

# electric bicycle

**Abstract :** In this paper, the authors show that, using the electrical bike as an application, students can learn many concepts of electrical engineering or mechanical engineering such as forces determination, electrical drives, power electronics, speed variations, energy saving, instrumentation and so on. The main advantage of the electrical bike is that they can apply directly on this real system the theory that they have learned during courses. Indeed, the electrical bike is a simple but complete electro mechanical system that is suitable and attractive from an educational point of view.

Pour comprendre comment réagit une motorisation ou la choisir, il faut d'abord s'identifier à celle-ci. Or, le vélo électrique permet d'ajouter la force musculaire et la force motrice. Le vélo électrique permet au cycliste de se substituer au moteur et de mettre en application :

- des couples accélérateurs (inertie),
- des puissances motrices (frottement, identification des besoins),
- des transmissions mécaniques (réducteur de vitesse ou augmentateur de couple),
- des bilans de puissance électrique et consommation énergie,
- de la thermie (échauffement des moteurs et de l'électronique),
- des couples décélérateur (récupération d'énergie),
- des choix techniques et des compromis.

Le vélo électrique permet d'appliquer l'ensemble de ces fondamentaux pour appréhender les problèmes de tous systèmes motorisés et de comprendre notre environnement fortement motorisé (domestique et industriel). De plus, le vélo électrique devient un acteur nouveau dans le transport de nos villes encombrées. Aujourd'hui seule la législation freine l'expansion du vélo électrique en France (limitation de la vitesse à 25 km/h et de la puissance à 250W).

Pour découvrir l'exploitation pédagogique effectuée avec un vélo électrique, dans un premier temps, nous présenterons des exemples de vélos électriques hors normes. Puis, nous exposerons la puissance résistante en fonction de la vitesse, les forces demandées lors des régimes transitoires, les courants demandés aux batteries, pour en déduire la consommation et l'autonomie du véhicule. Enfin, nous aborderons les choix et les compromis de nos réalisations. Enfin, nous dévoilerons les avantages de l'utilisation pédagogique de ce système ainsi que les cursus visés.

## 1. Présentation de nos vélos électriques

Pour intéresser et impressionner nos étudiants, nos vélos peuvent aller à 50 km/h sur plat mais aussi avec des pentes à 5%. L'accélération est de 4 secondes pour atteindre 36 km/h. le courant max, la vitesse max et le temps d'accélération peuvent être paramétrés. En 2010, Le coût de nos vélos était de 1400 € avec l'instrumentation. En 2011, le coût est passé à 1000 €. Ces vélos n'utilisent pas l'assistance au pédalage seulement une poignée accélératrice.



Fig 0 : Our electric bikes of 2010 of 500 and 1000W.

Ce sont tous VTT avec des roues 26'' avec freins à disque car le cadre et les jantes sont robustes. Les vélos appartiennent à l'association des étudiants pour ne pas mettre en responsabilité l'établissement scolaire. Les vélos peuvent rouler uniquement sur voies privées. Il est possible de rouler sur la route mais avec une cotisation tous risques de 200 à 300 € l'année. Lors de démonstration ou challenge, il faut une cotisation de 8 € par semaine pour une assurance ergin motorisé de loisir inférieur à 50 cm<sup>3</sup>.

Les moteurs de vélos sont des motorisations brushless qui ont des puissances massiques très importantes. Ils peuvent être simples à expliquer car la vitesse dépend de la tension et la force motrice du courant. Seul, le variateur de ces moteurs est relativement complexe pour des autodidactes. Le variateur (1000W, 60V, 40Amax) permet 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 en détail l'étude de nos véhicules électrique effectués par nos étudiants sur le site web <http://aisne02geii.e-kart.fr/> [1]

## 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 :

$$F_{\text{resistance}} (N) = F_{\text{Roulement}} + F_p + F_A \quad (0)$$

$$F_p (N) = M(\text{kg}) \cdot g \cdot \text{pente}(\%) \quad (1)$$

$$F_A (N) = f \cdot [V(\text{Km/h}) + V_{\text{vent}}] \quad (2)$$

La force de roulement dépend du type de pneu, type de chaussée, du poids du cycliste. Elle est négligeable par rapport à la force de l'air. La puissance demandée peut être observée sur la figure 1. Elle correspond en régime établi de vitesse à l'équation suivante :

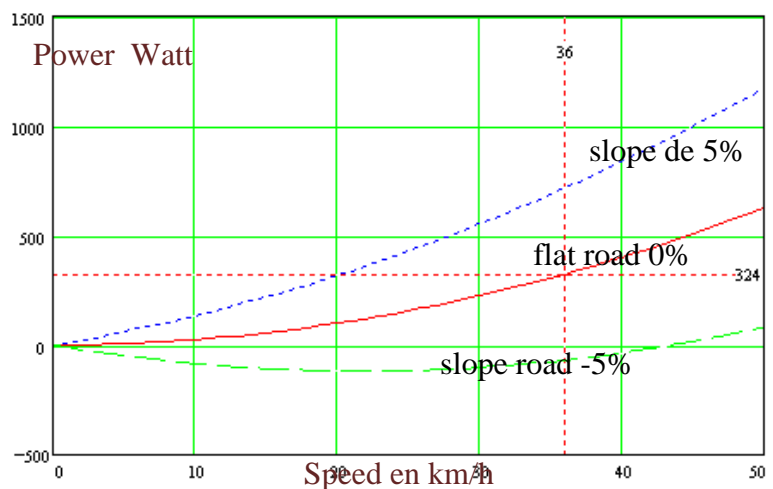


Fig 1 : Power motor according to of speed and slope of road (M=100kg, f=0,25 N/km.h<sup>-1</sup>)

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

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 à partir de l'équation suivante :

$$\text{Force}_{\text{pedalage}} = \frac{\text{Dent}_{\text{pedalier}}}{\text{Dent}_{\text{cassette}}} \cdot \frac{\text{Puissance}_{\text{humaine}}}{\frac{V(\text{km/h})}{3,6} \cdot \text{Rayon}_{\text{pedalier}}} \cdot \frac{26}{2} \cdot 0,0254 = \frac{\text{Dent}_{\text{pedalier}}}{\text{Dent}_{\text{cassette}}} \cdot \frac{\text{Force}_{\text{resistance}}}{\text{Rayon}_{\text{pedalier}}} \cdot 0,33 \quad (4)$$

Le braquet permet d'avoir une puissance humaine et vitesse de pédalage constante en fonction de la puissance résistante. Maintenant que nous connaissons la puissance résistante, il faut une force accélératrice pour pouvoir démarrer le véhicule.

### 3. Force et puissance moteur en régime transitoire

Nous allons utiliser un profil de vitesse trapézoïdal (fig 2) afin de déterminer la force motrice pour accélérer le véhicule. Les temps d'accélération et de décélération peuvent être paramétrés dans le contrôleur. La force motrice correspond à l'équation fondamentale de la mécanique suivante :

$$F_m = M \frac{dV}{dt} + F_{Resistant} \quad (5)$$

On peut observer sur la figure 2 que l'accélération va demander une force motrice de 280N au démarrage et que la décélération va provoquer un freinage de -220N. Lors de l'accélération, La dynamique de vitesse correspond à l'équation différentielle de l'équation 5:

$$V(t) = \frac{(F_m - F_{Resistant})}{M} \cdot t + V(t=0) \quad (6)$$

A partir de ces forces, on peut déterminer la puissance motrice (3) et l'énergie absorbée. Cette énergie correspond à l'équation suivante :

$$Energie(W.H) = \int \frac{Puissance(mot(t))}{3600} \cdot dt \quad (7)$$

Cette énergie correspond évidemment à l'énergie cinétique et à l'énergie demandée par la force résistante. Elle correspond aussi à la force fois le déplacement :

$$E(W.H) = E_{cinétique} + E_{force\ resistant} = F_m \cdot d \quad (8)$$

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

$$E(W.H) = \frac{1}{2} M \cdot V^2 + F_{Resistant} \cdot \frac{V}{t_{acc}} \cdot \frac{t^2}{2} \quad (8bis)$$

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

Le contrôleur commande la vitesse du moteur par l'intermédiaire d'une poignée accélératrice. Les relations électromécaniques du moteur sont :

$$V(m.s^{-1}) = U_m / k = \alpha \cdot U_{Batt} / k \quad (9)$$

$$F_m(N) = I_m \cdot k \cdot \eta_{moteur} \quad (10)$$

Avec  $U_m$  et  $I_m$  tension et courant moteur,  $\eta$  rendement.

Le coefficient  $\alpha$  varie de 0 à 100%, il correspond à la modulation de largeur d'impulsion fournit par le contrôleur pour faire varier  $U_m$  donc la vitesse.

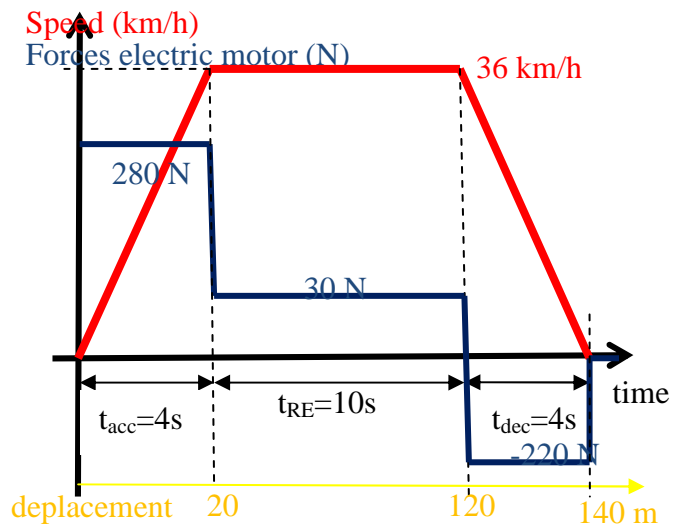


Fig 2 : speed and force motor resultant according to time for a mass  $M=100$  kg,  $F_{Resistant} = 30N$ .

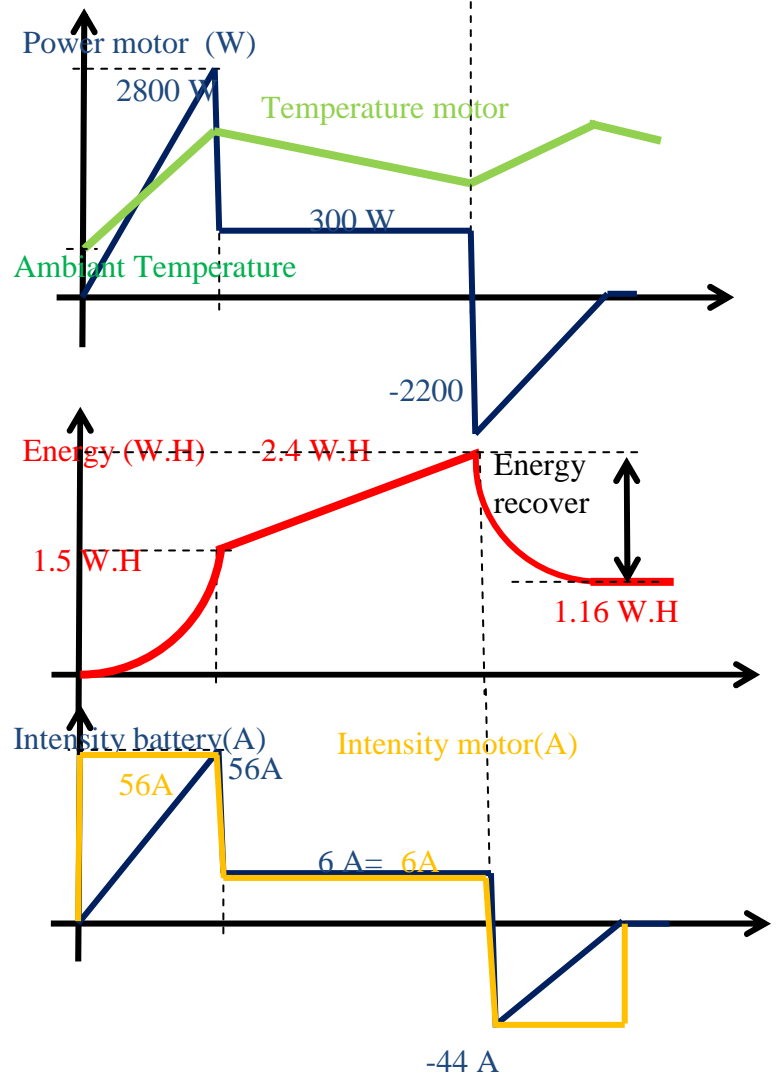


Fig 3 : Force, power, energy et intensity according to speed profile trapezoidal with voltage battery of 50V

Le terme  $k$  en (N/A) ou ( $V/m.s^{-1}$ ) dépend de la construction du moteur (nombre de spires, du champ magnétique des aimants...). Dans le cas de la figure 3, la vitesse maximale est atteinte pour 36 km/h avec une tension de batterie de 50V. Par conséquent, à partir de l'équation (7), il est très facile de déterminer le coefficient  $k$  qui est de 5.

Remarque, plus le terme  $k$  est grand et plus le moteur ira vite pour une certaine valeur de tension de batterie mais la force motrice sera plus faible lors du démarrage pour un courant limité. La force motrice d'un moteur électrique peut être très importante au démarrage donc celui-ci n'a pas besoin de boîte de vitesse comme pour le moteur thermique.

Dans un souci de simplicité, le rendement du moteur électrique est considéré comme constant en fonction de la vitesse. La puissance électrique absorbée par le moteur est égale à :

$$P_{\text{abs moteur}} (W) = U_{\text{Batt}} (V) \cdot \alpha \cdot I_m (A) = P_{\text{resistance}} / \eta_{\text{moteur}} \quad (11) \text{ avec } I_m \text{ courant moteur}$$

Le rendement du moteur est provoqué par des pertes mécaniques mais aussi par un échauffement du moteur créé par le courant dans les bobinages. Cet échauffement peut être fatal pour le moteur si la température des bobinages dépasse 100°C. Le rendement moteur est aux alentours de 70%.

Nous considérons que le rendement du contrôleur parfait (rendement constant approximatif de 95% donc négligé). Par conséquent, la puissance électrique des batteries correspond à l'équation suivante :

$$P_{\text{batt}} (W) = U_{\text{batt}} (V) \cdot I_{\text{Batt}} (A) = P_{\text{abs moteur}} / \eta_{\text{contrôleur}} \quad (12)$$

A partir de (9) et (10), le courant des batteries correspond donc à l'équation suivante :

$$I_{\text{Batt}} (A) = \alpha \cdot I_m \quad (13)$$

L'autonomie du vélo dépend de la capacité énergétique  $C_E$  (A.H) des batteries et correspond à l'équation suivante :

$$t_{\text{fonctionnement}} (H) = \frac{C_E (A.H) \cdot U_{\text{Batt}} (V)}{\text{Puissance absorbée moteur} (W)} = \frac{C_E}{I_{\text{Batt}} (A)} \quad (14)$$

Après avoir détaillé les forces motrices et les relations électromécaniques, les choix techniques et les compromis peuvent être exposés.

#### 4. Choix technique et compromis

Le choix du moteur est fonction de la puissance qu'il peut fournir et de la vitesse donc du terme  $k$  (9) pour une certaine tension de l'accumulateur. Le choix du contrôleur se détermine à partir du courant moteur en régime établi de vitesse mais aussi le courant maximal lors de l'accélération. Enfin le choix des batteries va dépendre du nombre d'éléments, du volume, de la masse, du prix mais aussi du taux de décharge qu'elles peuvent accepter. Chaque type de batterie a une certaine tension en fonction de sa composition. Donc, pour une batterie de 48V, il faudra un certain nombre d'éléments appelés  $S$ . L'élément électrochimique en fonction de sa fabrication est aussi limité en valeur du courant de charge. Or, celui-ci est important lors de la récupération d'énergie. Par conséquent, lors des courants de charge et de décharge important, l'accumulateur chauffe ce qui peut détruire les éléments ou diminuer leur durée de vie.

Le tableau suivant caractérise la technologie en 2010 d'un accumulateur de 48V 10A.H :

Type de battery	Volume $cm^3$	Mass	Price 2010	Price 2011	charge rate max	discharge rate max	Internal Resistance
Plomb <b>4S</b>	6000	20 kg	200 €	200 €	2A	10 A	?
Ni MH <b>40S</b>	2500	8 kg	550 €	550 €	5 A = 0.5C	10 A = 1C	?
li-po <b>12S</b>	1500	3 kg	450 €	220 €	10 A = 1C	100 A = 10C	1 $m\Omega$

A partir de ce tableau, on peut en conclure que seules les nouvelles batteries li-po peuvent être utilisées pour un vélo électrique. Evidemment, plus on veut aller vite et plus il faudra de tension donc d'éléments et plus le prix de l'accumulateur sera important. Par contre, plus la tension de l'accumulateur est importante pour une puissance résistante donnée et plus le courant fourni par l'accumulateur sera faible. Dans ce cas, le taux de décharge sera plus faible.

Pour limiter la valeur du courant de décharge de l'accumulateur, le contrôleur doit être paramétré pour un courant maximum au démarrage et un courant minimum au freinage. Il y aura donc un compromis entre ces courants extrêmes et les temps d'accélération et de décélération.

Un bon compromis pour un moteur 1000W est une tension accumulateur entre 48V et 72V avec une capacité énergétique de 10 à 15 A.H. Nos batteries li-po de 500 W.h peuvent supporter 500 à 2500 cycles

de charge et décharge pour une autonomie de 40 km sans pédalage à 80 km avec pédalage. Donc, le vélo fera dans le cas le plus défavorable  $20 \cdot 10^3$  km voir  $200 \cdot 10^3$  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 et les rééquilibre 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 0,1 € pour 100km sans pédalage. 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.

## 5. Comparaison du prix de l'énergie pour différent transport

On peut évaluer l'énergie électrique par rapport au pétrole et à l'alimentaire. Le vélo électrique consomme 500 W.H pour faire 40 km à 40 km/H. 500 W.H correspond à 433 Kcalories (250 g de pain, ou 150 g de fromage ou 3 bananes) et à 0.18 litre d'essence pour un moteur thermique avec un rendement de 30 %.

Une personne active doit consommer en moyenne par jour 2600 kcalories, avec 3 repas de 15 à 30 € soit 0,006 €/kcal. Mais, le plaisir de manger, de se dépenser n'a pas de prix et permet aux muscles de ne pas s'atrophier. Il faut savoir que 30% de l'énergie consommée par un muscle se transforme en force, le reste en chaleur humaine (70% de perte). Par conséquent, l'énergie alimentaire n'est pas bon marché et l'humain a un très mauvais rendement (comme le moteur thermique !).

Pour comparer le coût pour faire 100km avec un cyclomoteur de  $50 \text{ cm}^3$ , il faut ajouter l'assurance et l'entretien.

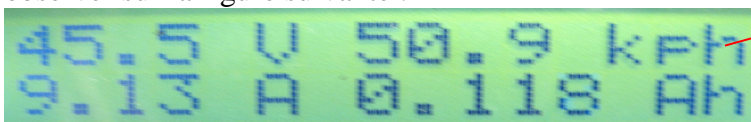
En synthèse, le tableau suivant fait un bilan du prix énergétique pour faire 100 km :

Véhicule	insurance	maintenancance	Consumer Price	Energy price / 100km
Vélo seul	x	muscle	0,006 €/kcal	6,5 €
Vélo électrique	x	220 € /20 000km	0,08 €/kW.H	1,2 €
$50 \text{ cm}^3$ 5000km by year	400 €	vidange	5 litre/100km 1 litre =1€	13 €

Sur ce tableau, on peut observer que le vélo électrique a le coût le plus faible malgré le prix de l'accumulateur. Au delà du coût énergétique pour bien identifier les forces et puissance motrices, il est possible d'étudier le vélo électrique sur un banc de charge. En effet, l'expérimentation permet de donner un sens aux valeurs de force et puissance à l'échelle humaine. Un banc de charge permet de tester la force musculaire comme dans une salle de sport et d'identifier les caractéristiques du moteur.

## 6. Instrumentation et banc de test de velo électrique

Nous avons choisi des moteurs arrières 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 (voir la figure 4). 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 :



Cet écran affiche la réserve d'énergie. 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.

Figure 4 : elec bike and testbed



Pour contrôler le moteur du vélo, il y a plusieurs stratégies :

- la limitation du courant moteur seulement ou des temps d'accélération et de décélération comme dans exemple du paragraphe 3,
- la régulation de la vitesse et limitation du courant moteur,
- la limitation du courant sortant de l'accumulateur et limitation de la vitesse.

La première solution permet d'avoir une force motrice constante mais il y a une pointe de courant de batterie importante.

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

- S'il y a un de pédalage nulle ou très faible entre 0 à 0,1 tr.s<sup>-1</sup>, 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<sup>-1</sup>, 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<sup>-1</sup>, la consigne de vitesse sera un % 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

On peut observer le fonctionnement de cette stratégie sur la figure 5. On retrouve approximativement les temps d'accélération et décélération avec les équations (5) et (10) en utilisant le banc de charge :

$$F_{\text{motrice}} = K \cdot I_{\text{moteur}} = 5 \cdot (15A) = 75N$$

$$t_{\text{dema}} = \frac{(V_{\text{final}} - V_{\text{init}}) \cdot M}{3,6 \cdot (F_m + F_R)} = \frac{(38 - 13) \cdot 7kg}{3,6 \cdot (75 - 23)} = 0,9s$$

$$t_{\text{decel}} = \frac{(V_{\text{final}} - V_{\text{init}}) \cdot M}{3,6 \cdot (F_m + F_R)} = \frac{(13 - 38) \cdot 7kg}{3,6 \cdot (-25 - 23)} = 0,8s$$

Avec le banc de charge, la masse correspond à celle du moteur et non plus celle du cycliste comme sur la figure 5.

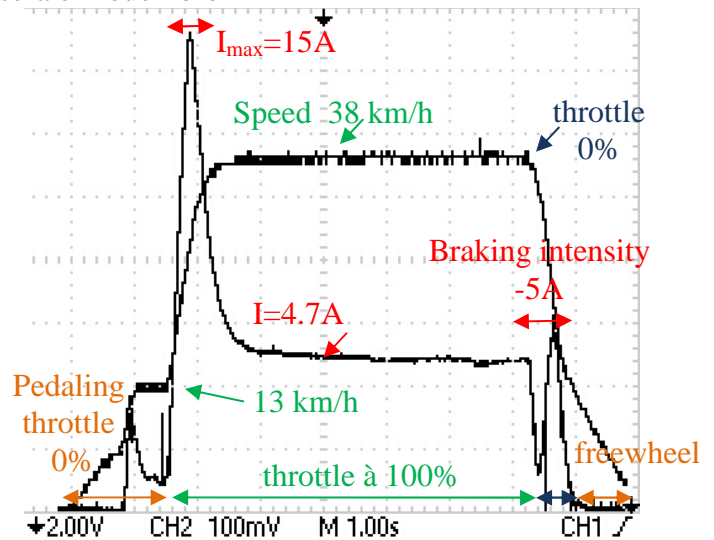


Fig 5 : speed and intensity battery according to time with no load ( $F_R$  23N, wheel mass 7kg)

La troisième stratégie permet de limiter le taux de décharge de la batterie. Par conséquent, la puissance au démarrage est constante.

On peut observer sur la figure 6 l'utilisation de la 3ème stratégie sans capteur de pédalier avec un courant limité de la batterie à 40 A max pendant 0,3 s puis à 20A. les temps accélérations sont paramétrés à 0,1s donc ils ne sont pas pris en compte car c'est le paramétrage du courant batterie max qui minimisera les accélérations. Cette figure permet d'observer ces limitations de courant ainsi que le courant en régime établi de 15A lorsque la vitesse a atteint 64 km/h avec un accumulateur de 50V. la figure 6 permet d'observer la vitesse en fonction du temps, donc de déterminer l'accélération. Celle-ci est importante pour 40A ( $33m.s^{-2}$ ), puis plus faible ( $5m.s^{-2}$ ) avec le courant limité à 20A. enfin on peut observer l'arrêt en roue libre donc sans régénération.

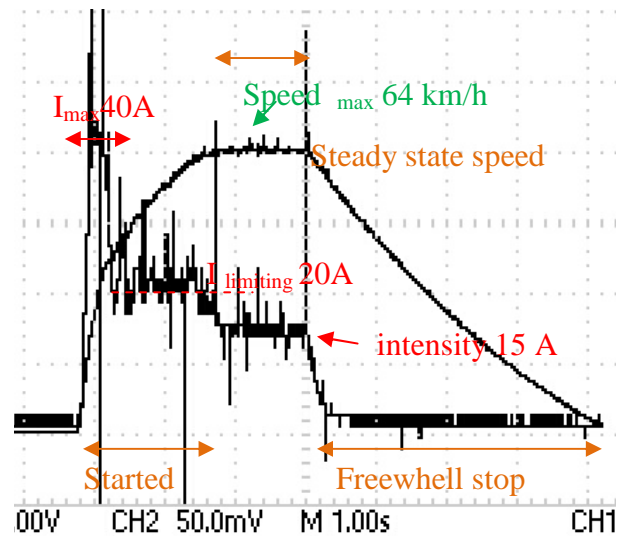


Fig 6 : vitesse et courant batterie en fonction du temps sans charge.

Lorsque le courant de la batterie est limité, le vélo fonctionne à puissance moteur constant  $P_{m \text{ limit}}$ . Pour connaître les dynamiques du vélo, il faut donc résoudre l'équation différentielle suivante :

$$\frac{P_{m \text{ limit}}}{V} = M \frac{dV}{dt} + F_{R \text{ sis tan t}} \quad (15)$$

En négligeant la force résistante, la résolution de l'équation (15) donne la dynamique de vitesse et du déplacement correspondant aux équations suivantes :

$$V(t) = \sqrt{\frac{P_{\text{limit}}}{M}} \cdot t^{1/2} \quad (16)$$

$$D(t) = \sqrt{\frac{P_{\text{limit}}}{M}} \cdot \frac{3}{2} \cdot t^{3/2} \quad (17)$$

Si on limite la puissance à 1400W correspondant à la puissance moyenne de la figure 5 lors de l'accélération, il faudra aussi 4 secondes pour atteindre 20m, mais il faudra 7,2 secondes pour que le cycliste atteigne 36 km/h. Donc, les dynamiques du vélo avec la troisième stratégie est plus faible que les 2 premières. Mais, le courant batterie est limité à 28A pendant toute l'accélération et n'atteint plus 56 A. Par conséquent, il y a une sollicitation de la demande du courant de la batterie bien plus faible.

Il existe d'autres solutions pour éviter des pointes de courants à la batterie avec des profils de vitesse en « S », avec les 2 premières stratégies, mais ceux-ci est une affaire de spécialiste.

On a démontré en ayant fait quelques mesures qu'il était facile d'identifier tous les paramètres d'un vélo électrique (puissance, consommation, dynamique...) et de comprendre les limites dynamiques du vélo électrique. Les constructeurs moteurs et variateurs fournissent très peu d'information, il faut donc un minimum d'investissement de l'enseignant pour une exploitation pédagogique. Pour mettre en commun les études de chacun, nous avons décidé de créer un challenge pédagogique de vélo électrique en parallèle au karting électrique à Vierzon. Ce challenge permettra de mettre en ressources des données afin d'aider toutes personnes désireuses de réaliser un bon vélo électrique.

## 7. Conclusion

Nous avons pu établir que l'exploitation pédagogique d'un vélo électrique correspond au programme de terminal scientifique en physique avec une utilisation de mathématique classique. Par conséquent, le vélo électrique n'est pas seulement dédié au génie mécanique et électrique. Cette exploitation permet de donner un sens aux valeurs de force et de puissance à l'échelle humaine car ces données sont souvent abstraites. Il est possible de faire des parallèles avec des véhicules à moteur thermique [50 cm<sup>3</sup> (4KW=5,6CV) ou 125 cm<sup>3</sup> (11KW)].

Le vélo électrique permet de comprendre que plus un véhicule est lourd ou à des pneus larges alors, plus il devra avoir de puissance et consommera d'énergie. L'étude du vélo électrique permet une ouverture d'esprit et annihile de faux raisonnements tels que de recharger les batteries tout en roulant à 30 km/h sur du plat. Des challenges de vélos électriques comme la traversée des Alpes ou celui de Vierzon permettent de motiver les étudiants sur une réalisation. Le vélo électrique est un moyen ludique qui enthousiasme les étudiants. Il a un coût relativement faible par rapport à certains systèmes didactisés. Après cette application, on peut espérer que l'étudiant « kit » son vélo au lieu de modifier son scooter thermique avec un piston plus gros et un échappement libre. Le vélo est une application utile dans notre société soucieuse de préserver l'environnement. De plus grâce aux pistes cyclables en ville, le vélo électrique parcourt un trajet en toute sécurité et plus rapidement que les voitures. Enfin, il n'y a jamais de souci pour se garer. Par contre, il est difficile de faire de gros achats avec.

**En conclusion, nos moyens de transports sont comme nos chaussures, il faut les choisir en fonction de nos besoins et de la météo.**