vit \quad (8) \quad \text{Avec } k_{frottement} \text{ en } W/(km/h) \text{ et } k_{aero} \text{ en } W/(km/h)^3$$

On peut observer la consommation entre un vélo droit et un velo mobile (tricycle entièrement caréné) sur la figure 9. La figure 9 permet de démontrer que seuls les véhicules légers permettent une consommation énergétique faible. Par conséquent, le 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 et de couper du froid l'hiver.

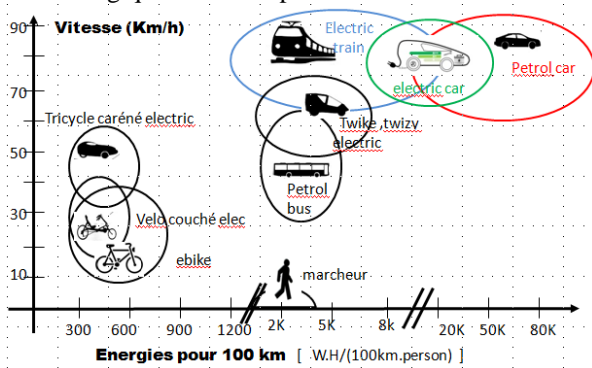


Fig. 9 vitesse moyenne en fonction de la consommation énergétique pour 100km et par personne [7]

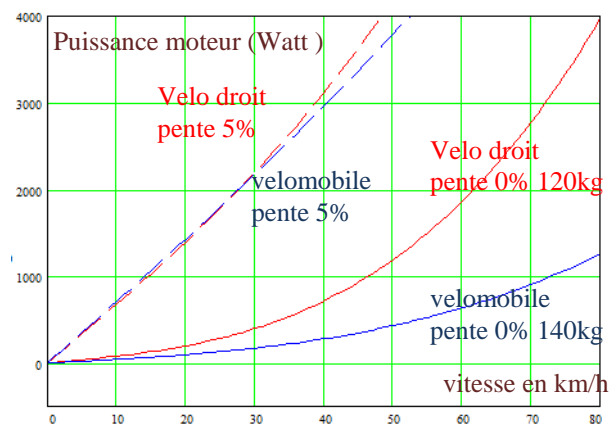


Fig 10 : Puissance moteur en fonction de la vitesse et de la pente

Sur du plat et sans pédalage, le vélo-mobile à une consommation de 285 W.h pour 100km, à une vitesse moyenne de 35km/h. cette consommation correspond 3157km pour l'équivalent d'1 litre d'essence.

Mais l'utilisation dans notre région avec le pédalage, la consommation passe à 540 W.h pour faire 100km. Il y a presque un facteur 2 entre les conditions favorables (plat, sans vent, faible accélération) et l'utilisation quotidienne. Ce facteur se retrouve aussi pour la 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	à 35 km/h	à 35 km/h	50 km/h	50 km/h
Vélo couché (W.H/100km)	800	570	1700	1200
Velo-mobile (W.H/100km)	540	285	900	560

La différence de l'autonomie est du à la consommation demandé par les accélérations mais surtout par les pentes mais cette consommation reste très faible par rapport à un scooter thermique qui demandent 45000W.h/100km à 50km/h.

Un bon compromis pour le choix de la batterie pour une puissance de 3000W lors des accélérations est donc une batterie de 72V/20A.h défini par le tableau 1 qui va permettre une autonomie de 250 km à 200 km en fonction de la vitesse moyenne et de la masse du cycliste et des bagages. Cette batterie procure une autonomie de 200km, ce permet de faire de grand parcours avec des étapes raisonnables. De plus, il déconseillé de décharger entièrement une batterie Lithium pour ne pas diminuer sa durée de vie. Une réserve de 20% de capacité énergétique est donc conseillée.

Le cout 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 et des super condensateurs...

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 abonnement domestique en 2013. De plus, ce tableau donne une idée du cout de nos déplacements avec l'amortissement d'un véhicule sur 4 ans.

Tableau 3 : Cout de différent véhicule électrique			
	Vélo electric 20 kg	Vélo mobile Elec 50kg	Twizy 450 kg
Plein pour 100km	0.48€	0.12 €	0.6 €
abonnement	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 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 ce tableau 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 cout de la consommation électrique est très faible par rapport à celle d'un scooter thermique dont le cout 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 inferieur à celui que peut faire un accumulateur. En effet, une batterie peut faire 1000 cycles à 1500 cycles de charges et de décharges, mais au bout de 4 ans, la batterie ne fonctionnera plus car ces pôles seront oxydés.

La fabrication des vélo-mobiles est artisanal pour l'instant, donc son prix devrait baisser avec une industrialisation.

Une autonomie de 200km permet de partir en vacances avec des étapes honorables. De plus, il déconseillait de décharger entièrement une batterie li-po pour ne pas diminuer sa durée de vie. Donc, une réserve de 20% de capacité énergétique est honorable.

8. Conclusion

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. 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. Si le prix de l'énergie électrique est faible, donc que le cout pour faire le plein est faible, pour connaitre le cout réel de ces moyens de transport, nous avons pris en compte l'amortissement d'un vehicule qui dépend surtout du cout de la réalisation et de la vétusté des batteries.

Les cycles motorisés électrique seront certainement un de nos transports alternatifs dans l'horizon de la transition énergétique. **Le véhicule électrique est un très bon système pédagogique car il peut être utilisé par tous les étudiants sans problème de sécurité. En pédalant, l'étudiant peut s'identifier au moto variateur et se représenter la valeur d'une puissance. Ce système pédagogique utilise de nombreux modules du génie électrique (convertisseur d'énergie, batterie, moteur, variateur, régulation, électronique, signalisation, instrumentation, capteur, mathématique, mécanique...)**

9. Références

- [1] A.Sivert, T.lequeu "Je construis mon véhicule électrique", édition Dunod, 2013, pp 140.
- [2] A.Sivert "Le velo électrique » Revue des départements Genie électrique & informatique GESI N°80, Decembre 2012, p26,33
- [3] 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
- [4] 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
- [5] Samuel violin « le velo à assistance électrique » les cahiers de l'instrumentation N°9 Chauvin Arnoux octobre 2010
- [6] A.Sivert, "Le velo électrique", iut en ligne : <http://public.iutenligne.net/etudes-et-realizations/sivert/veloelec/> 2011, 6 pages
- [7] site web IUT Aisne : réalisation de véhicule électrique <http://aisne02geii.e-kart.fr/>
- [8] Arnaud Sivert, Franck Betin, Jean-Paul Bécar "A Fuzzy Logic Application for Go-Kart: a Battery Charger" EVER Monaco, 2011, 6 pages