

Le vélo à assistance électrique (VAE)

Ou comment se déplacer en ville sans polluer

Samuel VIOLLIN

Inspecteur d'académie - Inspecteur pédagogique régional en sciences et technologies industrielles à Créteil

Les caractéristiques du déplacement urbain

Les enquêtes sur les déplacements montrent que la voiture est souvent utilisée pour les déplacements urbains même très courts. Par exemple en Île de France, un déplacement en voiture sur deux est inférieur à 3 km, un déplacement sur cinq fait moins de 1 km. (Source enquête IDF 2002)

Les déplacements urbains sont courts en moyenne, particulièrement dans les espaces intramuros mais également dans les banlieues. L'enquête sur les transports en Île de France donne 3,3 km pour Paris intramuros, 4,1 km pour la petite couronne, 6,7km pour la grande couronne (valeur 2001)

Ces distances sont parfaitement adaptées à l'usage de la bicyclette. Cependant l'utilisation du vélo pour effectuer ces déplacements reste exceptionnelle dans les villes.

C'est une spécificité propre aux grandes agglomérations. Seulement 2,3% des Lillois utilisent le vélo en 2006 (39% d'augmentation par rapport à 1998). Les habitants de Roubaix et Tourcoing utilisent très peu le vélo : 0,9%. Dans l'agglomération de Rennes (2007) ils sont 4% à utiliser le vélo, 3% à Toulouse (2003) et Grenoble (2002), 2% à Lyon (2006), Lens (2006) et Dunkerque (2003). Ces chiffres sont très éloignés de ceux observés dans le nord de l'Europe.

Il y a par ailleurs un effet de seuil pour le choix des modes de déplacement. Pour les trajets inférieurs à 1 km une grande majorité des citadins choisissent la marche à pied et 16% la voiture. Dès que la distance devient supérieure à 2 km, 86% choisissent la voiture. Ce comportement mesuré dans les métropoles de la région nord est illustré par la figure ci-dessous.

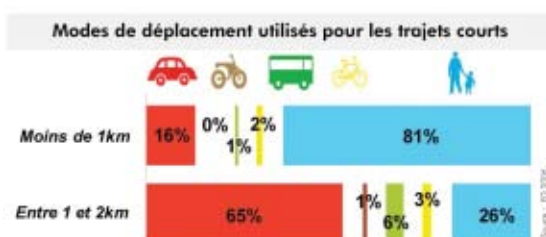


Figure 1 : Source article « les modes doux » enquête transport région nord 2006

On doit s'interroger sur les raisons de la faible utilisation du vélo alors que ce moyen de transport semble bien adapté aux distances concernées.

Le faible nombre de pistes cyclables réservées, le manque de moyens de stationnement sécurisés, les aléas météorologiques et l'effort physique que doit fournir le cycliste sont pour une large part à l'origine de cette désaffection.

Les constructeurs de vélo parient sur la proposition de vélo à assistance électrique pour reconquérir des parts du déplacement urbain, mais également pour développer les activités de loisirs pour les promenades en vélo, voire pour la randonnée cycliste.

Les caractéristiques physiques du déplacement en vélo.

On s'intéresse au déplacement d'un cycliste sur une pente d'angle α représenté de façon simplifiée sur le schéma ci-dessous

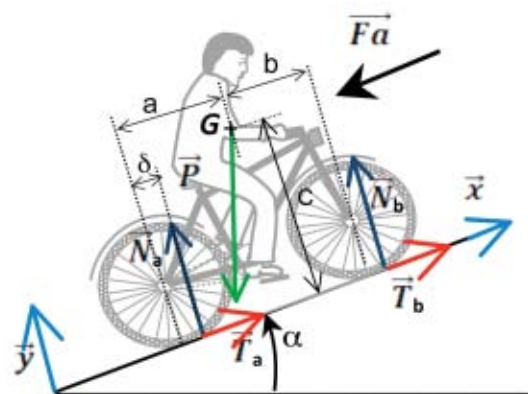


Figure 2 : représentation des forces appliquées pour un cycliste en montée

Il s'agit de modéliser le déplacement en vélo à partir des paramètres du mouvement afin d'identifier les besoins en couple et en puissance appliquée au moyeu. On fait l'hypothèse d'un roulement sans glissement et les moments d'inertie des deux roues sont négligés.

La résistance à l'avancement est modélisée par le déplacement δ du point d'application de l'action du sol sur la roue, créant un couple antagoniste indépendant de la vitesse ramené sur la roue arrière.

Modélisation

On identifie les paramètres qui influent sur le déplacement, notés dans le tableau suivant :

M	Masse de l'ensemble {cycliste + chargement + bicyclette}.
g	Accélération de la pesanteur de 9,81m.s ⁻²
Dr	Diamètre de la roue
δ	Coefficient de roulement des roues
α	Angle d'inclinaison de la route par rapport à l'horizontale
Cx	Coefficient de pénétration dans l'air de l'ensemble {cycliste + chargement + bicyclette}
ρ	Masse volumique de l'air
S	Surface normale à la direction du déplacement
V	Vitesse dans la direction de la route de l'ensemble {cycliste + chargement + bicyclette}

On souhaite déterminer la puissance nécessaire au déplacement du cycliste. Pour cela, il faut identifier le couple appliqué à la roue arrière. On écrit :

le PFD {au vélo + roues + cycliste} en résultante sur \vec{x}

$$-M \cdot g \cdot \sin\alpha + Ta + Tb - Fa = M \cdot \frac{dV}{dt}$$

le PFD au {vélo + roues + cycliste} en résultante sur \vec{y}

$$-M \cdot g \cdot \cos\alpha + Na + Nb = 0$$

En supposant que \vec{Fa} s'applique aussi en G et en négligeant δ devant a ou b, le PFD appliqué au {vélo + roues + cycliste} en moment/G sur \vec{y} donne $Na \cdot a + Tb \cdot c + Ta \cdot c = Nb \cdot b$

le PFD à la roue arrière en moment/centre sur \vec{z}

$$-C_m + \delta \cdot Nb + \frac{Dr}{2} \cdot Tb = J$$

le PFD à la roue avant en moment/centre sur \vec{z}

$$\delta \cdot Na + \frac{Dr}{2} \cdot Ta = J \cdot \frac{d\Omega}{dt}$$

Sans glissement la vitesse est $V = \Omega \cdot \frac{Dr}{2}$

En régime permanent, on annule les termes d'accélération

$$-M \cdot g \cdot \sin\alpha + Ta + Tb - Fa = 0$$

$$-M \cdot g \cdot \cos\alpha + Na + Nb = 0$$

On appelle Cm le couple moteur appliqué à la roue arrière.

$$-C_m + \delta \cdot Nb + \frac{Dr}{2} \cdot Tb = 0$$

$$Na \cdot a + Tb \cdot c + Ta \cdot c = Nb \cdot b$$

$$\delta \cdot Na + \frac{Dr}{2} \cdot Ta = 0$$

Recherche du couple moteur Cm

$$M \cdot g \cdot \sin\alpha + Fa = Ta + Tb$$

$$M \cdot g \cdot \cos\alpha = Na + Nb$$

$$(Ta + Tb) \cdot c + Na \cdot a = Nb \cdot b$$

On extrait de ces relations l'expression de Tb et de Nb afin de déterminer Cm

$$Nb = \frac{M \cdot g \cdot \cos\alpha \cdot a + (M \cdot g \cdot \sin\alpha + Fa) \cdot c}{a + b}$$

$$Tb = M \cdot g \cdot \sin\alpha + Fa + \delta \cdot \frac{2}{Dr} \cdot \frac{(M \cdot g \cdot \cos\alpha) \cdot b - (M \cdot g \cdot \sin\alpha + Fa) \cdot c}{a + b}$$

$$\text{Avec } C_m = \delta \cdot Nb + \frac{Dr}{2} \cdot Tb$$

On obtient

$$C_m = \frac{Dr}{2} (M \cdot g \cdot \sin\alpha + Fa) + M \cdot g \cdot \delta \cdot \cos\alpha$$

$$C_m = \frac{Dr}{2} M \cdot g \cdot \sin\alpha + \frac{Dr}{4} C_x \rho S V^2 + M \cdot g \cdot \delta \cdot \cos\alpha$$

Ces équations restent vraies dans la limite du roulement sans glissement. Avec un coefficient de frottement fr la force tangentielle Tb est telle que $Tb \leq fr \cdot Nb$

La puissance à fournir à la roue arrière pour obtenir une vitesse V en régime permanent est alors :

$$P_m = F_m \cdot V = 2C_m \cdot \frac{V}{Dr}$$

Ces relations permettent de tracer l'abaque des puissances nécessaires pour une vitesse donnée, paramétrées en fonction de la pente (figure 3):

M	80+25 kg
g	9,81 m.s ⁻²
Dr	650 mm
δ	0,005 m
α	0° à 6°
Cx	0,35
ρ	1,22 kg.m ⁻³
S	0,35 m ²
V	0 à 35 km/h

Modélisation

Valeurs calculées avec une masse totale 105 kg (80kg+25 kg)

V Km/h	Pente 0°		Pente 2°	Pente 4°
	Couple en N.m	P en Watt	P en Watt	P en Watt
5,00	5,2	22,2	72,2	122,2
10,00	5,3	45,6	145,7	245,6
15,00	5,6	71,3	221,4	371,3
20,00	5,9	100,6	300,8	500,6
25,00	6,3	134,7	384,9	634,7

Ce que dit la norme NF EN 15194 (mai 2009)

Il s'agit d'éviter de faire d'un vélo à assistance électrique un cyclomoteur. L'assistance ne doit pouvoir être obtenue qu'à condition que le cycliste pédale en fournissant un effort.

La norme limite l'assistance électrique à une puissance nominale continue maximale de 0,25 kW, dont l'alimentation est réduite progressivement et finalement interrompue lorsque le vélo atteint une vitesse de 25 km/h, ou plus tôt si le cycliste arrête de pédaler.

Les caractéristiques physiologiques du cycliste

La puissance développée par un cycliste dépend de sa condition physique. Un cycliste « moyen » est capable de fournir de 100 à 150 Watt avec une fréquence cardiaque de 150 pulsations par minute (Lacour-78). Cela correspond à l'effort permanent que peut fournir un cycliste, qualifié d'effort en « endurance », à différencier de l'effort en « résistance » qui ne peut être prolongé.

Ces données et ces contraintes définissent les zones de fonctionnement représentées sur la figure 3

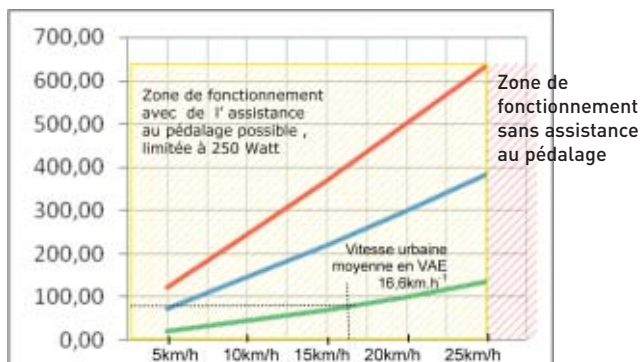


Figure 3 : Puissance en Watt à appliquer à la roue arrière en fonction de l'inclinaison de la route et de la vitesse

Les constructeurs définissent des lois qui prennent en compte le confort du cycliste et la réglementation. Il s'agit de faire travailler le cycliste à son meilleur rendement. Le choix des rapports de multiplication de l'ensemble pédalier-pignon s'appuie sur l'identification du point optimal qui minimise l'énergie demandée au cycliste par rapport à la puissance obtenue.

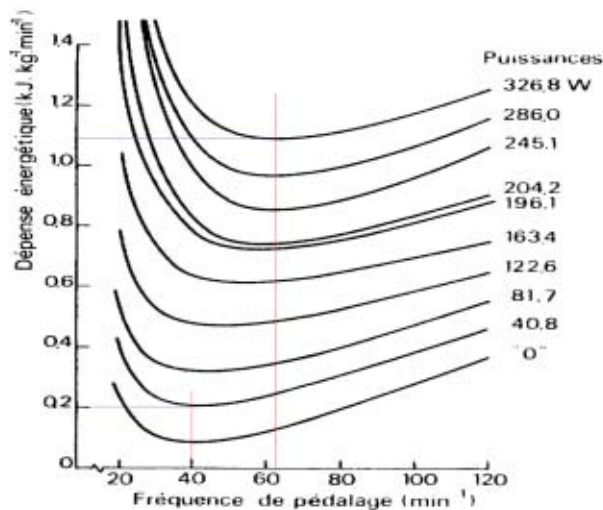


Figure 4 : Fréquence optimale de pédalage pour minimiser la dépense énergétique (d'après Seabury et coll., Ergonomics, 1977,20, 491-498)

Dans l'exemple ci-dessous (Yamaha), l'assistance est maximale aux faibles fréquences de pédalage et peut aller jusqu'à 50%.



Figure 5 : plage de vitesse du cycliste correspondant à la plage de vitesse optimales de pédalage

L'organisation fonctionnelle du système d'assistance

Pour aider le cycliste dans les phases d'accélération, l'assistance est produite sur toute la plage de vitesse, de 0 à 25 km.h⁻¹ heure, en fonction de la demande de couple, et pas seulement en régime permanent. Cela impose de mesurer le couple appliqué au pédalier et de mesurer simultanément la vitesse afin de limiter l'assistance lorsque la vitesse augmente pour finalement la supprimer au delà de 25 km h⁻¹.

Dans l'exemple ci-dessus la vitesse et le couple sont mesurés au niveau du pédalier. Le moteur synchrone autopiloté de 250 Watt maximum est monté directement dans le moyeu.

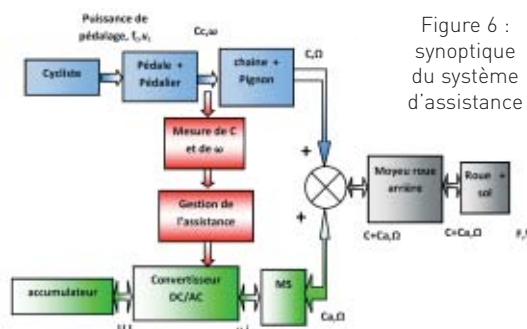


Figure 6 : synoptique du système d'assistance

Modélisation

Estimation de l'énergie à embarquer

Le premier critère qui intéresse l'utilisateur est l'autonomie, en temps et en distance. La quantité d'énergie à embarquer dépend du profil du déplacement, vitesse et pente, mais aussi des régimes transitoires d'accélération et de freinage, particulièrement en déplacements urbains encombrés. On ne peut donc produire qu'une estimation de l'énergie nécessaire. Une démarche consiste à la définir sur le plat et dans les conditions moyennes des déplacements urbains. La fédération Française des Usagers de la Bicyclette estime à 16,6 km.h⁻¹ la vitesse moyenne des vélos à assistance électrique en déplacement urbain (juillet 2006).

Avec l'abaque issu de l'étude théorique du déplacement (figure 3) on quantifie à 80 Watt la puissance nécessaire sur le plat à 16,6 km.h⁻¹. Le rendement de la chaîne de conversion (onduleur, machine synchrone, transmission) est estimé à 0,7. Le rendement de l'accumulateur Li-Ion le plus récent technologiquement est d'environ 0,9. Le rendement global de la chaîne d'énergie est d'environ 0,63. L'assistance est limitée à 50%. Il faut donc délivrer une puissance de 40 Watt utile et demander à l'accumulateur de fournir 63 Watt.

Pour permettre une utilisation d'une demi-journée sans recharge, soit quatre heures d'autonomie, il faut embarquer environ 250 Watt.heure. Les constructeurs choisissent des accumulateurs de 250 à 300 Watt.heure qui permettent de parcourir de 60 à 70 km sur le plat

Les caractéristiques des accumulateurs embarqués

Comme toujours lorsqu'il s'agit d'énergie embarquée, l'énergie et la puissance massique sont les critères les plus importants. Mais les conditions d'exploitation sont également importantes : le rendement, le nombre de cycles, le temps de charge, la gamme de température d'utilisation, la recyclabilité.

technologie	Energie massique Wh/kg	Rendement %	Nbr de cycle	Tension par élément
Plomb (Pb)	30	70	300	2
Nickel - Cadmium (Ni-Cd)	50	80	1000	1,2
NI-MH	80	75	1000	1,2
Lithium - Polymère (Li-Po) 2 ^{ème} génération	170	>90	800	3,7

Les travaux en cours laissent entrevoir une forte progression de l'énergie massique pour les futurs accumulateurs. Les accumulateurs Lithium-Ion sont majoritairement utilisés, cependant l'utilisation d'une technologie Lithium Polymère est en progression en raison de leur forte énergie massique et de leur excellent rendement. Cependant, ils restent délicats à charger et

Technologies en cours de développement	Energie massique en Wh/kg
Zinc - Argent	200
Lithium - Manganèse	300
Lithium - Soufre	300
Lithium - Vanadium	350
Poudre de céramique aluminium	680

Source : ELECTRAVIA®(2010)

nécessitent des chargeurs spécialement dédiés. La charge se fait à 3C.

Ces accumulateurs sont dangereux au-delà de 80°C où ils présentent des risques d'inflammation.

Le moteur électrique

La motorisation utilisée pour les premiers vélos à assistance électrique était une machine à courant continu (MCC). Elle a l'avantage de la simplicité de sa commande dans cette chaîne d'énergie qui doit être réversible si on veut optimiser l'autonomie, par récupération de l'énergie cinétique dans les phases de ralentissement ou en descente. Cependant, dans cette gamme de puissance (250 Watt) l'optimisation du dimensionnement de la MCC en masse et en dimension impose une vitesse élevée et un couple faible, ce qui contraint à utiliser un réducteur de vitesse (multiplicateur de couple). Cela complexifie la conception de la transmission mécanique et dégrade le rendement global.

Sur les générations actuelles de vélo à assistance électrique, c'est une machine synchrone auto-pilotée triphasée à aimants permanents. La roue polaire est intégrée directement au moyeu. Cette technique permet de se débarrasser du réducteur mécanique.

Vélo marque OvO Bike modèle Optimum	
Type de batterie	Ni-MH 8,5 A.h - 36 V (recyclable)
Durée de vie de la batterie :	500 à 800 cycles
Consommation électrique	0,04 € / 100 km
Mode de charge	Chargeur intégré au vélo
Poids batterie	7,5 Kg
Moteur	Moteur synchrone triphasé autopiloté à aimants permanents
	250 W (Norme Pedelec)
Autonomie	50 à 70 km
	4 niveaux d'assistance
Vitesse maxi avec assistance	25 km/h (Norme Pedelec)
Cadre	Aluminium
Jantes	Aluminium
Poids du vélo	26 Kg

D'après <http://www.ovo.fr/beach.php>