Évaluation de l'intérêt d'une hybridation série pour un véhicule à propulsion humaine. Pré-dimensionnement d'une génératrice-pédalier

Judicael AUBRY, Bertrand BARBEDETTE

Centre de Recherche et d'Ingénierie de l'ESTACA, Pôle Systèmes et Energie Embarqués pour les Transports

Campus Ouest – Rue George Charpak 53061 Laval Cedex 9

RÉSUMÉ – Pour bien gérer son effort sur un vélo, seul l'entrainement physique permet de s'améliorer. Les vélos à assistance électrique (VAE) donne un regain de couple lors de difficultés de parcours mais ne gère pas l'énergie développée par le cycliste. Une chaine de traction de type hybride série pour vélo, connue dans le domaine automobile, est présentée dans cette article et permet la gestion de l'effort humain. Les premiers résultats montrent l'intérêt de cette solution comparée à la gestion classique sur la base d'un modèle simple de comportement de cycliste non entrainé. L'article démontre qu'un stockage d'énergie garantira un meilleur bilan de la gestion de l'effort humain. Toutefois, le rendement de cette chaine de conversion devra être suffisamment élevé pour garder ses bénéfices. Dans ce cadre, un premier dimensionnement spécifique d'une génératrice est présentée.

Mots-clés – Véhicule à propulsion humaine, Hybride série, Gestion de l'énergie humaine, Modèle de fatigue

1. INTRODUCTION

Les véhicules personnels utilisés pour nos trajets quotidiens ont une motorisation généralement surdimensionnée vis-à-vis de nos besoins usuels de transport. Le nombre moyen de personnes à bord de voitures particulières [1], la répartition des distances parcourues [2], ou bien encore la vitesse moyenne d'une voiture en ville [3], sont autant d'indicateurs statistiques qui montrent bien que la voiture particulière est sous-utilisé par rapport à ses capacités réelles. Cette sous-utilisation conduit à un coût énergétique ramené au kilomètre parcouru par personne à bord qui est relativement élevé par rapport aux transports en commun en heures de pointes (cf. Tableau 1).

Tableau 1. Cout énergétique sur cycle de vie de différents moyens de transport par personnes et par kilomètre parcouru (Source [1], les marges d'incertitude ne sont pas précisées dans l'article original. Ce dernier comporte également des évaluations de l'émission des GES)

Type de véhicule	Cout énergétique en $kJ.km^{-1}.personne^{-1}$
Marche	63
Vélo	198
Vélo à assistance électrique	221
Berline	2917
Bus (heures de pointe)	688
Bus (moyenne)	2647
Metro	1846
Boeing 737	1862

Les performances en termes énergétiques des moyens de locomotion à propulsion humaine (marche, vélo, tricycle, quadricycle, vélomobile et autres) sont nettement plus élevées. Ces moyens de transport sont une réponse bien plus adaptée à nos besoins réels. Mais certaines difficultés, rationnelles ou non, empêchent une majorité de personnes à généraliser son usage du vélo. Le Plan National Vélo, établi en Janvier 2012, liste un certain nombre de ces difficultés :

- la distance
- le vol
- le climat
- le relief

A côté de ces freins, qui peuvent être bien évidemment toujours discutés, sont aussi rapportés un certain nombre de bénéfices :

- la santé
- la réduction de l'émission de polluants et de gaz à effet de serre

1. Selon la banque mondiale, il y a en France 482 voitures particulières pour 1000 personnes, ce qui laisse supposer d'un taux d'utilisation assez faible de ce type de véhicule. Selon le Commissariat général au développement durable, ce nombre moyen de personnes par véhicules était estimé en 2010, selon le type de déplacement, entre 1,07 et 1,92.

2. En France, 80% des trajets réalisés en véhicule à moteur font moins de 5km.

3. La Communauté Urbaine de Bordeaux estimait en 2009 à 22km/h la vitesse moyenne des trajets internes dans l'agglomération de Bordeaux contre 13km/h pour les déplacements à vélo

– la réduction du bruit
– le budget des ménages
– moindre dépendance aux transports en commun

L'aspect sécurité est traité dans un point à part car il apparait que l'augmentation du nombre de cyclistes accroit en effet le nombre de cyclistes accidentés mais le nombre d'accidents par cycliste baisse. On parle alors d'un phénomène de "[…] *safety by number* provenant en partie du respect par le nombre qui rend plus difficiles […] et plus rares les comportements transgressifs reprochés à certains cyclistes".

Compte tenu à la fois de ces bénéfices intéressants, mais également du faible taux de l'utilisation de la propulsion humaine pour nos déplacements quotidiens, il paraît pertinent de réfléchir à des solutions permettant d'augmenter et de faciliter cet usage.

L'assistance électrique est un des moyens permettant de faciliter l'usage du vélo que les constructeurs et équipementiers du milieu cycliste ont grandement développés ces deux dernières décennies (même si l'idée est bien plus ancienne). Actuellement, elle permet de faciliter l'usage du vélo en fournissant un couple moteur supplémentaire soit au niveau d'une des deux roues, soit directement au niveau du pédalier. Sur les modèles récents de VAE, le couple d'assistance est régulé proportionnellement à une mesure du couple de pédalage. Cela permet de maintenir une sensation d'effort modérée sans pour autant fournir une assistance totale. Il est à noter que les solutions actuelles d'assistance pour vélos peuvent toutes être qualifiées d'**hybride parallèle**, voire même de "plug-in hybrid" car l'utilisation de ces dispositifs ne s'envisage pas sans une recharge régulière de la batterie. Ainsi, contrairement à un vélo classique, **l'énergie pour se mouvoir n'est pas d'origine exclusivement humaine**. Ce dernier point constitue d'ailleurs la distinction légale entre un cycle et un cycle à assistance électrique. Un vélo avec une assistance électrique qui serait non rechargeable, ne serait donc pas, dans l'état actuel de la législation, catégorisé dans les vélos à assistance électrique et ne serait de fait pas soumis aux restrictions de vitesse (25km/h) et de puissance (250W).

Dans l'automobile, mais aussi dans le ferroviaire, d'autres types d'hybridation ont été étudiées et développées : l'**hybridation série** et l'**hybridation série-parallèle** parfois appelée "full hybrid". Ces autres types d'hybridation présentent un certain nombre d'avantages et d'inconvénients vis-à-vis de l'hybridation parallèle. Elles permettent par exemple de découpler totalement le régime moteur de la vitesse d'avance du véhicule. Ce régime peut alors être choisi de façon à minimiser la consommation spécifique du moteur thermique ou bien encore de trouver une zone de bon compromis vis-à-vis de l'émission de polluants.

Bien que ces trois types d'hybridation soient développées de façon relativement équilibrée dans le domaine automobile, seul un type d'hybridation existe majoritairement dans le domaine du cycle : **l'hybride parallèle** (VAE). Aussi relativement peu de tentatives d'autres types d'hybridation peuvent être répertoriées

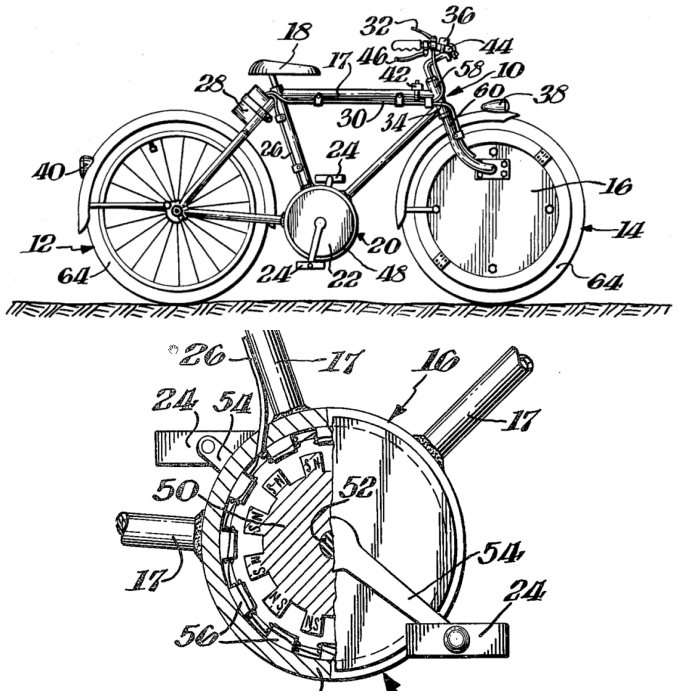


Fig. 1. "Electrically powered cycle", Kinzel, 1975 [2] : vélo dans son ensemble sur l'image du haut, focus sur la génératrice pédalier en dessous.

dans la littérature scientifique ou dans le milieu industriel dans le domaine du cycle. Voici celles que nous sommes parvenus à trouver :

1.1. Kinzel, 1975

Augustus B. Kinzel a déposé un brevet en 1975, dont voici le résumé :

"A power operated cycle includes a manually powered generator which supplies energy to drive a motor associated with one of the wheels of the cycle for thereby imparting motion to the cycle."

Ce brevet pose l'idée de l'hybridation de type série mais sans l'utilisation d'un système de stockage d'énergie entre la production au niveau du pédalier et la consommation dans le moteur-roue. Ce système constitue donc, d'un point de vue simplement fonctionnel, une transmission électrique à rapport de vitesse continûment variable (CVT), comme cela est précisé dans un des objets de l'invention :

"An object of this invention is to provide a power operated cycle capable of continuously variable speed operation."

1.2. Andreas Fuchs & Jürg Blatter

Andreas Fuchs et Jurg Blatter ont produit en 1998 un prototype d'un véhicule à propulsion humaine avec une hybridation de type série doté d'un système de stockage. Leurs travaux ont consisté à développer une architecture hybride série adapté à un tricycle. Un prototype a été réalisé. Un brevet relatif à la loi de contrôle du couple résistant au niveau de la génératrice pédalier a été déposé [4]. Les résultats ne s'attachent cependant pas à l'optimisation des composants du système tels que les éléments de

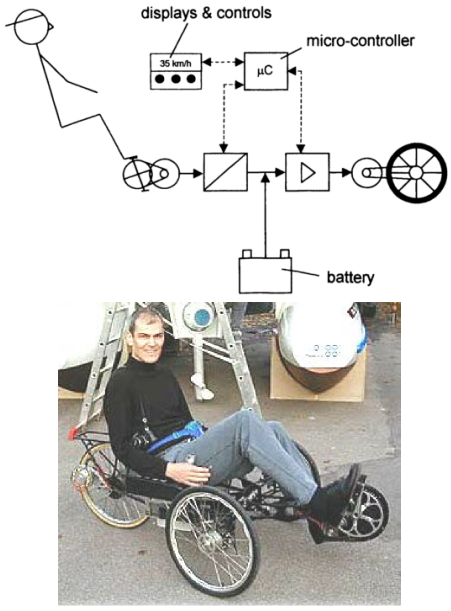


Fig. 2. Prototype d'un tricycle à hybridation série réalisée en 1998 à l'Université de Berne par Andreas Fuchs et Jurg Blatter [3, 8]

conversion électrique et électromécanique ni à la stratégie de gestion de l'énergie du système de stockage.

1.3. Watterson

L'article de Watterson balaie les architectures hybrides série-parallèle en se basant notamment sur un brevet de Moeller et sur l'idée générale d'hybridation de la Toyota Prius. Il présentent donc différentes combinaisons entre les machines électriques, les trains épicycloïdaux avec notamment une solution où les deux moteurs-générateurs sont placés dans chacune des deux roues comme représenté sur la figure 3. L'article ne s'attache pas a réaliser un dimensionnement d'une des architectures.

1.4. Mando Footloose

Le Mando Footloose, de la société coréenne Mando Corp., a été présenté fin août 2012 lors du salon Eurobike. L'objectif principal de ce vélo est d'être pliable et transportable très facilement. Pour répondre à cette objectif, la solution d'une transmission électrique du pédalier à la roue a été adopté, ce qui en fait un vélo hybride série. La puissance du moteur roue arrière est de 250W. Il est également doté d'une batterie Lithium de 36V 8.2Ah, ce qui lui permettrait d'atteindre 45km d'autonomie en mode 100% électrique. Ce vélo n'a en effet pas été conçu pour fonctionner en mode 100% humain. La génératrice du pédalier a plutôt une fonction d'appoint d'énergie lorsque l'état de charge de la batterie devient faible.

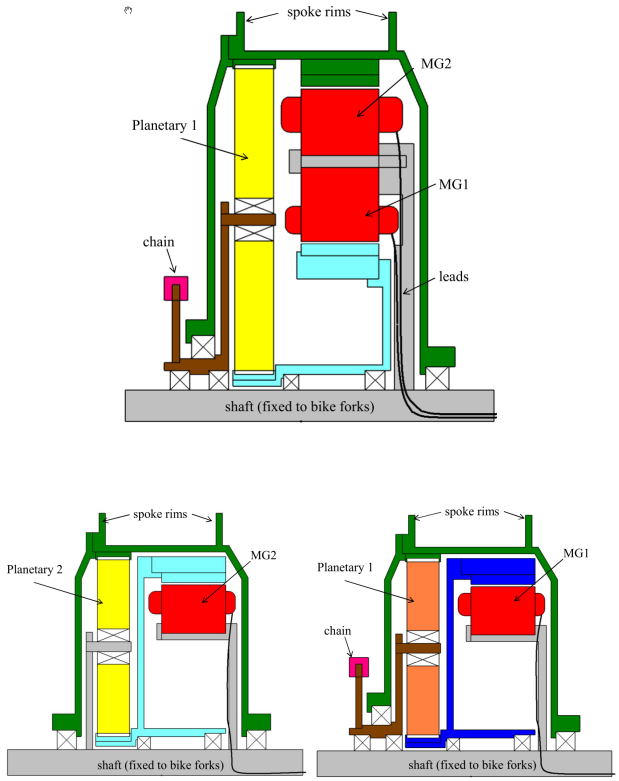


Fig. 3. Architectures hybrides de type série-parallèle intégrées dans un moyeu de roue de vélo. En haut, architecture intégrée dans un seul moyeu. En bas, une architecture séparée dans le moyeu avant et le moyeu arrière. [5]

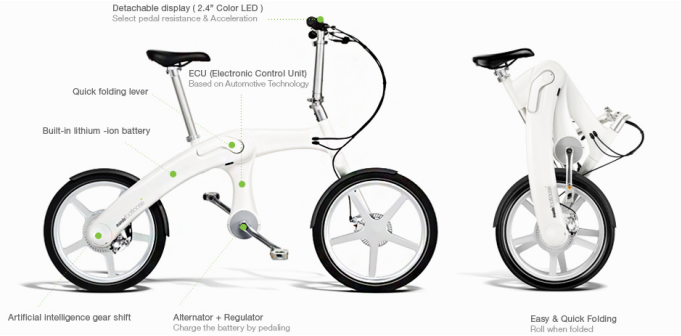


Fig. 4. Mando Footloose (image à destination commerciale) [7]

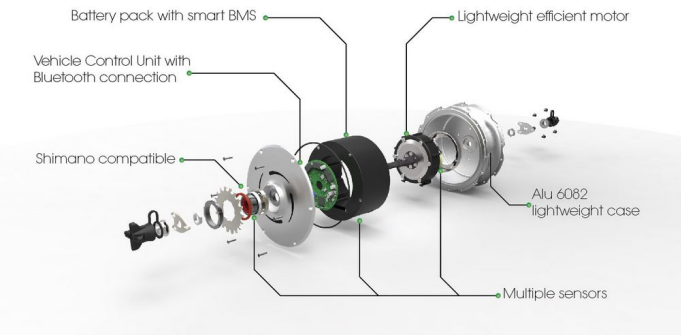


Fig. 5. Vue éclatée du WIZE Hub (image à destination commerciale) [10]

1.5. *Zehus : le WIZE Hub avec la technologie Bike+*

Zehus (pour Zero Emission Human Synergy) est une spin-off de l'École polytechnique de Milan. A la suite de travaux de recherche [9], un produit commercial a été développé : le WIZE Hub. Ce Hub est à l'image de la Copenhagen Wheel, développée au MIT, c'est à dire un hub qui intègre à la fois le moteur, le convertisseur électronique de puissance, l'électronique de contrôle et la batterie. Mais l'originalité de ce produit découle des travaux de recherche et consiste en un algorithme optimisé de gestion de l'assistance ainsi que de l'énergie (Technology Bike+). L'objectif est de fournir **une assistance sans apport d'énergie extérieure** : la batterie doit se recharger exclusivement avec l'énergie humaine. Il s'agit donc de basculer entre trois modes : Start, Pedaling et Braking (cf Fig 6).

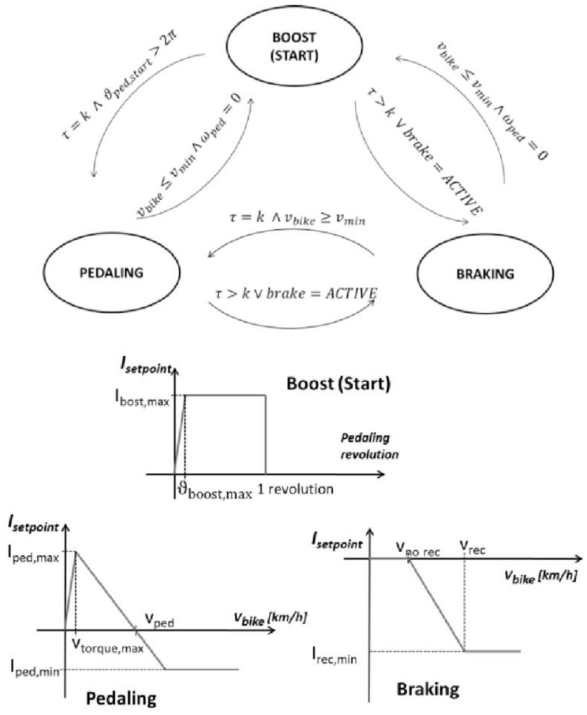


Fig. 6. Extrait de l'article [9] présentant le diagramme d'état de la stratégie d'assistance, les différentes transitions entre les états, ainsi que les lois de contrôle adoptées dans les 3 états : Start, Pedaling, Braking

Les résultats montrent que sur un même parcours, l'assistance n'a pas permis d'améliorer ou détériorer de façon notable la vitesse moyenne ni la puissance moyenne fournie par le cycliste. Par contre, la consommation de dioxygène VO_2 est passée de 9.31L à 7.19L (les incertitudes de mesure ne sont pas précisées dans l'article initial) et compte tenu de l'énergie mécanique fournie identique dans les deux cas (37kJ), le rendement métabolique passe de $3.98\text{kJ}\,\text{L}^{-1}$ à $5.21\text{kJ}\,\text{L}^{-1}$.

La technologie développée par ZEHUS n'utilise pas une hybridation de type série mais bien une architecture classique de type parallèle. Cependant, la prise en compte d'indicateurs physiologiques dans la gestion de l'assistance et l'indépendance vis-à-vis d'une source d'énergie extérieure (non humaine), nous apparait cohérente avec les potentialités d'une transmission de type hybride série.

La technologie ZEHUS a remporté en 2014 le premier prix de l'innovation lors du "China Cycle" ainsi que le prix de la compagnie la plus innovante dans la catégorie "Innovators under 35" du MIT technology review.

2. Analyse préliminaire de l'intérêt d'une chaine de transmission de type hybride série pour un cycle.

L'état de l'art nous montre que les quelques études et tentatives sur le sujet n'ont été que peu poussées sur certains aspects, notamment celui de l'optimisation du dimensionnement de la chaine de conversion et celui de la gestion d'énergie. Ces études n'ont pas permis d'évaluer quantitativement l'intérêt d'un nouveau type d'hybridation pour un cycle. Nous allons nous focaliser dans la suite sur une hybridation de type série. La solution série-parallèle est également une solution intéressante mais que nous n'aborderons pas dans le cadre de ce travail.

Sur un cycle, une hybridation de type série, comprend donc en premier lieu une génératrice au niveau du pédalier. Le cycliste joue alors un rôle analogue à celui du moteur thermique dans la solution automobile. Il peut pédaler à cadence régulée et fournir une puissance qui peut être monitorée (ex : affichage de la puissance à la vue du cycliste et régulation par *bio-feedback*). La génératrice électrique convertit la puissance mécanique humaine en puissance électrique, la transmet sur un bus DC, pour être ensuite soit utilisée directement et entièrement pour alimenter une machine électrique relié mécaniquement aux roues, soit pour être partiellement stockée dans un système de stockage de l'énergie en vue d'une utilisation différée. La machine électrique placée au niveau des roues peut aussi jouer parfois le rôle de génératrice lors de phases de freinage récupératif.

Sans l'utilisation d'un système de stockage, une hybridation de ce type réalise la même fonction qu'une transmission à rapport continument variable (CVT) comme nous l'avons fait remarqué dans la section 1.1.

Avec l'utilisation d'un système de stockage intermédiaire entre la génératrice pédalier et le moteur-roue,l'énergie utilisée pour se mouvoir peut alors être **exclusivement d'origine humaine** de la même façon que pour un vélo classique mais contrairement à une assistance électrique classique de type hybride parallèle. Comme nous l'avions remarqué précédemment, un tel système d'hybridation, bien que fournissant parfois une assistance électrique, peut donc rester d'un point de vue légal, dans la catégorie des cycles et non dans celle des cycles à assistance électrique.

Il est cependant bien évident que le rendement de cette transmission purement électrique, du pédalier à la roue, sera moins bon que le rendement d'une transmission par chaine ou par cour-

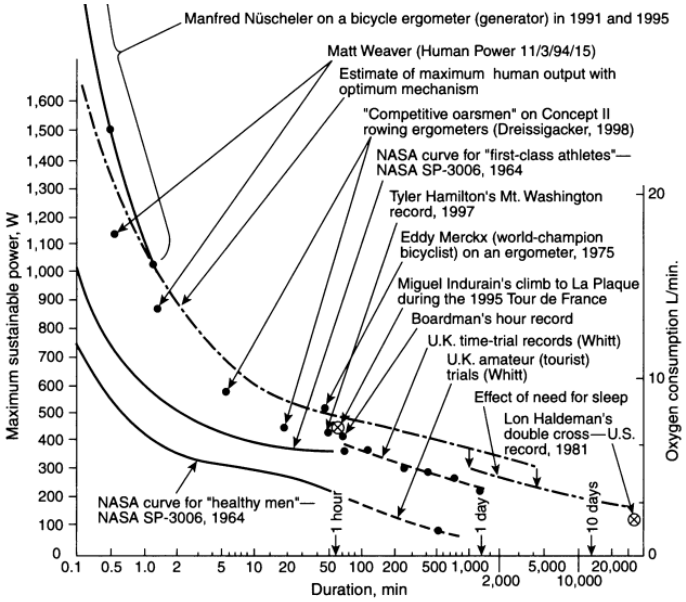


Fig. 7. Courbes d'épuisement dites de *puissance critique* [8]

roie crantée, qui dépasse généralement les 95%. La question du rendement doit cependant être étendue au cycliste. En effet, si une transmission hybride série, permet un gain en consommation énergétique et/ou en termes de fatigue du cycliste, ce gain doit être évalué et comparé aux pertes supplémentaires générées dans la transmission électrique. L'objectif est d'arriver à un bilan positif de "l'Homme à la roue". Deux leviers permettent d'améliorer le bilan. Tout d'abord, l'optimisation du dimensionnement de la chaine de conversion qui résulte toujours d'un compromis masse-rendement. À ces niveaux de puissance (100 à 200W), les compromis classiquement choisis dans les solutions du commerce favorisent plutôt la masse que le rendement [4]. Il s'agit donc de trouver quel est, pour cette nouvelle application, le meilleur compromis masse-rendement de la chaine de conversion. Un deuxième levier pour améliorer le bilan concerne la stratégie de gestion de l'énergie. En effet, si un système de stockage peut permettre de tamponner des fluctuations de puissances, il devient alors possible de tendre vers un pédalage à puissance constante (qui est le moins fatigant) mais également une vitesse d'avance constante (ce qui permet de minimiser les pertes aérodynamiques mais sera créatrice de fluctuations de puissance demandée à cause de la pente).

2.1. *Définition d'un critère de fatigue en fonction d'un profil temporel de puissance mécanique fournie.*

Le réseau de courbes ci-dessus est issu de [8] et représente des limites d'épuisement dans le plan Puissance de pédalage-Durée de pédalage. Intéressons-nous seulement à celle de "l'homme en bonne santé" (celle en bas à gauche). Des tests physiologiques ont donc permis de montrer qu'il est possible de maintenir une puissance de 200W pendant une durée d'1h avant d'être en limite d'épuisement. Une puissance de 100W peut elle être maintenue pendant 6h (300min), tandis qu'une puissance de 750W ne peut être maintenue que pendant 6s. La relation entre la puissance et le niveau de fatigue engendrée est donc fortement non-linéaire. Et sur un trajet donné, à même puissance moyenne, il apparaît donc préférable, en termes de fatigue, de maintenir une puissance constante plutôt que d'avoir des fluctuations de puissance de pédalage.

Sur la base de cette courbe, aussi appelée *"critical power curve"*, il est possible de construire un indicateur de fatigue qui prend comme donnée d'entrée un profil temporel de puissance de pédalage $P_{human}(t)$. La courbe d'épuisement peut être écrite sous la forme d'une fonction de la durée de pédalage. Nous utiliserons plutôt la réciproque de cette fonction que l'on peut écrire sous la forme :

$$d_{exhausting} = f_{exhaust}(P_{critical}) \tag{1}$$

Nous définissons alors un indice de fatigue cumulée, fonction du profil de puissance fournie $P_{human}(t)$, de la forme :

$$i_{fatigue}(t) = \int_0^t \frac{1}{f_{exhaust}(P_{human}(t))} \mathrm{d}t \tag{2}$$

Ce critère est construit de manière à quantifier la fatigue sous la forme d'un pourcentage d'épuisement total en partant de l'hypothèse (critiquable) que la sensation de fatigue évolue de façon linéaire en fonction du temps à puissance constante. Ainsi, pédaler 30min à 200W générera un indice de fatigue de 50%. L'idée est bien évidemment d'appliquer ce critère sur des profils de puissances plus complexes. Plus que la valeur en elle-même, l'intérêt est essentiellement de permettre de comparer, en termes de fatigue ressentie, plusieurs profils de puissance de pédalage différents.

2.2. *Modélisation du problème*

Une modélisation mécanique simple de l'ensemble (Cycliste+Cycle) après application du principe fondamental de la dynamique donne :

$$\left(m_{human} + m_{cycle}\right) \frac{dv}{dt} = \frac{P_{human}(v,t)}{v} - \frac{1}{2}\rho S C_x v^2 - \left(m_{human} + m_{cycle}\right) g \left(C_{rr} + \frac{dz}{dx}\right) \tag{3}$$

où

m_{human} est la masse du cycliste $(= 80\text{kg})$

m_{cycle} est la masse du véhicule à propulsion humaine hors cycliste $(= 20\text{kg})$

ρ est la masse volumique de l'air $\left(= 1200\text{g m}^{-3}\right)$

4. Il est en effet assez rare de trouver des machines électriques de rendement supérieur à 95% sur ces niveaux de puissance

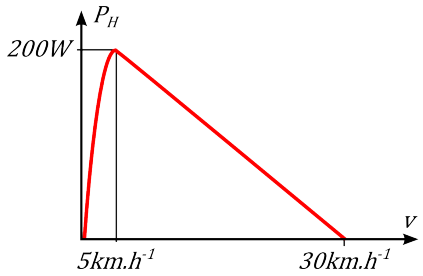


Fig. 8. Modèle de comportement en puissance humaine fournie en fonction de la vitesse

SC_x est le maître-couple du VPH en $(= 0.4\text{m}^2)$

v est la vitesse de l'ensemble cycliste+VPH en m s^{-1}

$P_{human}(v,t)$ est la puissance fournie par le cycliste en W. (Le rendement de la chaine de conversion est considéré comme étant unitaire)

C_{rr} est le coefficient de roulement des roues sur le sol $(= 0.01)$

$z(x)$ est le profil d'élévation du trajet en m

Dans le cadre de cette analyse préliminaire, les effets dynamiques ont été négligés et l'expression 3 se réduit à un bilan de puissance :

$$P_{human}(v,t) = \frac{1}{2}\rho SC_x v(t)^3 - (m_{human} + m_{cycle})\, g \left(C_{rr} + \frac{dz}{dx}\right) v(t) \quad (4)$$

Dans ce cadre, il apparait naturellement que la vitesse instantanée $v(t)$ est une conséquence de la puissance instantanée fournie par le cycliste $P_{human}(t)$. Il convient donc de supposer d'un modèle de comportement en puissance du cycliste. C'est l'objet du paragraphe suivant.

2.3. *Modélisation d'un comportement en puissance d'un cycliste sur un vélo classique*

La détermination de la puissance instantanée fournie par le cycliste se fait à partir d'une fonction $P_{human}(v)$. Nous partons du postulat qu'au delà d'une certaine vitesse (ici 30km h^{-1}), le cycliste arrête de pédaler et ne fournit plus de puissance. A contrario, lorsque sa vitesse devient faible, celui-ci fournit plus de puissance pour revenir à une vitesse de croisière ou maintenir une vitesse suffisante pour son équilibre dans le cas d'une côte. Bien évidemment, à vitesse faible, la puissance qu'il fournit ne peut être maintenue et chute à vitesse nulle. La courbe $P_{human}(v)$ considérée, est représentée sur la figure 8.

2.4. *Premier exemple de résultats sur trois types de transmission : classique, hybride série sans stockage et hybride série avec stockage*

Le premier graphique de la figure 9 représente un exemple de profil d'élévation sur un trajet aller-retour particulier.

Le second graphique représente, en bleu, la vitesse du vélo, et en vert, la puissance humaine développée calculées à partir du modèle de comportement du cycliste sur un vélo doté d'une transmission par chaine classique décrit précédemment. On remarque ainsi une corrélation entre la pente du trajet et la puissance.

Le troisième graphique représente les profils de vitesse et de puissance obtenus sur un cycle qui serait doté d'une hybridation de type série mais dépourvue de système de stockage d'énergie sur le bus DC. La puissance de pédalage est considérée constante égale à la puissance moyenne fournie sur le cas précédent. Comme nous l'avons déjà évoqué, cette transmission sans stockage réalise une fonction de CVT et on remarque qu'à puissance constante, les fluctuations de vitesse sont plus importantes que précédemment.

Enfin le dernier graphique représente les profils de puissance et de vitesse obtenus avec un système hybride série doté d'un système de stockage entre le pédalier et la roue et ayant une capacité suffisamment grande pour ne pas atteindre les limites d'état de charge. Dans ce dernier cas, la puissance de pédalage peut être maintenue constante tout comme la vitesse d'avance du cycle. La valeur de la vitesse est déterminée de telle sorte que la puissance moyenne fournie par le système de stockage soit nulle. Ainsi, l'énergie fournie sur l'ensemble du trajet est exclusivement d'origine humaine. La détermination de la valeur de cette vitesse nécessite de connaître le trajet et son dénivelé *a priori*, ce qui est généralement le cas pour des trajets quotidiens ou réguliers.

En conclusion, une hybridation série **sans stockage** permet de maintenir une cadence et une puissance de pédalage toujours découplées des variations de pente du parcours. Une hybridation série **avec stockage** permet en plus de maintenir une vitesse constante si le parcours est connu à l'avance.

2.5. *Analyse des performances des trois types de transmissions*

Analysons maintenant les performances des trois solutions au regard du critère de fatigue que nous avons précédemment défini dans l'équation 2. La figure 10 représente les performances dans le plan (Temps de parcours,$i_{fatigue}$). La trajet considéré est le même que sur l'exemple du chapitre précédent. Le rond bleu fait référence à la transmission classique par chaine. Les triangles rouges font référence à la solution hybride série sans stockage pour différents niveaux de puissance considérées comme étant régulées par le cycliste via bio-feedback (exemple : retour visuel du niveau de puissance produit). On constate ainsi que cette première solution de transmission permet de profiter de meilleurs compromis (Temps de parcours,$i_{fatigue}$) par rapport à un cycle doté d'une transmission classique. Il est possible, à même niveau de fatigue cumulée sur le parcours, d'avoir un temps de parcours plus faible, ou bien de se situer à un temps de parcours identique mais à fatigue cumulée plus faible.

Les mêmes conclusions peuvent être apportées avec une trans-

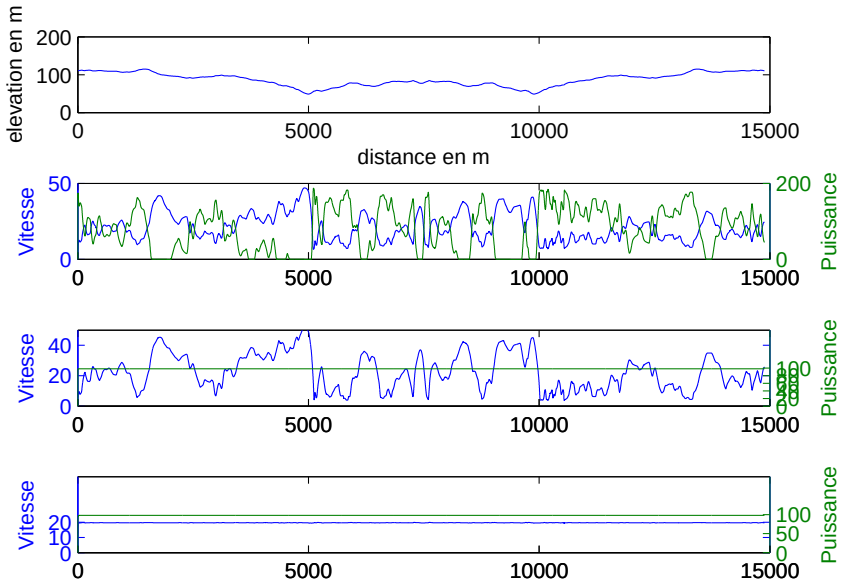


Fig. 9. Exemples de résultats de simulations, de haut en bas : 1 - Profil d'élévation 2 - Profils de vitesse (en $\mathrm{m\,s^{-1}}$) et puissance (en W) pour un cycle avec une transmission classique 3 - pour un cycle avec une transmission hybride série sans stockage 4 - pour un cycle avec une transmission hybride série avec stockage

mission hybride série avec stockage (carrés violets) mais un écart nettement plus marqué. Nous souhaitons insister ici sur le fait que la modélisation de la fatigue via l'indicateur défini plus haut n'a pas vocation a fournir une quantité précise. Elle permet avant tout de fournir un outil de comparaison entre différents cas de figure. Ici, l'écart est suffisamment marqué pour préjuger d'un certain intérêt d'une transmission de type hybride série avec stockage.

La figure 11 correspond aux mêmes résultats mais avec une prise en compte d'un rendement cette fois-ci non unitaire mais égal à 80%. Cette hypothèse, qui reste simpliste, permet de se rendre compte de l'influence de cette grandeur. Ainsi l'hybridation série avec stockage reste intéressante, mais l'écart se réduit. Il faut donc veiller à ce que le rendement de la chaine de conversion ne soit pas trop mauvais malgré les faibles puissances mises en jeu. Une première étape dans ce travail est présenté dans le chapitre précédent et se focalise uniquement sur la génératrice du pédalier qui est le premier élément de conversion de puissance de la chaîne complète.

3. Pré-dimensionnement d'un des composants de la chaine hybride série : la génératrice-pédalier

Pour que cette solution de transmission soit pertinente, et même si nous avons précisé précédemment que la question du rendement ne doit pas être entendue seulement au niveau des éléments de conversion de puissance mais également au niveau du cycliste, nous venons de montrer qu'il faut quand même disposer de composants qui présentent des rendements suffisants. Prenons le cas de la génératrice située au niveau du

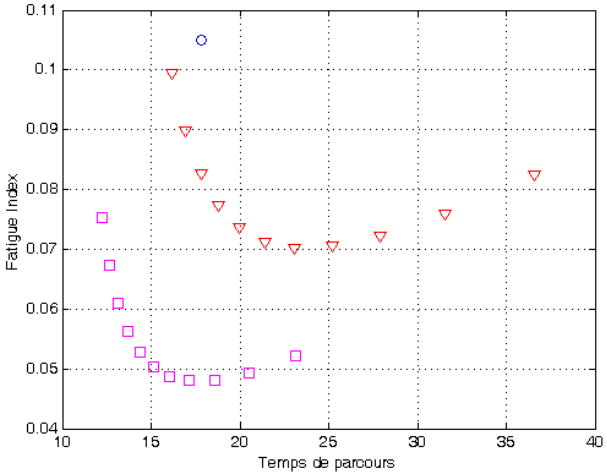


Fig. 10. Comparaison des performances de trois solutions de transmission : classique à chaine (rond bleu), hybride série sans stockage (triangle rouge) et hybride série avec stockage (carré violet). Le rendement de l'ensemble de la chaine de conversion est considéré égal à 100%.

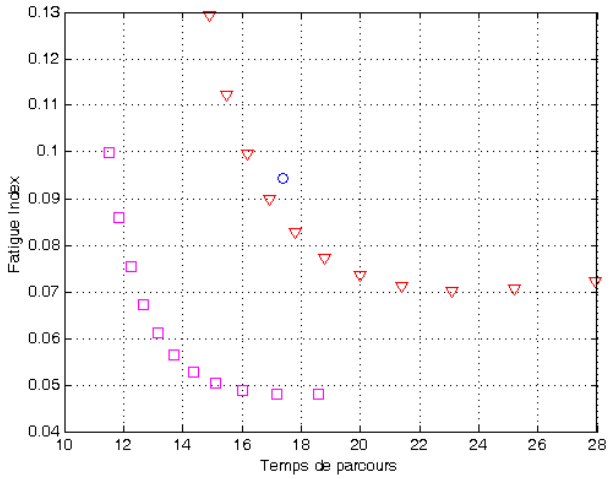


Fig. 11. Comparaison des performances de trois solutions de transmission : classique à chaine (rond bleu), hybride série sans stockage (triangle rouge) et hybride série avec stockage (carré violet).Le rendement du pédalier à la roue est considéré égal à 80%

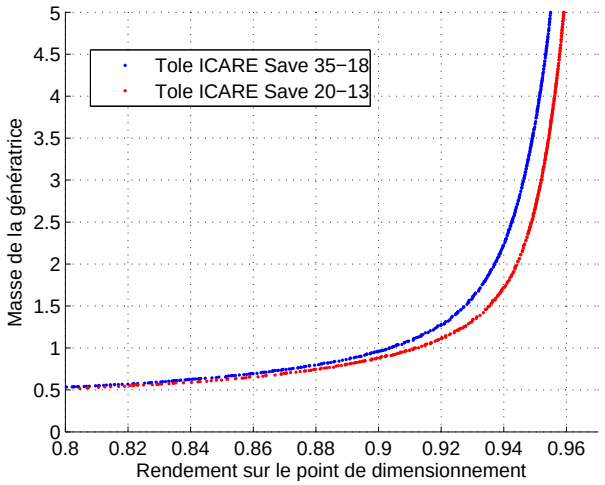


Fig. 12. Résultat d'une optimisation bi-objectif masse-rendement pour une machine synchrone à aimants permanents déposés en surface pour deux types de tôles (Gamme ICARE SAVE d'Arcelor-Mittal). Cahier des charges de la génératrice pédalier : 80tr/min, 100W avec un réducteur de rapport 10 soit une vitesse de 800rpm et un couple de 1,2N.m

pédalier qui a en charge de convertir une puissance comprise en moyenne entre 100 et $200W$. À ces niveaux de puissance, les solutions *off-the-shelf* sont généralement dimensionnées pour optimiser un critère masse et/ou coût plutôt qu'un critère rendement et/ou pertes. Nous souhaitons ici montrer qu'il est possible de dimensionner une génératrice de faible puissance présentant un rendement intéressant. Bien évidemment, ce choix se fait au détriment de la masse.

La figure 12 est le résultat d'une optimisation bi-objectif masse-rendement pour une machine synchrone à aimants permanents déposés en surface. Les modèles utilisés sont identiques à ceux présentés dans [11]. Nous invitons le lecteur à s'y référer pour plus de détails sur ces derniers. La principale différent avec le travail précédent réside dans la non-prise en compte du convertisseur électronique de puissance. En effet, comme nous considérons des objectifs d'optimisation focalisés sur la machine électrique. Aussi prendre en compte le convertisseur dans l'optimisation n'aurait pas de sens. Nous ne présenterons ici que certains paramètres principaux du problème.

Tableau 2. Paramètres d'optimisation

	Description	**Intervalle**	**Unité**
l_u	Longueur active de la machine	$[0.01; 0.5]$	m
r_s	Rayon interne du stator	$[0.05; 1]$	m
p	Nombre de paires de pôles	$[1; 200]$	$-$
e	Entrefer	$[0.2; 100]$	mm
h_{mag}	Hauteur des aimants	$[2; 100]$	mm
h_{rot}	Hauteur de la culasse rotorique	$[0.1; 20]$	cm
h_{slot}	Hauteur d'encoche	$[0.1; 20]$	cm
h_{stat}	Hauteur de la culasse statorique	$[0.1; 20]$	cm
k_{slot}	Rapport de largeur d'encoche sur largeur de dent	$[0.3; 0.7]$	$-$

Les contraintes considérées sont les suivantes :
- $e > 0.2 + 3\sqrt{r_s l_s}$ (mm)
- $r_s - e - h_{mag} \geq h_{rot}$
- $r_s + h_{slot} + h_{stat} \leq r_{max} = 150$(mm)
- $w_{dent} \geq 3$ (mm)
- $w_{encoche} \geq 3$ (mm)
- $\Delta\Theta \leq 110°C$

Le cahier des charges du dimensionnement est réduit à un seul point de fonctionnement :
- $P = 100$W
- $N = 800$tr/min
- $T = 1,2$N.m

Ce cahier des charges correspond à une génératrice qui serait situé derrière un réducteur de rapport 10. En effet, les vitesses de rotation au niveau du pédalier qui sont communément admises comme étant les plus efficaces se situent autour de 80tr/min.

Tableau 3. Constantes du problème

	Description	**Valeur**
B_r	Induction rémanente des aimants permanents	$1\,T$
k_{fill}	Coefficient de remplissage d'encoche	0.4
k_H	Coefficient de pertes par hystéresis (tôle ICARE Save 20-13)	$39\,A.m.V^{-1}.s^{-1}$
α_p	Coefficient de pertes par courants de Foucault (tôle ICARE Save 20-13)	$0.011\,A.m.V^{-1}$
k_H	Coefficient de pertes par hystéresis (tôle ICARE Save 35-18)	$40\,A.m.V^{-1}.s^{-1}$
α_p	Coefficient de pertes par courants de Foucault (tôle ICARE Save 35-18)	$0.022\,A.m.V^{-1}$
ρ_{Cu}	Résistivité du cuivre @130°C	$2.5.10^{-8}\,\Omega.m^{-1}$
λ_{Cu}	Conductivité thermique équivalente du bobinage	$0.5\,W.m^{-1}.K^{-1}$
λ_{Fe}	Conductivité thermique équivalente des tôles	$30\,W.m^{-1}.K^{-1}$
h	Coefficient de transfert thermique par convection	$20\,W.m^{-2}.K^{-1}$

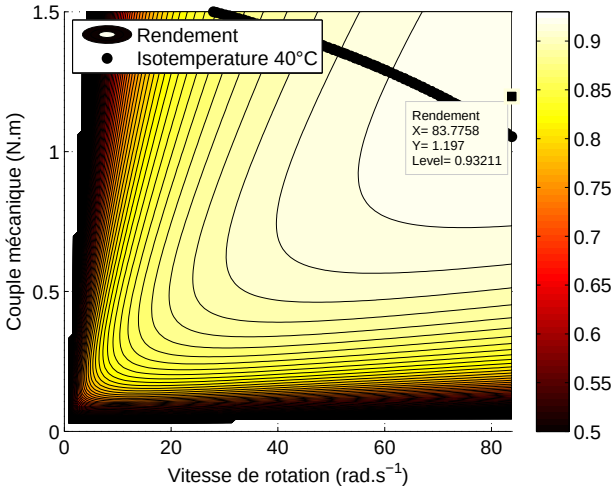


Fig. 13. Carte de rendement d'une des solutions du front de Pareto et une courbe d'iso-température de 40°C à titre d'information

L'optimisation a été menée pour deux types de tôles ferromagnétiques qui présentent des caractéristiques différentes en termes de pertes. Pour les solutions de haut rendement, l'amélioration de la masse à rendement donné peut monter jusqu'à 1kg. Il est de 300g sur les solutions de rendement égal à 93%.

Les figures 13 et 14 représentent justement la carte de rendement ainsi que la géométrie de la génératrice obtenue pour un rendement de 93% avec la tôle ICARE Save 20-13. Cette solution étant choisie parmi les solutions à haut rendement, la contrainte de température n'est pas atteinte pour cette solution comme le montre l'iso-température représentée sur la figure 13.

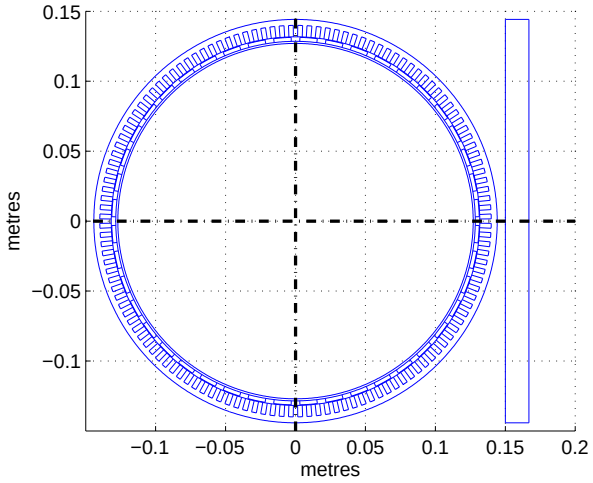


Fig. 14. Géométrie de la solution considérée

Nous souhaitons ici noter que la question de la masse devient moins primordiale dans un cycle à hybridation série que sur un vélo classique. En effet, le système de stockage va au final être principalement un moyen de stockage de l'énergie potentielle et cinétique de l'ensemble (Cycle+Cycliste). Si la masse du cycle augmente, la capacité de stockage devra être ajustée en conséquence mais cela n'aura qu'un effet mineur sur la puissance moyenne supplémentaire que devra fournir le cycliste. Dans le cas d'une transmission classique, tout ajout de masse supplémentaire se traduit par une puissance de pédalage accrue en côte car une certaine vitesse minimale doit être maintenue pour assurer l'équilibre. Cet impact de la masse se ressentira également au moment du démarrage. La fatigue engendrée augmentant plus rapidement que la puissance, il apparait dans ce cas qu'il faut

tendre à minimiser la masse embarquée. Ainsi, dans le contexte d'une transmission hybride série avec stockage, il n'est pas aussi pénalisant d'embarquer une masse plus importante, d'autant plus si cette dernière a vocation à améliorer le rendement de conversion.

4. Conclusions et Perspectives de travail

Dans ce papier, nous avons réalisé un état de l'art sur les autres types d'hybridation pour cycles. En effet, l'hybridation de type parallèle représente la solution majoritaire dans ce domaine. Mais des solutions originales d'hybridation apparaissent aujourd'hui à l'image du Mando Footloose.

Nous avons voulu évalué la pertinence d'une hybridation de type série vis-à-vis de la fatigue ressentie. Un indice de fatigue a donc été proposé. Il fournit un élément de comparaison que nous avons exploité sur un trajet particulier. Il apparait qu'une transmission de type hybride série présente un intérêt particulier en termes de gestion de la fatigue. En effet, cette solution permet, pour un trajet donné, de proposer des compromis a priori plus intéressants vis-à-vis de deux objectifs à minimiser que sont le temps de parcours et l'indice de fatigue. Selon l'utilisateur, le compromis choisi pourra être différent. Cette étude se base sur un modèle simpliste de comportement du cycliste qu'il convient d'améliorer et de préciser dans la suite des travaux. Nous n'avons également pas tenu compte des "évènements" de parcours, tels que des arrêts ou ralentissements, qui peuvent avoir un impact important sur les résultats.

Dans un second temps, nous avons voulu montrer qu'il était possible de dimensionner des composants de conversion d'énergie de faible puissance nominale mais ayant des rendements suffisants pour cette application. Évidemment, ce choix de conception se fait aux dépens d'une masse plus importante. Sur ce point, il convient dans la suite d'étudier le dimensionnement d'autres types de machines ou plus précisément de bobinage, plus adaptés à cette application, notamment à encochage fractionnaire et à bobinage concentrique comme le sont la plupart des moteurs-roues utilisés dans les vélo électriques actuels pour des raisons de réalisation industrielle. De façon plus globale, des contraintes de faisabilité industrielle

Sur d'autres aspects non évoqués dans ce papier, des travaux sont en cours sur l'optimisation de la gestion d'énergie. En effet, pour maintenir la vitesse la plus constante possible (ce qui est le plus intéressant du point de vue énergétique), il peut être pertinent de tenir compte d'une connaissance du parcours a priori, ce qui est souvent le cas sur des trajets quotidiens. L'utilisation d'algorithmes basés sur la programmation dynamique permet par exemple de résoudre ce problème d'optimisation sous contraintes.

La réalisation d'un prototype est envisagé dans les mois qui viennent. Ce dernier sera d'abord statique et permettra d'affiner les modèles physiologiques et de comportement du cycliste. Un des objectifs de cette première phase sera d'obtenir une carte de rendement du cycliste mais également d'évaluer la fatigue ressentie. Par la suite, nous le rendrons roulant afin de tester les stratégies de gestion d'énergie en temps réel et d'évaluer l'impact des modifications des relations entre la perception et l'action que nous sommes tous habitués à avoir sur notre vélo.

5. Références

[1] S. Dave, *Life Cycle Assessment of Transportation Options for Commuters*, 2010

[2] A. B. Kinzel, "ELECTRICALLY POWERED CYCLE," US Pat. 3,884,317, 1975.

[3] A. Fuchs, "Series Hybrid Drive-System : Advantages for Velomobiles," Hum. Power eJournal, no. April, pp. 1–13, 2008.

[4] A. Fuchs and J. Blatter, "Drive system operated by muscle-power". US Patent 7,156,780. ,2007

[5] P. Watterson, "An electric assist bicycle drive with automatic continuously variable transmission," ICEMS, pp. 2992–2997, 2008.

[6] F. Moeller and M. Weber, "BICYCLE TRANSMISSION SYSTEM," US Pat. 2012/0012412, 2012

[7] "Mando Footloose." [Online]. Available : http ://www.mandofootloose.com/

[8] F. Whitt and D. Wilson, *Bicycling science*. 1982.

[9] Spagnol, P., Alii, G., Spelta, C., Lisanti, P., Todeschini, F., Savaresi, S. M., et Morelli, A. *A full hybrid electric bike : How to increase human efficiency.* American Control Conference (2012), 2761–2766.

[10] "ZehuslWize Hub." [Online]. Available : http ://www.zehus.it/

[11] Aubry, J., Ben Ahmed, H., & Multon, B. *Sizing Optimization Methodology of a Surface Permanent Magnet Machine-Converter System Over a Torque-Speed Operating Profile : Application to a Wave Energy Converter.* IEEE Transactions on Industrial Electronics, 59(5), 2116–2125. doi :10.1109/TIE.2011.2163287, 2012