

Adéquation des véhicules faibles consommations énergétiques électriques (Xdefi ADEME)

Culture Sciences
de l'Ingénieur

La Revue
3E.I

Arnaud SIVERT¹, Gabriel PLASSAT², Franck BETIN¹

Édité le
16/09/2024

école
normale
supérieure
paris-saclay

¹ I.U.T de l'Aisne Département Génie Electrique SOISSONS FRANCE
Laboratoire pour l'Innovation Technologique (L.T.I)

² chargé de mission mobilité ADEME

Cette ressource fait partie du N° 113 de La Revue 3EI du troisième trimestre 2024.

De nombreux véhicules intermédiaires faibles consommations sont en train de voir le jour avec la raréfaction de l'énergie bon marché et la décarbonations de la mobilité. Cet article présente les conditions d'adéquation entre le prix, la masse, la consommation, l'autonomie, le volume utile et la fiabilité pour qu'un véhicule intermédiaire puisse trouver un marché porteur.

1 - Introduction

Le déclin de la production de pétrole et la stagnation du nombre de centrale électrique vont faire que l'énergie va peser de plus en plus lourd sur le budget des ménages. Le coût de l'énergie contraindra la consommation nécessaire à la mobilité et la gestion des ressources. Dans un monde aux ressources limitées (matière, revenus, temps, consommation d'énergies caloriques et électriques, obsolescence), la question du choix du véhicule adapté à l'usage devient de plus en plus pertinente.

Entre le vélo électrique (25kg, 14W.h/km à 25km/h) et la voiture (1500kg, 150W.h/km à 45km/h) [1], un marché du véhicule intermédiaire est en train de voir le jour [2] en passant par le vélo cargo 40kg, le scooter de 90kg et les voitures sans permis qui font 450kg. La figure 1 illustre la consommation des véhicules en fonction de la masse et du volume transportable.

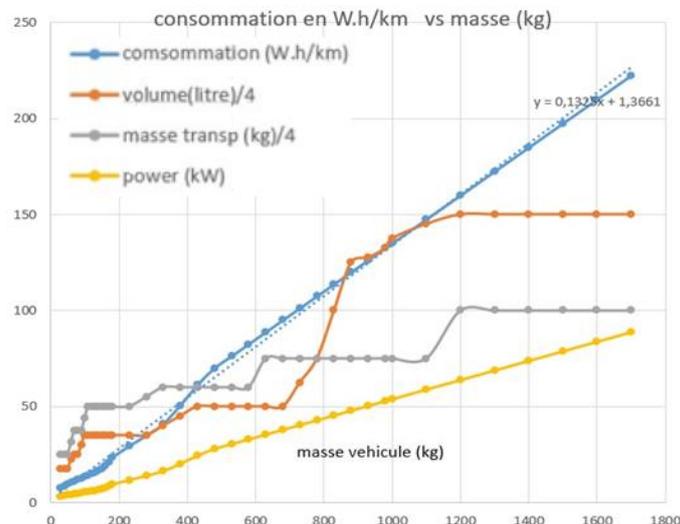


Figure 1 : Consommation d'un véhicule en fonction de sa masse et de son volume transportable

On peut observer l'absurdité de l'utilisation d'un véhicule de 1500kg pour le transport d'une personne seule mais qu'en revanche, ce véhicule devient pertinent pour les usages du quotidien qui nécessitent le transport de volumes ou de masses importants.

Depuis 2021, l'ADEME a mis en place un challenge appelé « Extrême défi » pour aider des constructeurs à réaliser des véhicules du futurs suffisamment adaptés au public pour créer un marché [3, 4]. En effet, par le passé, de nombreuses sociétés qui réalisaient des prototypes faibles consommations d'énergies se sont confrontées à cette absence de marché et ont dû arrêter leurs productions (le [Bio-Hybrid de Schaeffler](#), le DryCycle, Le Padillo, le Cabriovelo, le Begorett, l'Organic Transit's Elf, [Evovelo](#), Velocity (B'Twin), Aerorider, [BMW C1](#) [6], ...).

« L'Extrême défi » consiste donc à réaliser un véhicule permettant de transporter une personne de 80kg et une charge de 80kg en essayant de consommer 10 fois moins qu'une voiture standard [8, 9].

Par ailleurs, pour obtenir l'adhésion des consommateurs, de nombreux points de blocages sont à analyser :

- Ergonomie et confort (pour un vélo, selle, poignée, hauteur du guidon qui provoque problème fesse, poignée, mains, dos, nuque), complexité de l'amortissement des tricycles et quadricycles.
- Effort de pédalage (masse, coefficient résistif des pneus, aérodynamique, changement de braquet),
- Sécurité d'utilisation (étrier de freins, plaquettes), partage de la route, casque, ...
- Météo (habit spécialisé pour l'hiver, l'été, entre deux saisons), carénage
- Limitation de la bagagerie (volume, masse à emporter...),
- Vol (antivol, trackers), assurance,
- Eclairage (pour se faire voir de jour et voir de nuit)
- Législation, vitesse et puissance limitées,
- Autonomie, prix, rayon d'action....

2 - La consommation

Pour répondre au défi posé par l'ADEME, il faut en premier lieu s'intéresser à la consommation du véhicule. Dans le domaine des véhicules routiers, la norme WLTC fait référence. Pour cette étude, nous prenons l'exemple d'un vélo couché. Son profil WLTC (classe 1 [7]) est tracé sur la figure 2. On peut observer que la valeur moyenne de la vitesse est de 29,3km/h sur 16 minutes sur une distance de 8,1km sans pente.

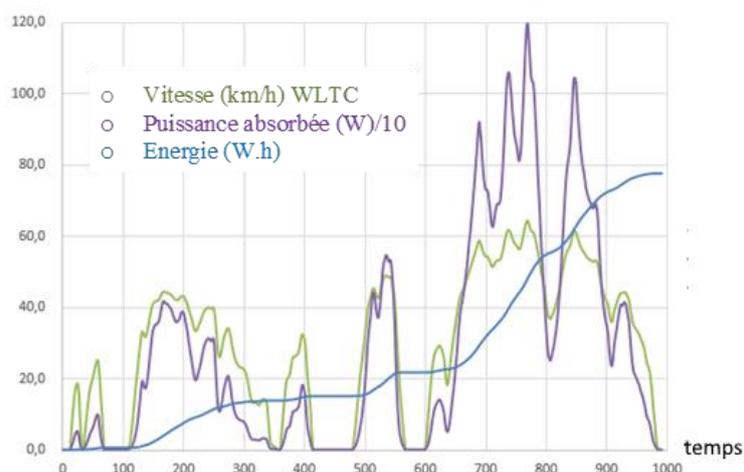


Figure 2 : Profil de vitesse procédure de test consommation d'un véhicule WLTC pour un vélo couché elec

La consommation du véhicule calculée à partir des tests WLTC pour un trajet ne donnera pas l'autonomie réelle de l'utilisation d'une voiture. En effet, la vitesse moyenne ne sera pas la même et le dénivelé [5, 10] ainsi que la consommation des accessoires de chauffage ou de climatisation ne sont pas pris en compte. Par conséquent, les consommateurs constatent en général une plus faible autonomie que celle annoncée dans ce test.

Cependant, il existe des planificateurs de trajet pour voitures électriques qui permettent d'estimer la consommation en fonction du dénivelé, du trafic (vitesse moyenne, nombre d'accélération) et de la température extérieure, déterminant ainsi le SOC de la batterie et proposant la position géographique des bornes de recharge...

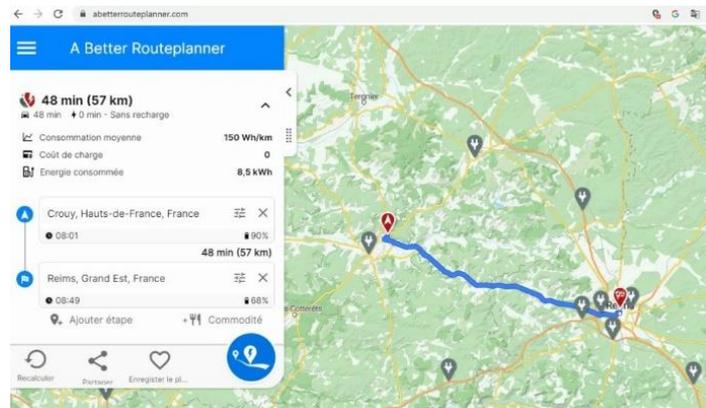


Figure 3 : Planificateur ABRP [13] de trajet avec consommation moyenne et énergie consommée pour voiture électrique

À ce jour, l'estimateur de consommation ABRP ne prend pas en compte le chauffage ou la climatisation qui utilise environ 10% en plus de la batterie [13] et il n'est pas possible de rentrer les coefficients de son propre véhicule (coefficient aérodynamisme et roulement)

Pour les vélos à assistance électrique, dans le trip simulateur ebikes.ca, il est possible de personnaliser les paramètres de son véhicule et d'estimer la consommation énergétique mais aussi la température du moteur (permettant ainsi de ne pas dépasser la température d'émaillages des bobines environ 120°C [16]).



Figure 4 : Estimateur de consommation et de température moteur d'un vélo couché à une vitesse moyenne de 37km/h.

La consommation va dépendre de sa masse et de son confort. En effet, plus un véhicule aura de roues (2, 3 ou 4), plus il sera stable pourra transporter de choses mais plus il sera lourd et moins il

aura un bon aérodynamisme. La flexibilité du véhicule et la sécurité fonctionnelle (remorque, sacoche facilement détachable...) permettront une meilleure adhésion du public en fonction de leurs besoins.

Dans le cahier des charges du Xdefi, la simplicité de fabrication, la mutualisation de composants et les choix de type de matériaux doivent permettre une production de masse ainsi qu'une maintenance aisée afin de baisser les coûts et d'augmenter la durée de vie du véhicule.

De nombreux véhicules de l'extrême défi utilisent la puissance humaine avec une hybridation parallèle ou série [9, 10]. Mais à partir de quelle masse de véhicule le pédalage est-il encore pertinent ? Comment faire le choix de la puissance en fonction de la masse, l'aérodynamisme du véhicule ? Quelles seront les variations de la consommation en fonction de la masse, vitesse limite, performance du moteur ?

3 - Couple de Charge demandé par le véhicule

Les performances des moteurs électriques brushless dépendent du couple résistant du véhicule. Donc, la puissance du véhicule dépendra de la résultante du couple et de la vitesse maximale désirée. En effet, le rendement dépend du couple résistant qui peut être mis sous l'équation suivante pour un véhicule (1) :

$$T_{load}(N.m) = \left[k_{Aero} \cdot Vit^2 + \left(Cr + \frac{pente(\%)}{100} \right) \cdot \frac{M \cdot g}{3,6} - \frac{P_{humaine}(W)}{Vit(km/h)} \right] \left[\frac{D_{roue}}{2} \cdot \frac{2,54}{100} \cdot 3,6 \right] \quad (1)$$

Dans laquelle on trouve :

- k_{Aero} : coefficient aérodynamique $W/(km.h)^3$,
- M (kg) : masse totale (véhicule, conducteur, passager, charge utile),
- g (m/s^2) : constante de gravitation,
- Cr : coefficient de roulement des pneus, (sans unité)
- $pente$: pente moyenne de la route sur un trajet (sans unité)
- D_{roue} : diamètre de la roue (en pouce)

Le coefficient aérodynamique et du de roulement du véhicule se déterminent en traçant la courbe de la puissance en fonction de la vitesse avec les différentes options d'utilisation (figure 5).

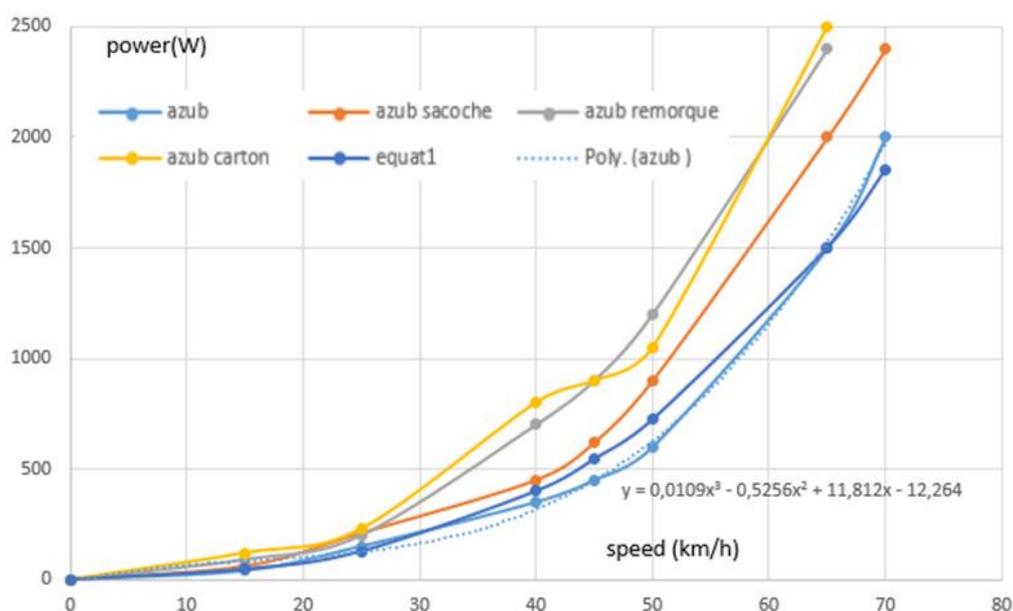


Figure 5 : Puissance absorbée d'un vélo couché en fonction de la vitesse avec sacoche et remorque [9]

Quel diamètre de roue choisir ?

Le choix d'une roue de 20 pouces permet d'avoir un couple de charge plus faible par rapport à un 26 pouces. Donc en petite roue, le courant appelé par le moteur est plus faible et le rendement meilleur. En revanche, avec une roue de 20 pouces, le véhicule aura une vitesse de pointe plus faible qu'en 26 pouces, pour une certaine tension de batterie. Plus le diamètre d'une roue est important plus les petites dégradations de la route sont minimisées. De plus, le volume d'air que doit contenir un pneumatique est proportionnel à la masse qu'il porte, l'amortissement est d'autant meilleur que le volume d'air est grand.

Le diamètre de roues de 20 pouces est le plus petit disponible si l'on souhaite utiliser un dérailleur classique car celui-ci toucherait le sol avec un diamètre de roue de 16 pouces. Le choix pour le diamètre de la jante est donc restreint.

Critères de choix du moteur :

Par simplification, on considère que le moteur brushless se comporte comme un moteur DC avec une résistance équivalente R_m dont le courant moteur aura l'équation suivante avec k_m correspondant à la constante de couple du moteur :

$$I_{m\ motor}(A) = T_{load}/k_m \quad (2)$$

On négligera toutes les pertes électriques du moteur sauf celle des pertes joules du moteur :

$$Perte (W) = R_{m\ equivalent} \cdot I^2 \quad (3)$$

Par conséquent, la puissance absorbée est déterminée par la relation suivante :

$$P_m(W) = \left[k_{Aero} \cdot Vit^3 + (C r + \frac{pente(\%)}{100}) \cdot \frac{M \cdot g \cdot Vit(km/h)}{3,6} - P_{humaine} \right] + R_m \cdot I^2 \quad (4)$$

Evidemment, le moteur idéal devrait posséder une résistance très faible mais cela surdimensionne la masse de cuivre des bobines et la taille des aimants du moteur synchrone. Le tableau suivant présente les caractéristiques de quelques moteurs roues commercialisées.

Tableau 1 : Coefficient de moteur roue

Type de moteur	K_m N.m/A	R_m Ω	Masse kg	I_{max} (A)	Prix €
Moteur 9CRH212	0,84	0,522	5,5	30	300
HT3525 crystalte	1,31	0,56	7	30	420
HS3540 crystalte	0,94	0,3	7	40	420
Mxus 4505	1,21	0,12	8,5	50	150

La puissance et la masse du moteur doivent être optimisées par rapport au véhicule pour avoir une dynamique appropriée au trafic. Avec un moteur surdimensionné, il est possible lors de la réalisation de prototypes de limiter la vitesse, la puissance, de régler des correcteurs proportionnel intégral pour le « cruise control ».....

Mais quelle sera la performance du moteur en fonction de la vitesse et quelle sera la consommation ?

4 - Performance moteur et consommation véhicule

Sur la figure suivante, on peut observer le rendement en fonction de la vitesse pour différentes pentes d'un vélo couché avec les coefficients de véhicule du tableau suivant et pour le moteur 9C RH212.

Tableau 2 : Coefficient du véhicule

Type de cycle	k_{aero} W/(km/h) ³	$C_{roulement}$	Masse totale Kg (véhicule+ cycliste+ bagages, accessoires...)
Vélo couché	0,0035	0,004	123

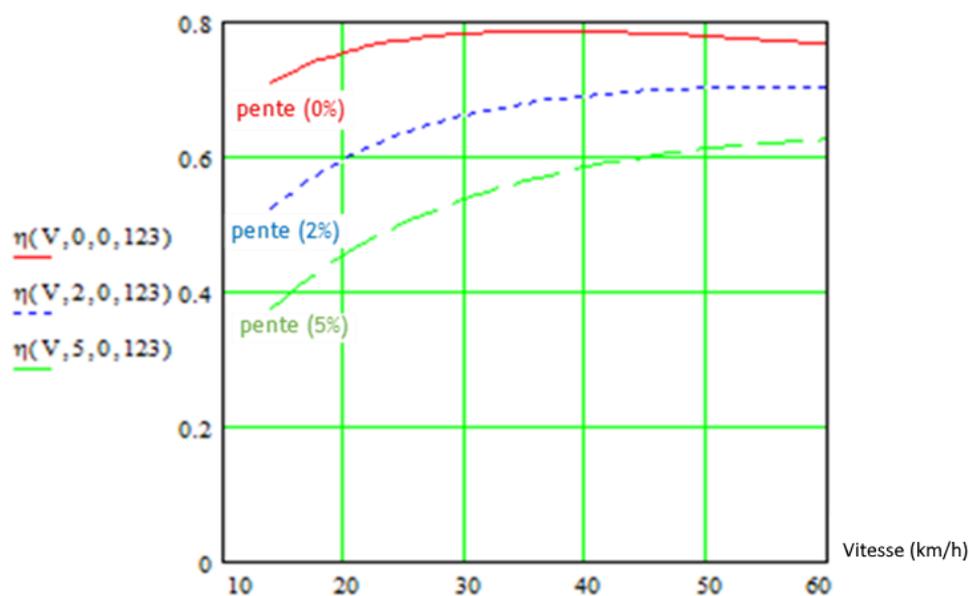


Figure 6 : Rendement d'un vélo couché en fonction de la vitesse et de la pente (masse de 123kg)

On peut observer que le rendement est dégradé pour les basses vitesses et pour les pentes importantes car le courant du moteur est important. Ce courant provoque des pertes en chaleur dans le bobinage du moteur. Par conséquent, la consommation du véhicule va dépendre de la masse, de l'aérodynamisme, de la vitesse et des performances du moteur. La performance d'un véhicule sur un parcours est associée à sa consommation énergétique en W.h/km qui est déterminée par l'équation suivante (5) :

$$C_{ons}(W.h / km) = P_m(W) / Vit(km / h)$$

$$C_{ons} = \left[k_{Aero} \cdot Vit^2 + \left(C r + \frac{pente(\%)}{100} \right) \cdot \frac{M \cdot g}{3,6} - \frac{P_{humaine}}{Vit(km/h)} \right] + \frac{Rm}{Vit(km/h)} \cdot I^2 \quad (5)$$

Pour une puissance musculaire nulle, on peut observer que pour les moteurs roues, il y a une inflexion minimale de consommation en fonction de la vitesse pour différentes pentes.

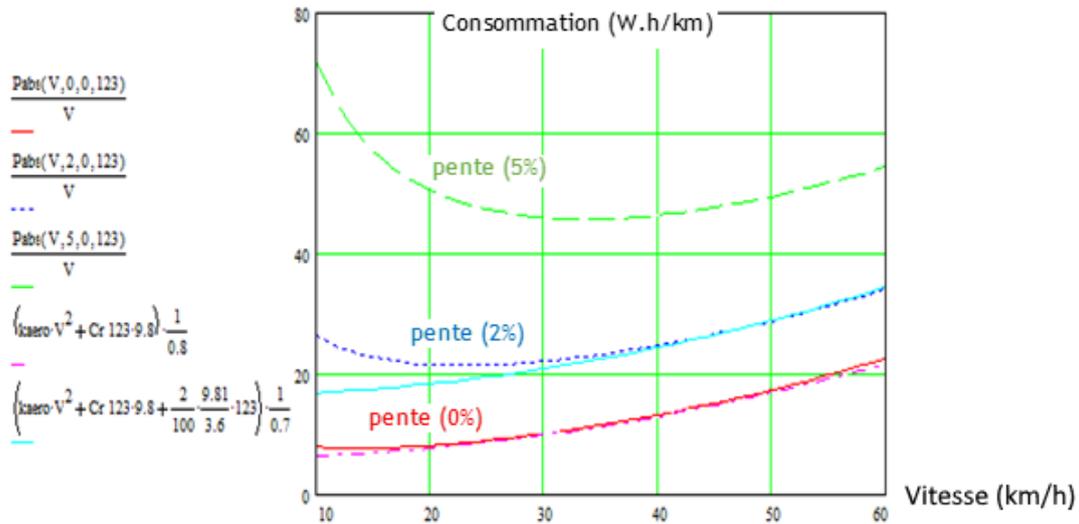


Figure 7 : Consommation d'un vélo couché en fonction de la vitesse et de la pente pour une masse de 123kg

Pour améliorer les performances du moteur dans les basses vitesses, on pourrait envisager l'utilisation d'une boîte de vitesses mais cette solution est exclue du fait de la masse rajoutée mais surtout de son prix. Toutefois, les moteurs pédaliers utilisent le dérailleur pour améliorer le rendement du moteur et certains moteurs pédaliers possèdent une boîte interne tel que le moteur cyclee Valeo Effigear proposé à ce jour au prix de 1200€.

Lorsqu'on ajoute une puissance musculaire de pédalage supérieure à 100W, celle-ci aide le moteur dans les basses vitesses, donc il n'y a plus d'inflexion minimale de la consommation comme on peut l'observer sur la courbe suivante toujours pour 3 pentes différentes de 0%, 2%, 5%.

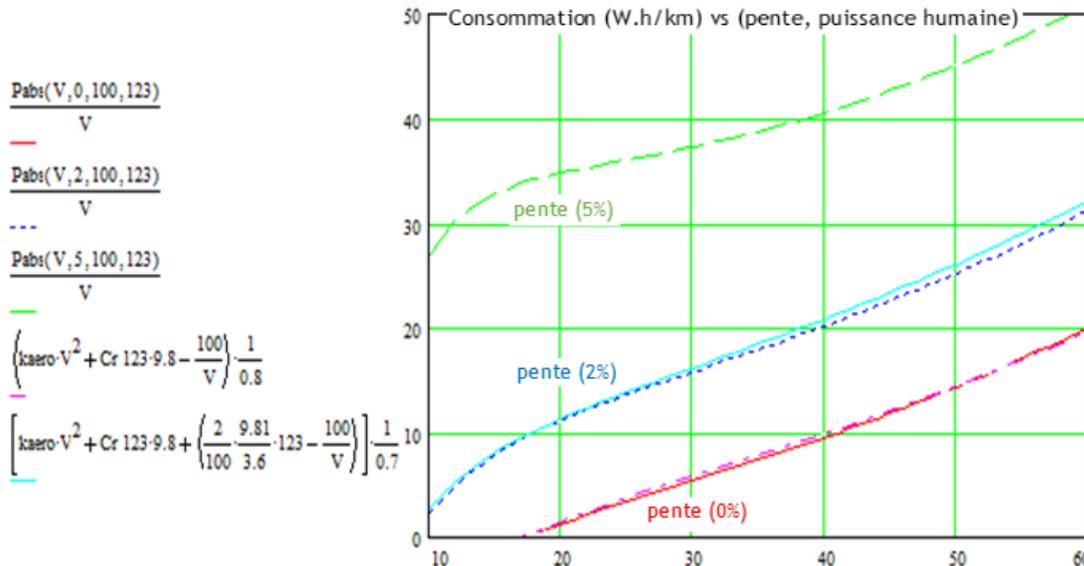


Figure 8 : Consommation d'un vélo couché en fonction de la vitesse avec une puissance humaine de 100W

En ville où il y a de nombreux arrêts, la consommation des démarrages ne peut pas être négligée. A chaque démarrage, la consommation est donnée par la relation suivante :

$$C_{onsdemarrage}(Wh) \approx \frac{Masse}{2 \cdot 3600} \cdot \frac{Vit}{3.6} \left[\frac{Vit}{3.6} + \frac{Rm}{km} \cdot I_d \cdot \frac{Droue \cdot 2.54}{100} \right] nbr_{demarrage} \quad (6)$$

Avec un courant de démarrage I_d correspondant à la limitation du courant du variateur qui est de 100 à 180A en fonction des transistors utilisés.

Par ailleurs, dans le cas d'un velo couché de 123kg, pour atteindre 45km/h alors il faut ajouter à la consommation 11,43W.h pour chaque démarrage alors que l'énergie cinétique de l'accélération n'est que de 2,6W.h. S'il y a un arrêt tous les kilomètres, il faut rajouter à la consommation du véhicule 11,43W.h/km.

Par conséquent, plus la vitesse moyenne du véhicule est grande et plus il consomme. De même pour la pente moyenne, plus elle est importante et plus le véhicule consomme. Mais, quelle sera la sensibilité de la consommation du vehicule en fonction des paramètres précédents ?

5 - Sensibilité de la consommation du véhicule

En faisant la dérivée partielle de l'équation de la consommation du vehicule (6) en fonction de la vitesse moyenne, de la pente moyenne, de la puissance humaine, il est possible de connaître la sensibilité de la consommation à tous ces paramètres comme le montre la relation (7) :

$$C_{ons} = \int \frac{\partial C_{ons}}{\partial Vit} \cdot dVit + \int \frac{\partial C_{ons}}{\partial pente} \cdot dpente + \int \frac{\partial C_{ons}}{\partial P_{humaine}} \cdot dP_{humaine} \dots \quad (7)$$

L'équation de la dérivée de la consommation par rapport à la vitesse peut être simplifiée par (8) :

$$\frac{\partial C_{ons}}{\partial Vit} \approx 2 \cdot k_{aero} \cdot Vit + \left(\frac{3,6}{100} \cdot 2,54 \cdot k_{aero} \cdot \frac{Rm}{km} \cdot D_{roue} \cdot Vit \right)^2 \quad (8)$$

Sur la figure 9, la consommation due à la vitesse est représentée par la courbe bleue, celle du roulement des pneus par la courbe verte et la consommation totale avec le rendement du moteur par la courbe rouge.

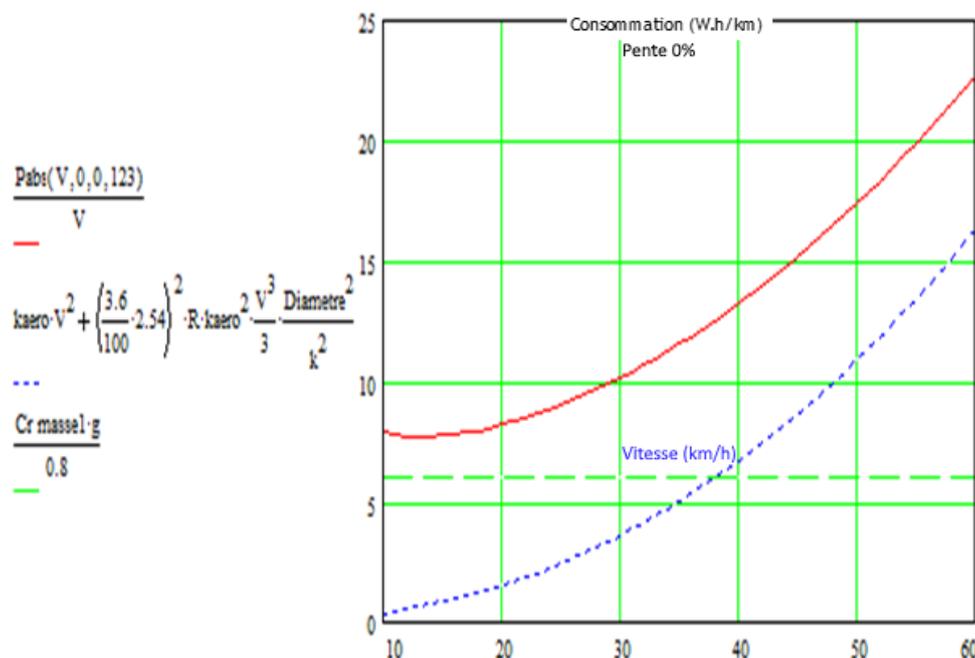


Figure 9 : Consommation d'un vélo couché en fonction de la vitesse (km/h) et sa sensibilité

Pour les véhicules de la micromobilité inférieures à la vitesse de 25km/h, l'aérodynamisme peut être négligée sauf pour les territoires venteux. Par contre, pour les véhicules roulant à 45km/h, le design pour minimiser l'aérodynamisme est pertinent pour avoir une consommation faible malgré l'ajout d'un carénage.

La sensibilité de la consommation vis-à-vis de la pente moyenne est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{\partial C_{onc}}{\partial pente} \cong \frac{1}{100} \cdot \frac{M \cdot g}{3.6} \cdot \frac{1}{\eta_{moteur}} \quad (9)$$

avec

$$pente_{moy}(\%) = \frac{D_{denivelé}^+(m)}{Distance(km) \cdot 10} / km \quad (10)$$

La pente moyenne est donnée par tous les outils de cartographie et d'itinéraires sur un trajet défini par le dénivelé positif.

Pour la sensibilité de la consommation par rapport à la puissance humaine, celle-ci correspond à une hyperbole fonction de la vitesse, avec une puissance humaine moyenne, en général comprise entre 75W à 150W en fonction de la condition physique du cycliste.

$$\frac{\partial C_{ons}}{\partial P_{humaine}} = \frac{-1}{Vit} \quad (11)$$

Par conséquent dans le cas du vélo couché, les variations des différents paramètres ont les conséquences suivantes sur la consommation :

- Une augmentation de la pente moyenne de 1%, accroît la consommation de 4,1W.h/km ;
- Une augmentation de la masse de 1%, accroît la consommation de 0,014W.h/km ;
- Une augmentation de la vitesse moyenne de 1% autour de 35km/h majorera la consommation de 0,6W.h/km ;
- Par contre, chaque augmentation de 1%, de la puissance humaine autour de 35km/h diminuera la consommation de 0,023W.h/km.

Sachant que le moteur électrique, la batterie, le carénage pour s'affranchir de la météo et améliorer l'aérodynamisme va rajouter de la masse. Donc une optimisation de la consommation doit être effectuée.

6 - Optimisation du véhicule

L'existence d'un marché économique pérenne nécessite l'optimisation du véhicule sur sa masse et son prix.

Intéressons-nous tout d'abord à l'étude de la masse.

La masse du châssis aluminium d'un véhicule 2 roues nécessaire pour supporter une personne de 80kg ainsi qu'une charge utile peut être estimée à l'aide de la relation suivante :

$$M_{chassis}(kg) \approx (M_{utile} \cdot 0,125 + 5) \approx 20 \quad (12)$$

Si le véhicule passe à 4 roues, la masse de châssis est doublée.

Le moteur nécessaire à l'entraînement à 45km/h d'une charge de 160kg dans une pente de 5% sans compter la masse du véhicule devra avoir la puissance suivante (13) :

$$P_m(W) = \frac{pente(\%)}{100} \cdot \frac{M \cdot g \cdot Vit(km/h)}{3.6} = \frac{5}{100} \cdot \frac{(160 + M_{vide}) \cdot 9,8 \cdot 45}{3.6} = 980 \quad (13)$$

On peut ensuite déduire la masse du moteur connaissant l'équation empirique suivante :

$$M_{moteur}(kg) = P_{moteur} \cdot 0,003 + 1,5 \quad (14)$$

A titre d'exemple, cette masse est de 6 kg pour un moteur de 1,5 kW.

Une autonomie de 100 km avec une consommation d'environ 17 à 20Wh/km nécessite une batterie de 2000W.h, c'est-à-dire, avec une densité d'énergie de la batterie de 200Wh/kg, une masse de 10kg en technologie LFP et 7kg en NCM.

Remarque : La capacité énergétique de la batterie est choisie de façon à avoir un taux de décharge inférieur à 1C. Cette limite est déterminée pour les pentes ou à l'accélération avec une tension choisie à 72V (vitesse d'environ à 45 km/h) pour ne pas impacter sa durée de vie. Par ailleurs, il est nécessaire de respecter la puissance maximale fournie par la batterie donnée par l'équation suivante :

$$P_{maxbatterie} = capacité_{batterie} \cdot taux_{decharge} = 2000W \cdot h \cdot 1C = 2000W \quad (15)$$

La masse de l'hybridation parallèle pour un pédalage est de 3 kg (pédalier, chaîne dérailleur) ce qui est négligeable par rapport à la motorisation électrique, la batterie et le contrôleur (16kg).

Le rapport entre la puissance musculaire et la puissance de la motorisation électrique permet de savoir si le pédalage est pertinent ou pas sur un véhicule. On peut considérer arbitrairement qu'en dessous de 20% la complexité du pédalage, son prix, sa masse rendent inutile son utilisation.

Pour une puissance humaine moyenne de 100 W et la valeur de 20%, on obtient une motorisation limite de 500 W, soit un total de 600 W. Si le véhicule nécessite une puissance supérieure à ces 600 W, on pourra considérer que le pédalage n'est pas pertinent.

Ces ordres de grandeurs des puissances humaine et électrique se traduisent en termes de masse utile du véhicule. Par exemple, pour un vélo non électrique en considérant que 50% de la puissance humaine permet de compenser les pertes aérodynamiques on peut en déduire une vitesse moyenne d'un vélo couché de l'équation 4 de la puissance utile du véhicule.

$$Vit_{imposée} = \left(\frac{P_{humaine} \cdot K_{pourcentage}}{k_{aero}} \right)^{1/3} = \left(\frac{100 \cdot 0,5}{0,0035} \right)^{1/3} = 25km/h \quad (16)$$

Cette vitesse moyenne correspond à la valeur de la législation sur les vélos électriques et permet de s'insérer dans le flux des voitures en secteur urbain.

Les coefficients et la vitesse imposée une fois fixés, permettent de déterminer la masse totale du véhicule et de sa charge utile pour une valeur de pente de 1% choisie arbitrairement (17) :

$$Masse_{vehicule+utile} = \frac{P_{humaine}(1 - K_{pourcentage}) \cdot 3,6}{g \cdot Vit_{imposé} \cdot (Cr + pente(\%))} = \frac{100 \cdot (1 - 0,5) \cdot 3,6}{9,8 \cdot 25 \cdot (0,004 + 0,01)} = 82kg \quad (17)$$

Pour un vélo couché, si le véhicule et son cycliste dépassent les 82 kg, il est nécessaire d'utiliser une motorisation électrique en complément du pédalage pour maintenir une vitesse de 25 km/h sur des pentes à 1%.

Pour les vélos cargos, les longs tails, les véhicules intermédiaires qui peuvent peser 140 kg à vide et transporter 100 kg, le pédalage peut devenir inutile à moins que la vitesse moyenne ne soit fortement réduite.

De plus, différentes options peuvent alourdir le véhicule.

- Le carénage d'un vélomobile en fibre demande environ 10 kg mais permet de diminuer le coefficient aérodynamique par 2.
- La bagagerie d'un vélo demande 4 kg pour un volume utilitaire de 85 litres.
- Les panneaux photovoltaïques demandent 5 kg avec support pour 150Wcrete (0,8m²) [7].

Par conséquent, la masse totale d'un véhicule faible consommation peut être déduite de l'addition suivante :

$$\begin{aligned} Masse_{T\grave{a}vide} &= M_{chassis} + M_{moteur} + M_{batterie} + M_{carrenage} + M_{photovolt} = 20 + 7 + 10 + 10 + 5 \\ &= 37 \text{ à } 52kg \end{aligned}$$

Cette masse reste faible par rapport à la masse transportable mais doit rentrer dans l'itération pour obtenir la consommation finale.

Analyse du prix :

Les choix des options sont souvent fonction du prix final du véhicule.

Les prix des éléments du véhicules peuvent être analysés de la manière suivante :

- Châssis : prix fixe,
- Moteur : prix fixe,
- Carénage : prix fixe,
- Panneaux photovoltaïques : prix fixe.
- Batterie : dépend de la consommation selon la relation suivante :

$$Pr i x_{batterie} \approx 0.8(\text{€/W.h}) \cdot Autonomie(km) \cdot consommation(Wh/km) \quad (18)$$

Dans notre cas, avec une autonomie désirée de 100 km :

$$Pr i x_{batterie} = 0,8(\text{€/W.h}) \cdot 100(km) \cdot 20(Wh/km) = 1600\text{€}$$

- Chargeur 2300W (2,5kg) pouvant être branché sur une prise classique pour recharger la batterie en 1 heure : 200€

Remarque : En France, les bornes publiques faibles puissances sont peu nombreuses avec un business modèle qui est basé sur le temps de charge et non sur l'énergie. Ce choix est non adapté au véhicule faible consommation et à la « micromobilité » (<25km/h). A ce jour, il est préférable d'avoir une double batterie swappable lors de grande distance. Toutefois, des prises pour la micromobilité pourraient augmenter le rayon d'utilisation du véhicule faible consommation ainsi pour celle de la milli-mobilité (45 km/h). De plus à ce jour, des batteries sodium-ion acceptent un taux de charge de 3C avec des temps de charges faibles.

Finalement, le prix brut total des véhicules faibles consommations produits artisanalement correspond à la somme suivante :

$$Pr i x_T = P_{chassis} + P_{moteur} + P_{batterie} + P_{carrenage} + P_{photovolt} \quad (19)$$

$$Pr i x_T \approx 2000 + 400 + 1600 + 4000 + 1000 \approx 4000 \text{ à } 9000\text{€}$$

- Le confort des véhicules (amortissement, siège) a un coût non négligeable environ 15% sur le véhicule. Ce prix brut artisanal est relativement important par rapport à des véhicules produits massivement et ne prend pas en compte la marge, le marketing...

Dans le prix, il faut aussi considérer la possibilité d'ajouter des accessoires (sacoche, vide poche, éclairage supplémentaire, bagagerie, ...) qui jouent un rôle important dans l'approbation de l'utilisation d'un véhicule.

7 - Cycle de vie du véhicule, maker faire, réparabilité

La batterie et le variateur ont une durée de vie de 8 à 9 ans. Le cycle de vie d'un vélo couché est estimé à 120 000km, distance au bout de laquelle il y aura trop de réparations à faire (tous les roulements et tous les accessoires seront à changer). Il est à noter que la maintenance demande un changement de plaquettes de frein tous les 5000 km, de pneus tous les 10 000 km, de chaîne tous les 10 000 km, de fourche avant et d'amortisseur tous les 25 000 km, de pédalier et pignon tous les 30 000 km.

Ces maintenances augmentent le coût final total du véhicule mais peut être facilement réalisée par les particuliers sans intervention d'un spécialiste.

Pour réduire les coûts de l'acquisition, il existe des prototypes à monter en kit avec un squelette de tube carré droit à visser en aluminium comme le v'hélio, XYZ [14], ev4. Enfin, il existe des stages pour apprendre à monter des kits électriques open sources soi-même [17] et ne pas dépendre d'installation de motorisation propriétaire qui ne répondent pas aux besoins des utilisateurs.

8 - Conclusion

Dans cet article nous avons étudié les paramètres qui sont à prendre en compte pour amorcer un réel marché des véhicules intermédiaires et particulièrement des vélos couchés avec carénage. Ces véhicules peuvent jouer un rôle important dans le changement de paradigme du marché des véhicules des particuliers.

En effet, la forte diminution de la consommation d'énergie et de matériaux sera vraisemblablement de plus en plus contraignante dans l'avenir. Le transport de personne seule dans des véhicules de 1,5 tonnes paraîtra de plus en plus insoutenable économiquement et écologiquement. Le choix de véhicules sobres et réellement adaptés aux usages sera de plus en plus nécessaire [15].

9 - Bibliographies

[1] Frédéric Héran, Arnaud Sivert « L'amélioration de l'efficacité Energétique des véhicules individuels » « L'intermodalité transports publics / vélo pliant », Revue transport urbain, à paraître 2022

<https://www.cairn.info/revue-transports-urbains-2022-1-page-9.htm>

<https://www.cairn.info/revue-transports-urbains-2022-1.htm>

[2] https://fr.wikipedia.org/wiki/V%C3%A9hicule_interm%C3%A9diaire

[3] Sivert Arnaud, Vacossin Bruno, Plassat Gabriel, Betin Franck, 2021, « Challenge Extrême défi : véhicule faible impact (ADEME) », *La Revue 3EI juin 2022*, n° 109

<https://www.fichier-pdf.fr/2022/09/12/challenge-extreme-defi--vehicule-faible-impact--iut-geii-soisson/>

[4] <https://xd.ademe.fr/participer>

- [5] A.Sivert, J.Claudon, F.Betin, B.Vacossin, J.Accart “Étude des pneus pour tricycles carénés à faible consommation ” Revue Technologie janvier 2016
<http://www.fichier-pdf.fr/2016/09/30/etude-pneu-de-velo-faible-consommation/>
- [6] <https://envelomobile.wordpress.com/2012/06/11/gagnant-du-concours-velomobile-btwin/>
- [7] https://fr.wikipedia.org/wiki/Proc%C3%A9dure_d%27essai_mondiale_harmonis%C3%A9e_pour_les_v%C3%A9hicules_l%C3%A9gers
<https://unece.org/DAM/trans/doc/2012/wp29grpe/WLTP-DHC-12-07e.xls>
- [8] A.Sivert, B. Cauquil, E. Morel, F. Bailly « Véhicules à faible consommation énergétique (exemple du challenge SUNTRIP) » Revue 3EI N° 85, juillet 2016.
<http://www.fichier-pdf.fr/2016/12/19/velo-electrique-solaire-suntrip-bilan-tech-2015/>
- [9] [https://wiki.lafabriquedesmobilites.fr/wiki/Equipe_HPULHV_\(Human_powered_Ultra_light_hybrid_vehicle\)](https://wiki.lafabriquedesmobilites.fr/wiki/Equipe_HPULHV_(Human_powered_Ultra_light_hybrid_vehicle))
<https://velorizontale.fr1.net/t26508-engin-electric-de-l-iut-de-l-aisne-2021-2024-reflexions-sur-la-mobilite>
- [10] <https://wiki.lafabriquedesmobilites.fr/wiki/Baker-Prax>
- [11] A.Sivert, F.Betin, T. Lequeu, B. Vacossin « Optimisation de la masse en fonction de la vitesse, puissance, autonomie, prix, centre de gravité, frein, d’un Véhicule électrique à faible consommation (vélo, vélo-mobile, voiture électrique) Estimateur de consommation sur un parcours » Revue 3EI N° 80, Avril 2015, page 47 à 57
<https://www.fichier-pdf.fr/2015/05/05/optimisation-masse-vehicule-faible-estimateur-consommation/>
- [12] D.Herrera « Simulation d’un véhicule électrique et son environnement pour étudier la consommation d’énergie sous différentes conditions climatiques » <https://theses.hal.science/tel-03580302/document>
- [13] <https://abetterrouteplanner.com/>
- [14] <http://www.xyzcargo.com/cycles/>, <https://www.ev4.fr/>
- [15] https://wiki.lafabriquedesmobilites.fr/index.php?title=Questionnaire_socio techno_econo_sur_l%27E2%80%99approbation_d%27E2%80%99un_v%C3%A9hicule_interm%C3%A9diaire_faible_consommation_d%27E2%80%99C3%A9nergie&action=formedit
- [16] Sivert.A, Vacossin.B, Betin.F, « Protection numérique pour moto-variateur de véhicule électrique », *La Revue 3EI juin 2020*,
<https://www.fichier-pdf.fr/2023/08/08/protection-numerique-vehicule-electrique--sivert/>
- [17] « reprend ta main sur ta mobilité... » <https://easka.org/>



De gauche à droite :

- Cycle couché (35kg à vide, 45km/h, 10W.h/km) [9],
- <https://vhelio.org/> (25km/h),
- Véhicule baker prax [10] (140kg à vide, 45km/h, 25W.h/km)

Ressource publiée sur Culture Sciences de l’Ingénieur : <https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>