

LE VÉLO ÉLECTRIQUE

Arnaud SIVERT, E-mail : arnaud.sivert@iut.u-picardie.fr

Institut Universitaire de Technologie de l'Aisne département Génie Électrique - I.U.T GELL, 13 av. F.Mitterrand, 02880 Cuffies Soissons, France

Laboratoire des Technologies innovantes : Energies électrique et système associés

Le vélo 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 [3,4,5,8] : moteur, variateur, régulation, électronique, capteur, instrumentation, mathématique, mécanique... De plus, les vélos électriques extrêmes sont peu onéreux et très médiatiques car on ne les trouve pas dans le commerce.

En 2010, un **challenge national du vélo électrique** s'est créé en parallèle avec le festival de karting électrique à Vierzon. L'objectif de ce challenge convivial est de partager ces connaissances et de comparer les choix de chacun. Mais, le nombre de participants reste faible pour l'instant. De plus, des volontaires sont recherchés pour faire perdurer ce challenge de vélo électrique.

Le vélo électrique devient un acteur nouveau pour le transport dans nos villes encombrées. Le vélo à assistance électrique n'a pas besoin d'assurance, mais doit être limité en puissance à 250W et en vitesse à 25 km/h en Europe. Par contre celle-ci est de 33 km/h aux Etats Unis. Mais, il est possible de réaliser des vélos moteurs à 60 km/h en contractant une assurance avec une puissance de moteur inférieur à 4000W. Ces vélos ont un compromis difficile entre le poids, la puissance, l'autonomie, et le prix. Ces vélos ont pu être réalisés grâce aux nouvelles batteries li po. Mais, pour augmenter la durée de vie des batteries qui représente 35% du prix du vélo, nous allons démontrer les avantages d'une commande à puissance moteur constante, par rapport à une commande à force motrice constante. Les avantages de cette commande peuvent être appliqués à n'importe quel véhicule électrique.

Dans un premier temps, nous présenterons des exemples de vélos électriques. Puis, nous exposerons la puissance résistante en fonction de la vitesse. Enfin, nous terminerons par une comparaison du prix de l'énergie entre un véhicule thermique et électrique.

1. Présentation de nos vélos électriques

Nos vélos peuvent aller à 55 km/h sur plat pour le plus puissant. L'accélération est de 4 secondes pour atteindre 36 km/h. Le courant max, la vitesse max et le temps d'accélération peuvent être paramétré. En 2010, le coût de nos vélos était de 1400 € avec l'instrumentation pour une puissance de 1500 W. En 2011, le coût est passé à 1000 €. Ces vélos n'utilisent pas l'assistance au pédalage mais seulement une poignée accélératrice.

Ce sont tous des VTT avec des roues 26'' avec freins à disque BB7 car le cadre et les jantes sont robustes. Les moteurs de vélos sont des motorisations brushless roue qui ont des puissances massives très importantes mais il est possible d'utiliser des moteurs outrunner brushless de 4000W

Certains de nos variateurs (1500W en continu, 60V max, 40A max, 2400W max) permettent de freiner électriquement et de recharger la batterie dans les descentes. Notre chargeur de batterie « maison » permet de recharger à 10 A et d'équilibrer les batteries li-po.

Nous allons à présent quantifier mathématiquement le vélo électrique pour en connaître ces caractéristiques et comprendre son pilotage. Dans un souci de simplicité, nous ne rentrerons pas dans le détail des pertes mécaniques du moteur, de la commande (régulation de vitesse et courant), de l'électronique de puissance ou des résistances internes des batteries, ...

Par contre, il est possible de voir plus en détail l'étude de véhicules électrique effectués sur le site web <http://aisne02geii.e-kart.fr/> [1]



Fig 1 : Nos vélos électrique de 2011 allant de 500W à 1500W.

2. Force et puissance motrice en régime établi de vitesse

En régime établi de vitesse, la force motrice est égale à la force résistance. Cette force dépend de la force de roulement, de la pente et des frottements de l'air. Leurs équations respectives sont :

$$F_{\text{résistance}} \text{ (N)} = F_{\text{Roulement}} + F_p + F_A \quad (1)$$

$$F_p \text{ (N)} = M \text{ (kg)} \cdot g \cdot \text{pente} \text{ (%) } \quad (2)$$

$$F_A \text{ (N)} = f_a \cdot [V \text{ (Km/h)} + V_{\text{vent}}]^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot C_x \cdot (V + V_{\text{vent}})^2 \quad (3)$$

Les forces de roulement dépendent du type de pneu, type de chaussée... elles sont représentées par le coefficient k_f . Elles sont négligeables par rapport à la force de l'air qui dépend de la surface d'air S traverser, des turbulences donc du C_x (3). Sur la figure 2, la puissance absorbée mesuré par nos moteurs électriques est représenté en trait plein. Les traits pointillés correspondent à l'estimation mathématique.

En régime établi de vitesse, la puissance résistive (4) correspond à la puissance moteur avec un rendement d'un peu près de 80%, correspondant à l'équation (6).

Sur la figure 2, on peut aussi observer la puissance absorbée avec un vélo horizontal [1,7] non caréné qui a moins de surface de pénétration dans l'air par rapport à un VTT donc demande moins de puissance. La puissance résistive peut être déterminée par les équations suivantes :

$$P_{\text{résist}} \text{ (W)} = F_{\text{résistance}} \text{ (N)} \cdot \frac{V \text{ (km/h)}}{3,6} \quad (4)$$

$$P_{\text{résist}} \text{ (W)} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot C_x \cdot V^3 + M \cdot g \cdot (k_f + \text{pente}) \cdot V \quad (5)$$

$$P_{\text{résist}} \text{ (W)} = P_{\text{humane}} + (P_{\text{abs}} \text{ moteur} \cdot \eta_{\text{moteur}}) \quad (6)$$

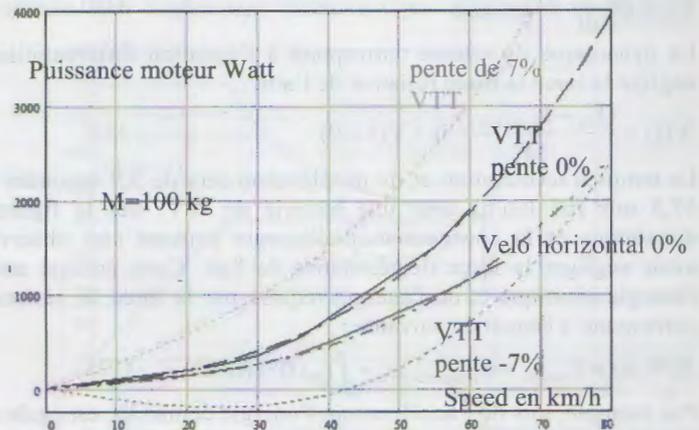


Fig 2 : Puissance moteur en fonction de la vitesse et pente VTT [$f_a=0,0066 \text{ (N/km.h}^{-1})^2$, $k_f=0,005 \text{ N}$], Horizontal bike non careen [$f_a=0,004 \text{ (N/km.h}^{-1})^2$, $k_f=0,007 \text{ N}$]



Fig 3 : velo couché (résistance à l'aire faible) (2012)

La puissance moyenne d'un humain est de 150W à 300W pour une vitesse de pédalier de 10 tr/mn à 100 tr/mn. D'ailleurs, un cycliste adapte son braquet au relief afin de pouvoir pédaler à sa cadence grâce au dérailleur.

Le braquet permet d'avoir une puissance humaine et une vitesse de pédalage constante en fonction de la puissance résistante. Maintenant que la puissance résistance est connue, la force d'accélération pour démarrer le véhicule doit être étudiée. Le moteur est souvent contrôlé en utilisant la force constante. Nous allons voir les dynamiques avec ce type de commande.

3. Commande avec force constante en régime transitoire

Nous allons utiliser la force constante pour accélérer et décélérer le véhicule. Ces forces sont limitées par les valeurs de l'intensité du moteur qui est configuré dans le contrôleur. Le cycliste fixe la référence (couple ou vitesse) du moteur avec la poignée d'accélérateur. Les relations électro mécaniques simplifiées du moteur sont:

$$V \text{ (m.s}^{-1}\text{)} = U_m / k = \alpha \cdot U_{\text{Batt}} / k \quad (7) \quad F_m \text{ (N)} = I_m \cdot k \cdot \eta_{\text{moteur}} \quad (8)$$

Avec U_m et I_m tension et courant moteur, η rendement. Le coefficient α varie de 0 à 100%, il correspond à la modulation de largeur d'impulsion fournie par le contrôleur, donc à la variation de la vitesse.

La puissance mécanique et électrique sont reliées par l'équation suivante :

$$P \text{ (W)} = F_{\text{résistive}} \cdot v(t) = \alpha \cdot U_{\text{Batt}} \cdot I_{\text{Batt}} \cdot \eta_{\text{moteur}} \quad (9) \quad \text{Avec } U_{\text{batt}} \text{ et } I_{\text{batt}} \text{ tension et courant batterie.}$$

Par simplification en régime établi de vitesse, la force de résistance sera considérée comme constante à 30 N, la masse du vélo et du cycliste est de 100 kg. On peut voir dans la figure 4 que la limite de l'intensité moteur est configuré pour démarrer à 80 A. Donc, la force motrice au démarrage sera de 328 N car k est égal à 4,1 (pour notre moteur). La puissance max est de 5700W car la batterie a une tension de 72V pour atteindre la vitesse de 17,5m/s.

La dynamique de la vitesse est imposée par l'équation fondamentale de la mécanique :

$$F_m = M \frac{dV}{dt} + F_{Resistant} \quad (10)$$

La dynamique de vitesse correspond à l'équation différentielle suivante si on néglige la force de la force résistive de l'air :

$$V(t) = \frac{(F_m - F_{resistant})}{M} \cdot t + V(t=0) \quad (11)$$

Le temps d'accélération et de décélération sera de 5,9 secondes pour atteindre 17,5 m/s (63 km/h) avec une batterie de 72V. Sur la figure 4, la vitesse dynamique et la consommation d'énergie peuvent être observées sans pour avoir 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. L'énergie correspond à l'équation suivante :

$$E(W.H) = E_{kinetic} + E_{force\ resistive} = \int F_m(t) \cdot v(t) \cdot dt \quad (12)$$

Par exemple, lors de l'accélération, l'énergie demandée est égale à :

$$E(W.H) = \frac{1}{2} M \cdot V^2 + F_{resistant} \cdot \frac{V}{t_{acc}} \cdot \frac{t^2}{2} = 4,7 \quad (13)$$

On peut remarquer que l'énergie récupérée au freinage correspond presque à l'énergie de l'accélération évidemment à la force résistante près.

On peut remarquer sur la figure 4a, le pic d'intensité devant être fournis par les batteries pendant l'accélération et lors de la régénération. Mais, toutes les batteries sont limitées par un taux de courants de décharge et de charge de manière à ne pas les détruire.

Donc, il y a des compromis entre la dynamique souhaitée et les courants maximum autorisés par la batterie

Le tableau suivant montre que le prix d'un accumulateur en fonction du taux de décharge.

Table 1 : Comparison of batteries different 48V

Kinds of battery li-po	Size & Volume cm ³	Mass kg	Price 2011	charge rate max	discharge rate max	R
10 A.H 12S	(1*10.6*10.2) 1300	2.5 kg	420 €	10 A= 1C	30 A= 3C	1 mΩ
13 A.H 12S	(0.6*20.8*13) 2000	3.9 kg	620 €	20 A= 1.5C	104 A= 8C	? mΩ
12 A.H 12S	(0.8*20.8*13) 2600	4.3 kg	800 €	24 A= 2 C	180 A= 15 C	? mΩ

Ce tableau permet d'observer que le poids et de volume augmente lorsque le taux de décharge augmente [2,8]. En outre, le courant de régénération doit être limité par le taux de charge de batterie. Pour minimiser les courants sortants et entrants des batteries, nous allons voir que la commande de puissance constante est plus appropriée.

4. Variateur de moteur à puissance constante

Lorsque le courant de la batterie est limité, le vélo fonctionne à puissance moteur constant $P_{m\ limit}$. Pour connaître les dynamiques du vélo, il faut donc résoudre l'équation différentielle (14). En négligeant la force résistante, la résolution de l'équation (14) peut être résolue et donne la dynamique de vitesse (15) et du déplacement (16)

$$\frac{P_{m\ limit}}{V} = M \frac{dV}{dt} + F_{Resistant} \quad (14) \quad V(m/s) = \sqrt{\frac{2 \cdot P_{m\ limit}}{M} \cdot t^{1/2}} \quad (15) \quad D(m) = \sqrt{\frac{2 \cdot P_{m\ limit}}{M}} \cdot \frac{2}{3} \cdot t^{3/2} \quad (16)$$

Si la force résistante n'est plus négligée, l'équation différentielle n'est pas résoluble donc elle sera simulée comme sur la figure 4 pour comparer les avantages des deux commandes.

Au démarrage, si on limite la puissance à 2880W (72V, 40A) correspondant à la puissance moyenne de la figure 4a, alors de l'accélération, 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 6 et 7a).

Mais avec la commande à puissance constante, la distance parcourue sera de 70 m à la place de 55m (figure 7c). En effet, la vitesse en fonction du temps à puissance constante est supérieure à celle de la force motrice constante comme on peut l'observer sur la figure 7b.

Donc, les dynamiques à puissance constantes sont plus importantes et le courant batterie est constant à 40A pendant toute l'accélération et n'atteint plus 80 A (figure 4a). Par conséquent, il y a une sollicitation de la demande du courant de la batterie bien plus faible.

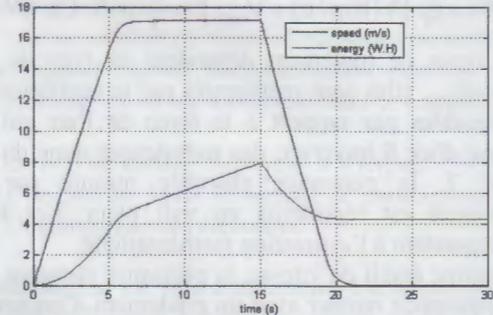
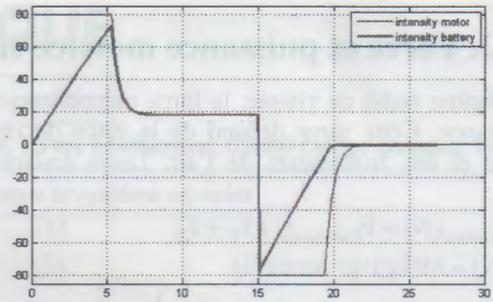


Fig. 4a) Limitation de l'intensité moteur
Fig. 4b) dynamique de la vitesse et consommation de l'énergie pour une commande à force constante.

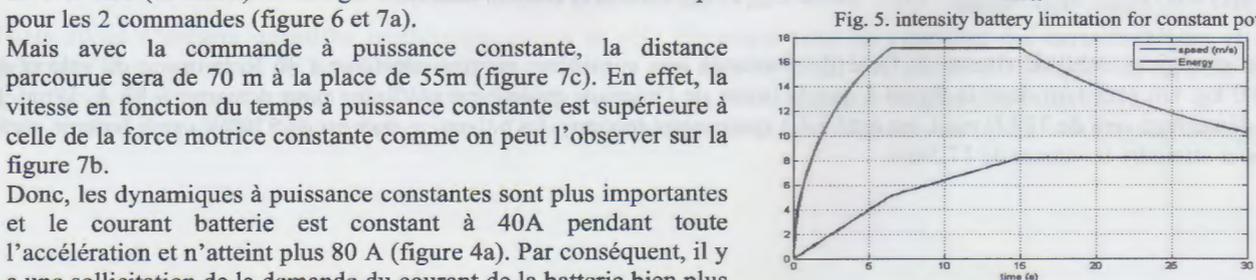
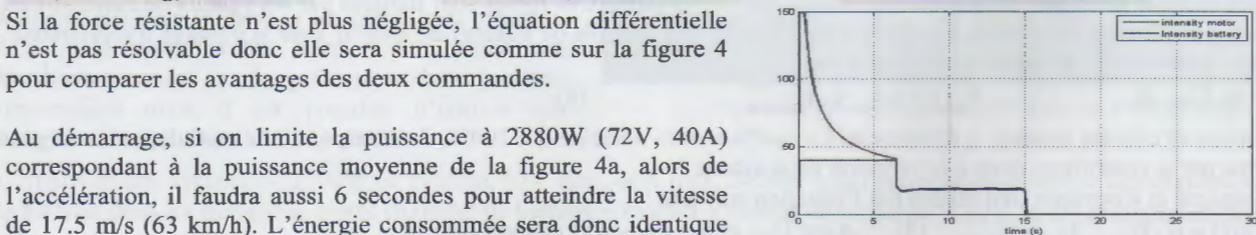


Fig. 6. constant power and dynamic speed, energy

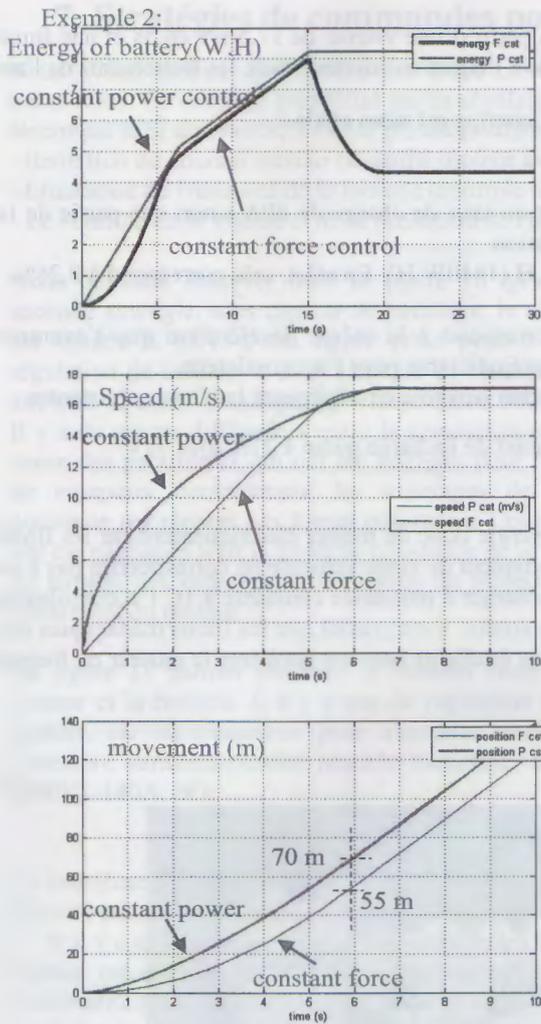


Fig 7. Energy, speed, distance for control power and constant force

Néanmoins, l'intensité du moteur est très importante pour les faibles vitesses. Pour ne pas surdimensionner les transistors du contrôleur, l'intensité du moteur peut être limitée à 150A. La dynamique de cette limitation peut être vue sur la figure 8.

5. Le freinage électrique et la récupération d'énergie

Toutes les motos variateurs peuvent retourner l'énergie aux batteries. Mais il faut faire attention que les batteries ne puissent recevoir cette énergie sans être détruites donc il faut utiliser un BMS (battery management security). Un moteur ne pourra freiner que sa puissance, donc un freinage mécanique d'urgence sera toujours nécessaire. Par conséquent, il faut anticiper le freinage électrique pour récupérer un maximum d'énergie sans utiliser l'énergie mécanique.

- En plaine, la récupération est seulement de 5% donc elle n'est pas valable par rapport aux coûts supplémentaires de la régulation électrique de la régénération. Ce taux correspond aussi aux temps de freinage par rapport aux temps de roulement, donc très faible.
- En montagne, il est possible de monter un col de 20 km à 30 km/h puis de le redescendre en pédalant fortement est de recharger votre batterie toujours à 30 km/h. Mais souvent, on descend plutôt à 70 km/h, sans pédalage le freinage électrique se fait juste avant les épingles à cheveux.

3 exemples vont être présentés sur un VTT de masse 100kg cycliste compris :

Exemple 1:

Avec la courbe figure 2 pour une descente de 7 %, la récupération est de 200W à 30 km/h. En pédalant, 200W peuvent être additionnés. Avec un moto variateur qui a un rendement de 70%, la récupération atteindra donc 280W et 120 W perdu en chaleur dans le moteur et variateur.

Avec une vitesse de 42 km/h, seul les 200W de pédalage pourront être récupérés car la puissance de la descente est perdue dans les frottements de l'air, donc la récupération diminue à 140W.

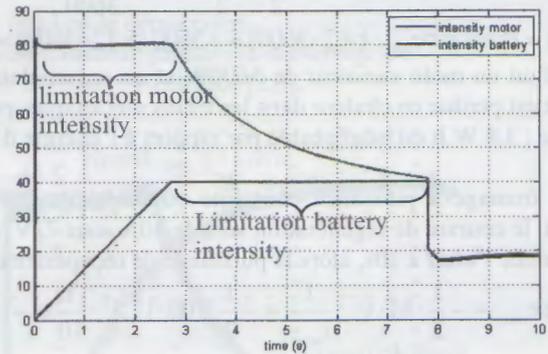
La récupération passe à 0W pour la vitesse de 50 km/h toujours en pédalant malgré la descente de 7%.

Lorsque le courant du moteur est limité, cela provoque une rampe de courant sur la batterie jusqu'à ce qu'il atteigne 40A correspondant à la puissance constante. Ainsi la dynamique de la vitesse sera légèrement inférieure par rapport à la figure 7

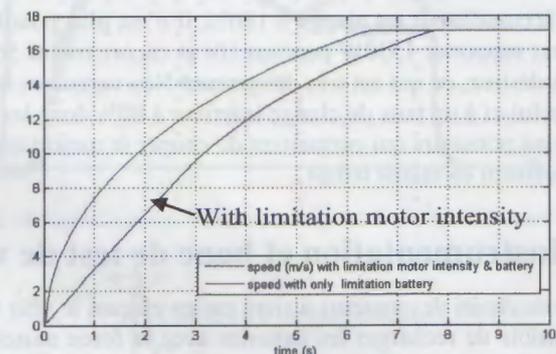
a)

b)

c)



a)



b)

Fig 8. Motor intensity and battery for constant power control with limitation intensity motor priority.

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. Par conséquent, un relais thermique est nécessaire pour protéger le moteur. 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 des capteurs de température pour surveiller les batteries et le moteur.

La décélération de la figure 4.b à force de freinage constante permet de s'arrêter à partir d'une vitesse de 17.5m/s en 5s et une force résistance considérée comme constante de 30N. L'énergie de récupération sera égale à l'équation suivante avec les frottements de l'air

$$\text{négligé : } E \text{ (W.H)} = (F_{\text{résistant}} \cdot v \cdot \frac{t_{\text{desc}}}{2} - \frac{1}{2} M \cdot v^2) \cdot \frac{1}{3600} = -3.8 \quad (17) \text{ mais l'énergie est aussi égale :}$$

$$E \text{ (W.H)} = \text{Puissance}_{\text{max}} \cdot t / (2 \cdot 3600) = -5600 \cdot 5 / (2 \cdot 3600) = -3.8 \quad (18)$$

Donc, il faut un moto variateur de 5600W et un accumulateur de 72V qui permet un taux de charge de 80A sinon une partie de la puissance est perdue en chaleur dans les freins mécaniques pour avoir cette décélération.

Remarque : 3.8 W.h est négligeable par rapport à l'énergie d'une batterie 72V, 20A.H (1440W.H). En effet, cela correspond à 0.26%.

Exemple 3:

Avec un freinage à puissance constante ou limité de 2880W sur 5s, ce qui correspond à la même décélération que l'exemple précédent, le courant de régénération sera de 40A sous 72V, par conséquent moins préjudiciable pour l'accumulateur.

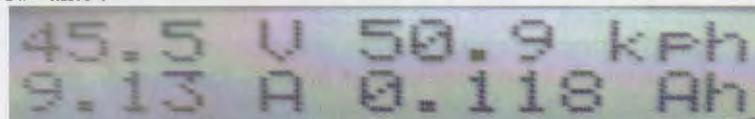
Si on diminue l'arrêt à 10s, alors la puissance de récupération correspondra à l'équation suivante en négligeant les forces résistantes

$$\text{Puissance}_{\text{moy}} \approx -\frac{1}{2} \cdot M \cdot v^2 \cdot \frac{1}{t_{\text{arrêt}}} = -\frac{1}{2} \cdot 100 \cdot 17,5^2 \cdot \frac{1}{10} \approx -1530W \quad \text{Donc le courant de recharge passe à 21A sous 72V}$$

Si votre accumulateur est chargé à 100%, il n'est plus possible de récupérer de l'énergie donc de freiner électriquement car les BMS ne peuvent supporter 1530W pendant 10s et encore moins 5600W. Donc, le comportement de votre véhicule ne correspondra pas à ce que vous désirez, ce qui est très dangereux. Nos variateurs sont paramétrés pour recharger à puissance constante à 1C l'accumulateur lorsque celui-ci à un taux de charge inférieur à 80% donc les BMS sont inutiles. Par contre, il est crucial que les freins mécaniques ont des boutons poussoirs qui permettent de couper la motorisation électrique. Sinon, les étudiants peuvent accélérer le moteur en freiner mécaniquement en même temps.

6. Instrumentation et banc de test de vélo électrique

Nous avons choisi des moteurs arrière car en plaçant le vélo sur un galet, il est possible de recharger les batteries avec la force musculaire. Nous avons placé sur ce galet une génératrice [2] qui permet de tester le moteur (figure 9). Une instrumentation embarquée permet de mesurer respectivement tension, vitesse, courant, énergie en A.H, par l'intermédiaire d'un afficheur LCD que l'on peut observer sur la figure suivante :



On peut mesurer les régimes transitoires du vélo, vitesse et courant batterie en fonction du temps avec un oscilloscope, ou une pince watt métrique enregistreuse.

En modélisme, il existe des instrumentations embarquées tel que powerlog, cellolog, elogger qui permettent d'enregistrer toutes les caractéristique du vélo.

Dans notre cas, La vitesse est mesurée par l'intermédiaire d'un tachymètre et d'un aimant sur la roue qui donne une tension analogique de la vitesse grâce à un microcontrôleur. Mais pour les basses vitesses, le tachymètre entraîne un retard d'information. En effet, le temps pour que la roue fasse un tour correspond à l'équation suivante:

$$\text{temps / tour} = \pi \cdot 26'' \cdot 0.0254 \cdot 3.6 / V(\text{km/h}) \quad (17)$$

Pour une vitesse de 7 km/h, le retard d'affichage et de l'oscilloscope peut atteindre à 1.5s.

L'avantage de ne pas avoir de capteur d'assistance et d'utiliser un banc de test, mais surtout de connaître la puissance demandée par le vélo avec et sans pédalage. Cette différence correspond à la puissance musculaire. Mais avec le banc d'essai, l'inertie correspond au poids du moteur (7kg) et non à celui du cycliste (100 kg) . Pour bien identifier les forces et puissances motrices, il faut étudier le vélo électrique sur route. Les tests permettent de donner un sens aux valeurs de force, puissance, accélération à l'échelle humaine.

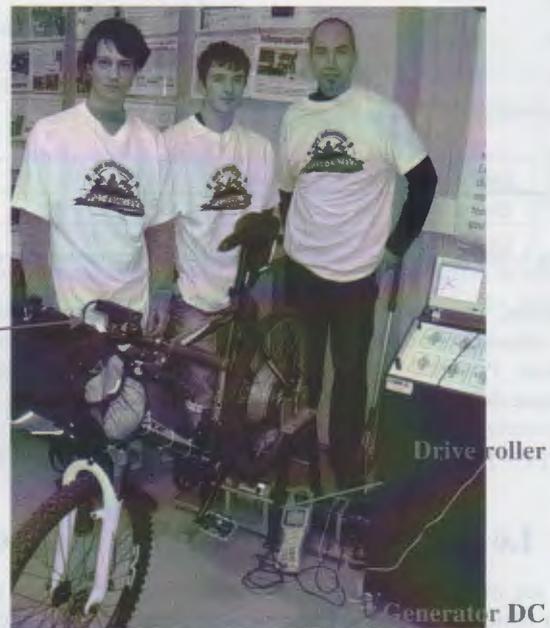


Figure 9 : vélo électrique sur banc de test

7. Stratégies de commandes pour moteur brushless de vélo

Nous avons montré que l'utilisation d'une commande de puissance constante minimise le courant de pointe lors des régimes transitoires. Ce contrôle est réalisé par la régulation de l'intensité batterie et non sur le moteur. Pour commander le moteur d'un vélo électrique sans assistance, il existe plusieurs stratégies telles que:

- limitation du courant moteur (contrôle moteur avec une force constante pendant le démarrage),
- Limitation de l'intensité de la batterie (contrôle moteur avec une puissance constante pendant le démarrage),
- Le contrôle de la vitesse et de la limitation de l'intensité de la batterie avec freinage électrique [2,3].

Nous pouvons observer dans la figure 10 qu'en utilisant la seconde stratégie, sans capteur de pédalage, le courant batterie est limitée à 43A. Cette figure nous permet d'observer la régulation de courant et la dynamique de vitesse qui atteint 63 km/h en 12 s sans pédalage. La vitesse atteint 50 km/h en 7s.

Il y a de petites différences entre la simulation et la pratique à cause des paramètres qui ont été négligés pour nous permettre de comparer correctement les avantages de la puissance constante par rapport aux forces constantes. Les paramètres qui ont été négligés sont la force de résistance de la route, la chute de tension des batteries, la résistance du moteur et de fils, le rendement du moteur ...

La figure 11 permet observer la relation entre l'intensité du moteur et la batterie. Il n'y a pas de régulation sur le courant moteur, car les transistors pour alimenter le moteur ont été fortement surdimensionnés (double transistors mos IRF 4110 (100V), 180A, 6€).

La troisième stratégie permet de gérer facilement un capteur de sécurité placé sur le pédalier comme indiqué ci dessous :

- S'il y a un pédalage nulle ou 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

Nous pouvons observer dans la figure 12 la troisième stratégie 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.

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.

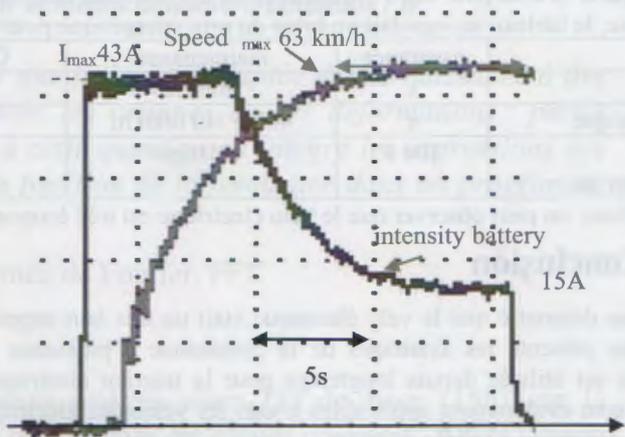


Fig. 10. Second strategy : intensity battery 40 A and dynamic speed

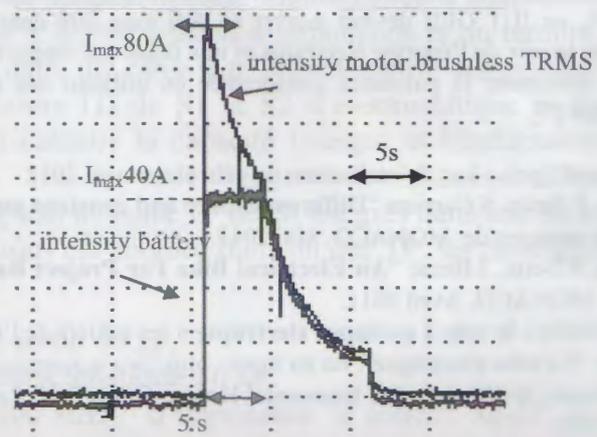


Fig. 11. second strategy : intensity battery and motor

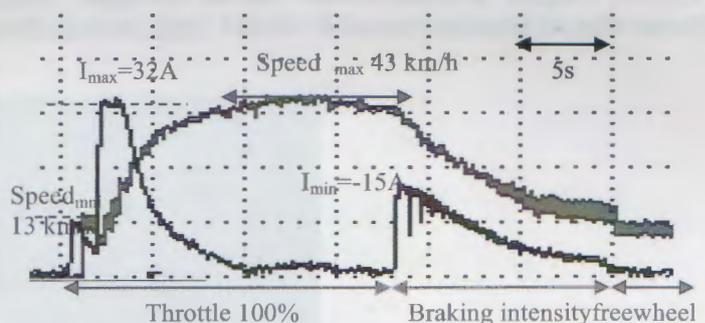


Fig 12: third strategy : regulation speed and limitation battery with a voltage battery de 48V

8. Comparaison du prix de l'énergie pour différents types de véhicules

Un bon compromis pour un moteur de 1500W est une tension accumulateur entre 48V et 72V avec une capacité énergétique de 10 à 15 A.H. Un accumulateur li-po de 500 W.h peut supporter 500 à 2500 cycles de charge et décharge pour une autonomie de 60 km sans pédalage à 100 km avec pédalage à 40 km/h. Donc, le vélo fera dans le cas le plus défavorable 40.10³ km voir 200.10³ km avec le même accumulateur. Nous n'utilisons pas de BMS (batterie management de sécurité) qui limite le courant de décharge puisque le variateur le fait. Par contre, le chargeur d'accumulateur mesure toutes les tensions des éléments pour que tous les éléments soient chargés à 100% sans dépasser leurs tensions maximales.

Le tarif domestique de l'électricité en France est de 0,08 € pour 1 kWh, donc 0,04 € pour 100km sans pédalage à 40 km/h. Si l'on prend en compte le prix des batteries en 2011 et leur durée de vie, le coût pour faire 100 km passe à 1,2€ voir à 0,2€ pour 2500 cycles de charge. Après avoir déterminé le coût énergétique du vélo électrique, nous allons le comparer à d'autres formes d'énergies pour savoir si le vélo est vraiment viable.

On peut évaluer l'énergie électrique par rapport au pétrole. Le vélo électrique consomme 500 W.H pour faire 60 km à 40 km/H. 500 W.H correspond à 0.18 litre d'essence pour un moteur thermique avec un rendement de 30 %.

Pour comparer le coût pour faire 100km avec un cyclomoteur de 50 cm³, il faut ajouter l'assurance et l'entretien.

En synthèse, le tableau suivant fait un bilan du prix énergétique pour faire 100 km :

Véhicule	assurance	maintenance	Consommation	prix / 100km
Vélo seul	x	muscle	0,006 €/kcal	6,5 €
Vélo électrique	x	420 € /40 000km	0,08 €/kW.H	1,2 €
50 cm ³	400 €	vidange	5 litre/100km	13 €
5000km par an			1 litre =1€	

Sur ce tableau, on peut observer que le vélo électrique est très économique malgré le prix de l'accumulateur.

9. Conclusion

Nous avons démontré que le vélo électrique était un très bon support pédagogique pour nos étudiants de génie électrique. De plus, nous avons présenté les avantages de la commande à puissance constante du moteur permettant de protéger la batterie. Cette commande est utilisée depuis longtemps pour la traction électrique des chemins de fer. Les bénéfices du contrôle de puissance constante sont évidemment applicables à tous les véhicules électriques, toutefois, de nombreux constructeurs offrent seulement des variateurs de vitesse à couple constant.

Nous avons aussi prouvé qu'il était possible de réaliser des vélos électriques avec des vitesses honorables (car nos étudiants apprécient seulement les engins extrêmes avec une forte accélération). En 2011, Le record de vitesse en vélo électrique [9] n'est que de 113 km/h, un IUT GEII devrait relever se défi pour être dans le Guinness World Record. Dans cet article, nous avons aussi démontré que le prix de l'énergie électrique est très faible par rapport à l'énergie du pétrole. Pour encore économiser de l'énergie, il est possible de minimiser la puissance consommée en utilisant des tricycles avec des coques pour limiter la prise au vent appelés « Vélo mobile » [7].

[1] <http://aisne02geii.e-kart.fr/> réalisation de vélo électrique, 2012

[2] 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.

[3] A.Sivert, F.Betin, J.Becar "An Electrical Bike For Project Based Learning Platform", EVER ecologic vehicles & renewable energies de MONACO, Avril 2011.

[4] Samuel violin « le velo à assistance électrique » les cahiers de l'instrumentation N°9 Chauvin Arnoux octobre 2010

[5] A.Sivert, "Le velo électrique", iut en ligne : http://www.iutenligne.net/ressources_search_fiche.php?id=1021 2011

[6] Benoit Rozel, Wilfried Frelin, Emmanuel Hoang, Gilles Feld, "charge simulator for Home Trainer", CETSIS'2005, Nancy, 25-27 octobre 2005

[7] Forum pour tout savoir sur les velos couchés <http://velorizantal.bbfr.net/t15952-kit-3000w>

[8] A.Sivert, T.lequeu "Je construis mon véhicule électrique", édition Dunod, à paraître début 2013

[9] Forum véhicule électrique (record de vitesse) : <http://www.evalbum.com/3406>, <http://www.evalbum.com/4302>