



HAL
open science

Évaluation expérimentale de la modélisation énergétique d'un fauteuil roulant électrique

Jean-Yves y Ertaud, Nicolas Ragot, Ronaldo da Silva Moura, Paul Alias,
Marie Babel, Sylvain Guégan, Louise Devigne, François Pasteau, Romain
Rossi, Khemmar Redouane

► To cite this version:

Jean-Yves y Ertaud, Nicolas Ragot, Ronaldo da Silva Moura, Paul Alias, Marie Babel, et al.. Évaluation expérimentale de la modélisation énergétique d'un fauteuil roulant électrique. Handicap 2020 Technologies pour l'autonomie et l'inclusion, Nov 2020, Paris, France. hal-02992572

HAL Id: hal-02992572

<https://normandie-univ.hal.science/hal-02992572>

Submitted on 6 Nov 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Évaluation expérimentale de la modélisation énergétique d'un fauteuil roulant électrique

Ertaud Jean-Yves⁺, Ragot Nicolas⁺, Da Silva Moura Ronaldo[†], Alias Paul[†], Babel Marie*, Guégan Sylvain[#], Devigne Louise*, Pasteau François*, Rossi Romain⁺, Khemmar Redouane⁺

^{+,†}UNIRouen, Normandy University,
ESIGELEC/IRSEEM

Saint Etienne du Rouvray, France

⁺firstname.givename@esigelec.fr

[†]givename.firstname@groupe-esigelec.org

^{*}Univ Rennes, INSA
CNRS, Inria, IRISA - UMR 6074

Rennes, France

firstname.givename@irisa.fr

[#]Univ Rennes, INSA
LGCGM – EA 3913

Rennes, France

firstname.givename@insa-rennes.fr

Résumé—Pour une personne en situation de handicap, utilisatrice d'un fauteuil roulant électrique, disposer d'un outil de prédiction de la faisabilité d'effectuer un trajet de A à B compte-tenu de la charge batterie disponible, représente un intérêt majeur. Ce point est si sensible que certains utilisateurs de fauteuils roulants limitent leurs déplacements de peur de tomber en panne et de ne pas pouvoir rentrer chez eux. Ce document s'appuie sur une modélisation énergétique du fauteuil roulant électrique afin de fournir à l'utilisateur un outil de prédiction énergétique pour l'aider à évaluer la possibilité d'effectuer un trajet aller-retour. Cette étude propose une modélisation paramétrique des coefficients liés aux différentes énergies consommées. Celle-ci est appliquée sur un fauteuil roulant électrique 4 roues puis est comparée aux paramètres obtenus pour un fauteuil roulant électrique 6 roues. Cette modélisation énergétique est finalement évaluée sur un trajet en extérieur.

Mots clés—Modélisation énergétique paramétrique ; Fauteuil roulant électrique ; Autonomie ; Prédiction de consommation énergétique

I. INTRODUCTION

Dans le champ du handicap, les fauteuils roulants électriques¹ représentent un intérêt majeur puisqu'ils permettent de compenser la perte d'autonomie et de mobilité. Aujourd'hui ces aides techniques disposent en série d'un indicateur de la charge batterie disponible. Il s'agit souvent d'une information grossière, peu fiable, difficilement exploitable par l'utilisateur pour estimer sa capacité à effectuer ses trajets aller et retour. Ainsi, certains usagers se limitent dans leurs déplacements quotidiens de crainte de tomber en panne et de ne pouvoir revenir à leur domicile. Ceci pousse peu à peu ces usagers vers l'isolement et les conduit à rompre le lien social avec leur entourage. Une revue de la littérature sur l'étude énergétique des FREs révèle que très peu de travaux ont été menés ces dernières années sur les problématiques de modélisation électromécanique et de prédiction de la consommation énergétique pour ce type de dispositif. Kauzlarich & al. au début des années 80 [1] ont proposé une étude sur les performances des batteries de FRE dans des conditions d'utilisation en

intérieur et en extérieur, en étudiant leur cycle de charge et décharge. Johnson & Aylor [2] ont développé dans les années 85 un modèle dynamique d'un FRE qui intègre les différentes forces et moments mis en jeu lors de son déplacement. En 1995, Cooper & al. [3] ont proposé une comparaison de plusieurs méthodes d'estimation de l'autonomie de FREs. Ce benchmark a été réalisé sur sept modèles différents avec des mesures à vide et en charge pleine (masse de 100Kg). Plus tard, Dziubinski & al. en 2016 [4] ont proposé une étude expérimentale pour déterminer la consommation énergétique de FREs qui intègre l'ensemble des énergies mises en jeu lors d'un déplacement.

Cette revue de la littérature peut être étoffée par des travaux analogues menés dans des domaines connexes tels que la robotique mobile par exemple [5], [6]. En particulier, Hou & al. [7] s'intéressent à la modélisation de la prédiction de la consommation énergétique d'un robot mobile.

L'étude présentée dans cet article s'appuie une modélisation paramétrique d'une part et des données expérimentales d'autre part pour évaluer le comportement énergétique d'un FRE. L'ensemble est utilisé pour prédire la faisabilité énergétique d'effectuer un trajet aller et retour et en avertir l'utilisateur. Notre étude s'intéresse également à l'impact énergétique de l'électronique embarquée du système de contrôle-commande et de perception proprio et extéroceptive qui ne cesse de se complexifier en fournissant à l'utilisateur toujours plus de fonctionnalités [8].

Cet article est organisé de la façon suivante : la section II dresse le bilan des énergies mises en jeu lors du déplacement d'un FRE. La section III propose une démarche de modélisation paramétrique de l'énergie consommée par un FRE à partir d'un modèle 4 roues. S'ensuit une comparaison des paramètres de cette modélisation pour un FRE 6 roues en section IV. La section V évalue cette modélisation énergétique en confrontant les résultats à la vérité terrain. La dernière partie de cet article (cf. section VI) dresse une conclusion et dégage quelques perspectives de travail.

1. Fauteuil Roulant Électrique : FRE

II. BILAN DES ÉNERGIES MISES EN OEUVRE

Le FRE est un robot différentiel, non holonome, assimilable à un unicycle, de type (2,0) [9]. Le bilan des forces mises en jeu se décompose alors comme suit :

- résistance due au roulement : $F^{rr} = \mu_{rr} \cdot P \cdot \cos(\theta)$;
- résistance due à l'air : $F^{ra} = \frac{1}{2} \cdot c_x \cdot S \cdot \rho \cdot (V_v - V_a)^2$;
- résistance due à la pente : $F^{rp} = P \cdot \sin(\theta)$;
- résistance due à l'inertie : $F^{ri} = \frac{P}{g} \cdot \gamma$,

avec

- μ_{rr} : coefficient de roulement, image de la déformation de la roue sur le sol ;
- P : poids total du fauteuil roulant électrique, en N ;
- θ : angle de la pente ; $\sin(\theta) \times 100$ est la pente exprimée en % ;
- c_x : coefficient de pénétration dans l'air ;
- S : surface en m^2 ;
- ρ : masse volumique de l'air ($1.292 \text{Kg} \cdot m^{-3}$) ;
- V_v : vitesse véhicule par rapport au sol (m/s) ;
- V_a : vitesse de l'air par rapport au sol (m/s) ;
- γ : accélération en m/s^2 ;
- g : gravité ($9.81 m/s^2$).

Dans un modèle numérique, la relation mathématique $E_{A \rightarrow B}$ entre les efforts résistants et l'énergie nécessaire pour effectuer une trajectoire d'un point A à B s'exprime par (cf. équation 1)

$$E_{A \rightarrow B} = \sum_{K=0}^N (F_K^{rr} + F_K^{ra} + F_K^{ri} + F_K^{rp}) \cdot D_K + E_K^{sys} + E_K^{pi}, \quad (1)$$

avec

- E_K^{sys} : énergie consommée par l'électronique embarquée sur le FRE,
- E_K^{pi} : énergie liée aux pertes internes due à la mécanique du FRE,
- D_K : longueur du K^{eme} segment de la trajectoire de A vers B.

Cette modélisation appelle quelques remarques.

- Compte tenu de la faible vitesse et de la petite surface du FRE, la force liée à la résistance de l'air F^{ra} peut être négligée.
- L'équation 1 fait apparaître un terme lié à une énergie mécanique correspondant aux différentes composantes des forces s'exerçant sur les roues. Ce terme ne tient donc pas compte des rendements électromécaniques du FRE. L'estimation paramétrique que nous proposons, réalisée à partir de campagnes d'expérimentation, permet de prendre en compte les différents rendements et d'aboutir à une modélisation de l'ensemble de la chaîne électromécanique du FRE.

III. MODÉLISATION ÉNERGÉTIQUE

A. Matériel utilisé

Cette modélisation paramétrique de l'énergie consommée par un FRE s'est faite sur le fauteuil 4 roues dont dispose l'ESIGELEC (cf. figure 1). Les caractéristiques sont précisées dans le tableau I.

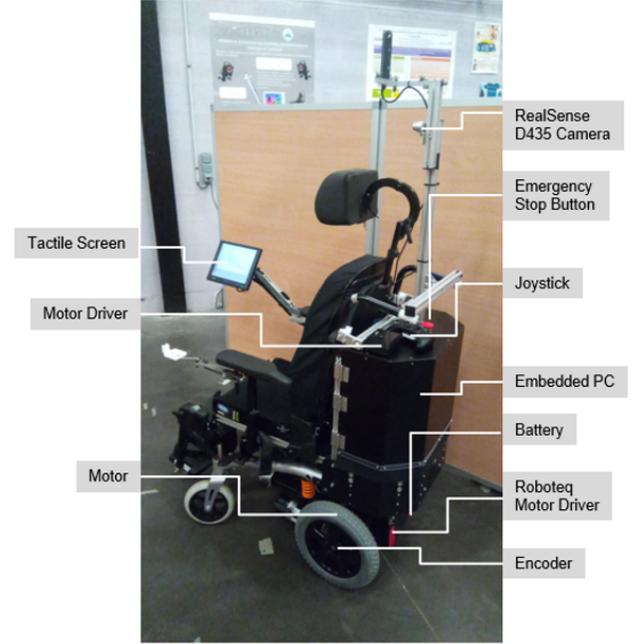


FIGURE 1. FRE 4 roues de l'ESIGELEC

B. Pertes internes

Pour estimer ces pertes, le FRE a été suspendu, puis les consommations énergétiques des moteurs ont été mesurées pour différentes vitesses. Les résultats sont décrits sur la figure 2.

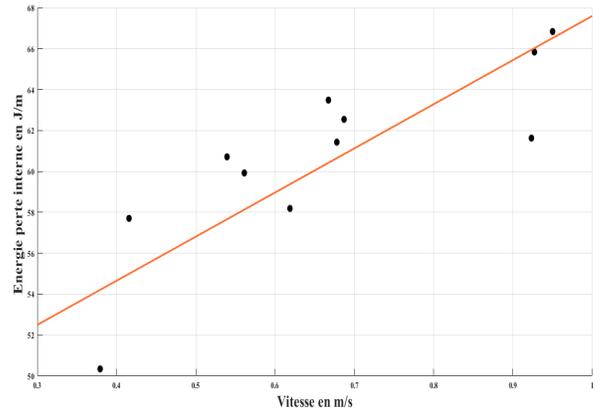


FIGURE 2. Pertes internes en J/m vs vitesse FRE en m/s

La distribution des points peut être approximée par une équation linéaire où les pertes énergétiques internes sont fonction de la vitesse du FRE selon

$$E^{pi} = (a \cdot V_v + b) \cdot D. \quad (2)$$

Pour le FRE 4 roues, les coefficients (a, b) sont : $a = 21 J \cdot s / m^2$, $b = 46 J / m$.

Caractéristiques	Modèle 4 roues
Type	Invacare Bora
Batterie	Plomb, 2x12V en série (24V total)
Masse à vide (Kg)	131.1
Instrumentation embarquée	Courant & Tension batterie ; Courant & Tension moteur ; Odométrie

TABLE I
CARACTÉRISTIQUES MATÉRIELLES DU FRE 4 ROUES ESIGELEC

C. Résistance due à l'inertie

Pour évaluer l'impact de l'inertie, le FRE a été chargé d'une masse de 100Kg. Le temps de passage de la vitesse nulle à une vitesse de 1m/s a été mesuré ainsi que l'énergie consommée. Ce temps est d'environ 2s et l'énergie consommée sur cette durée est de 485J. Cette valeur a été comparée à celle obtenue pour cette vitesse de 1m/s constante pour une durée identique : 230J.

Au vu de ces éléments et compte tenu des durées de trajet qui seront bien supérieures à 10s, nous négligerons la résistance d'inertie dans le modèle énergétique final du FRE.

D. Résistance due au roulement

L'énergie liée à la résistance au roulement s'exprime par

$$E^{rr} = \mu_{rr} \cdot P \cdot \cos(\theta) \cdot D. \quad (3)$$

Cette équation fait intervenir un coefficient μ_{rr} exprimé en J/N.m qui dépend de la nature du sol sur lequel le déplacement du FRE est réalisé. Pour estimer ce coefficient, des tests ont été réalisés sur trois natures de sol différentes : asphalte, gravelle, sable.

La figure 3 présente les expérimentations réalisées pour le FRE 4 roues sur un sol de type asphalte. Vingt-deux passages ont été réalisés. Pour chacun d'eux le FRE était à sa vitesse nominale.

Pour chaque type de revêtement, une valeur moyenne a été estimée (tableau II).

Nature du sol	μ_{rr} FRE 4 roues
Asphalte	0.026
Gravelle	0.070
Sable	0.038

TABLE II
VALEUR MOYENNE DU COEFFICIENT DE ROULEMENT EN FONCTION DE NATURES DE SOL DIFFÉRENTES

E. Résistance due à la pente

L'énergie due à la résistance à la pente s'exprime par

$$E^{rp} = \Omega \cdot \sin(\theta) \cdot P \cdot D, \quad (4)$$

où Ω (sans unité) représente le coefficient traduisant le rendement énergétique du FRE. Le calcul de ce coefficient pour différentes valeurs de $\sin(\theta)$ est présenté en figure 4.

Cette dernière montre que le comportement énergétique du FRE pour des pentes positives et négatives est différent. Ceci vient du fait qu'une pente négative correspond à un

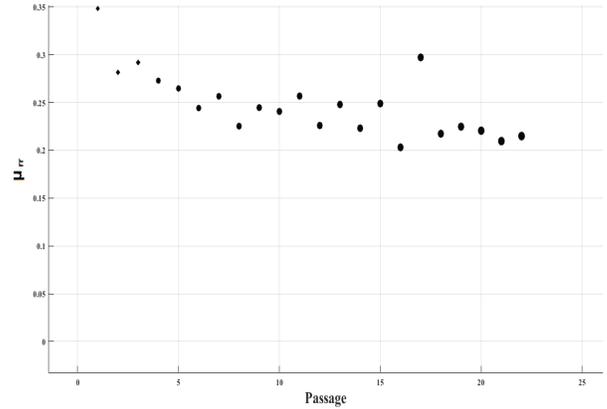


FIGURE 3. Valeurs du coefficient de roulement μ_{rr} vs le nombre de passages

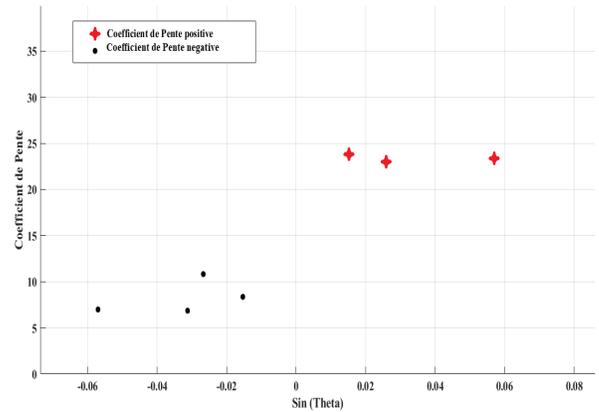


FIGURE 4. Coefficient de pente Ω vs pente

comportement moteur alors qu'une pente positive correspond à un comportement générateur. Les réducteurs mécaniques du FRE présentent alors des rendements différents, la réversibilité n'étant que partielle. La prise en compte de ces écarts nous conduit à utiliser deux valeurs de coefficients Ω_{\pm}^{\pm} , en fonction du signe de cette dernière. L'équation de l'énergie consommée due à la résistance à la pente s'exprime alors par

$$E^{rp} = \Omega_{\pm}^{\pm} \cdot \sin(\theta) \cdot P \cdot D. \quad (5)$$

Les coefficients Ω_{\pm}^{\pm} pour le FRE 4 roues sont : $\Omega^+ = 24$, $\Omega_- = 9$.

IV. COMPARAISON DES PARAMÈTRES POUR UN FRE 6 ROUES

Une démarche analogue a été menée pour un FRE 6 roues mis à disposition par l'INSA Rennes (Figure 5).



FIGURE 5. FRE 6 roues de l'INSA Rennes

Le tableau III présente un comparatif entre les valeurs des paramètres obtenues pour les deux FREs (4 et 6 roues).

	FRE 4 roues	FRE 6 roues
Pertes internes (J/m) ($V_v=0.5\text{m/s}$)	56	75
μ_{rr} (asphalte) (J/N.m)	0.026	0.025
Ω^+ (sans unité)	24	31
Ω^- (sans unité)	9	9.8

TABLE III

COMPARATIF DES PARAMÈTRES ENTRE UN FRE 4 ROUES ET 6 ROUES

Nous constatons que l'ordre de grandeur des paramètres est respecté d'un FRE à 4 roues à FRE 6 roues.

De plus, nous constatons que le passage d'un FRE 4 roues à un FRE 6 roues ne modifie pas le coefficient de roulement qui reste constant.

V. VALIDATION DE LA MODÉLISATION ÉNERGÉTIQUE DE LA CHAÎNE ÉLECTROMÉCANIQUE

Notre modèle a été validé avec le FRE ESIGELEC, sur un trajet long de 3,452km avec une vitesse moyenne de 0,874m/s. La figure 6 présente ce parcours autour de l'ESIGELEC. Le tableau IV détaille la décomposition de la trajectoire réalisée en segments. Cette décomposition a été effectuée de manière à ce que les pentes des segments soient constantes.

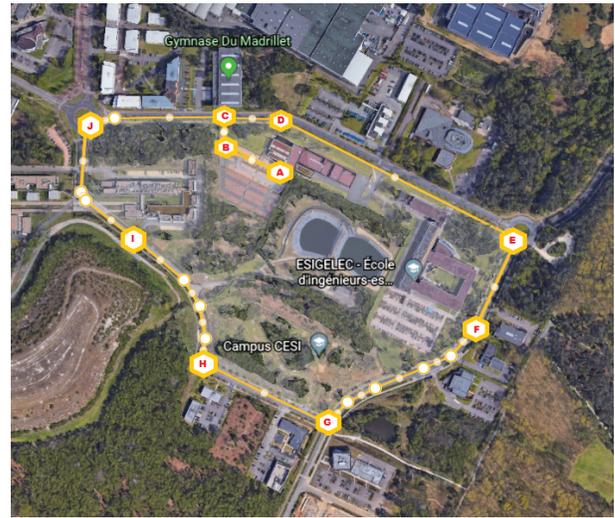


FIGURE 6. Trajectoire ayant servi à la validation du modèle

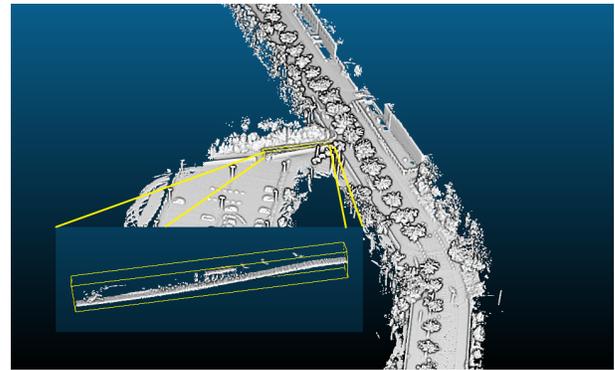


FIGURE 7. Nuage de points LIDAR utilisé pour le calcul des pentes

La trajectoire présente différentes pentes oscillant entre -6% à +6% ($\sin(\theta)$). La pente a été pré-calculée à l'aide d'une carte 3D fournie par un LIDAR (cf. figure 7).

Le tableau V donne les consommations énergétiques expérimentales et théoriques. Les pertes internes, les énergies dues à la résistance au roulement et à la pente sont également précisées. On constate une erreur de 12% entre la prédiction de l'énergie consommée, estimée à partir du modèle et celle de la vérité terrain. Cette erreur provient du coefficient de roulement qui ne correspond pas obligatoirement à la nature du parcours réellement effectué. De plus, l'hypothèse de pentes constantes pour les différents segments ne correspond pas nécessairement à la réalité. Nous observons dans ce cas la limite d'une approche théorique en comparaison d'approches basées sur l'expérimentation.

Par ailleurs, nous présentons sur la figure 8 la répartition des différentes énergies utilisées pour la propulsion mécanique. Ces données ont été obtenues sur un FRE vide. On constate que les pertes internes ne peuvent pas être négligées dans l'évaluation de la consommation puisqu'elles représentent sur un terrain plat environ 2/3 de l'énergie mécanique globale. Les

Segment	AB	BC	CD	DE	EF	FG	GH	HI	IJ	JC	CB	BA
Distance	88.5	31	68	342	154	236	180	236	185	158	31	88.5
Pente (°)	0.88	3.27	-1.79	-1.532	1.47	1.058	1.084	0.484	0.836	-1.09	-3.27	-0.88

TABLE IV
DÉCOMPOSITION DE LA TRAJECTOIRE DE VALIDATION DU MODÈLE EN SEGMENTS

Énergie consommée (vérité terrain)	405 682J	
Énergie estimée par le modèle	Pertes internes	228 956J
	Résistance due au roulement	116 360J
	Résistance due à la pente	10 950J
	Total	356 266J

TABLE V
COMPARAISON DES CONSOMMATIONS ÉNERGÉTIQUES : THÉORIE ET VÉRITÉ TERRAIN

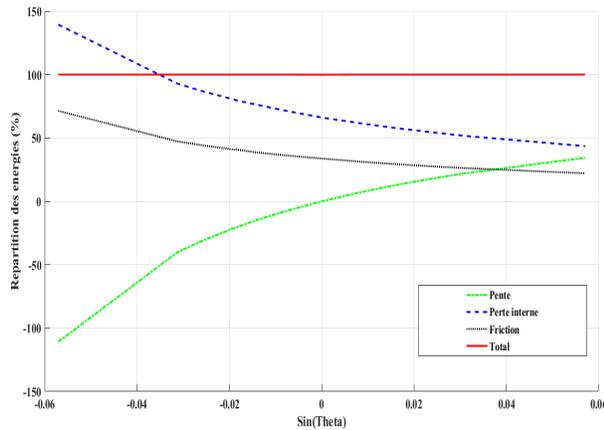


FIGURE 8. Répartition des énergies consommées en % vs pente

perles par roulement ne représentent quant à elles qu'1/3 de l'énergie globale consommée.

La différence des paramètres Ω^{\pm} s'observe aussi sur cette figure 8 : en dessous de 3% de pente négative la valeur de $(E^{rr} + E^{rp})$ reste positive, au-delà de cette valeur la valeur de $(E^{rr} + E^{rp})$ devient négative. Ceci correspond à une inversion du sens de la résultante globale de la force s'appliquant sur la roue. Ω^{\pm} représente donc bien la différence de comportement des réducteurs suivant des fonctionnements moteur ou générateur.

La consommation énergétique globale doit inclure la consommation de l'électronique embarquée sur le FRE, notée E^{sys} précédemment (capteurs et appareils électroniques), que les résultats précédents ne font pas apparaître.

Dans le cas du FRE 4 roues qui sert de base expérimentale à l'évaluation de techniques de perception basées vision, incluant des moyens de communication sans-fil et un écran tactile pour l'interface homme-machine, la consommation de courant est d'environ 1,2A. Dans le cas d'un FRE standard, la consommation de l'électronique est d'environ 0,2A. L'énergie supplémentaire due à l'électronique est définie par

$$E^{sys} = U_{batt} \cdot I \cdot \frac{D}{V_v}, \quad (6)$$

avec

- U_{batt} : Tension batterie (24V);
- I : Courant (1A);
- T : Durée de la trajectoire (3848s).

Dans notre cas, $E^{sys} = 92352J$. Cette valeur ne peut pas être négligée car elle représente environ 23% de l'énergie consommée mesurée lors du trajet de validation. Ceci démontre bien l'impact que peut avoir l'électronique embarquée sur l'autonomie du FRE.

Dans le cas du FRE 6 roues qui présente moins d'électronique embarquée, la consommation énergétique pour ce même trajet n'aurait représenté que 18470J soit 4.6% environ.

VI. CONCLUSION & PERSPECTIVES

Ce document se concentre sur une modélisation paramétrique de la consommation énergétique d'un FRE. Le premier objectif de cette étude est de proposer une modélisation énergétique d'un FRE pour prédire la faisabilité d'effectuer un trajet d'un point A à un point B. Cette étude répond à un réel besoin exprimé par les usagers afin d'éviter la panne sèche lors d'un trajet.

Un second objectif est d'estimer périodiquement les paramètres de la modélisation énergétique et de vérifier s'il existe un biais. Ces informations pourraient probablement être utilisées pour la maintenance, car elles signifieraient que des problèmes surviennent dans un (ou plusieurs) composant(s) du système.

D'un point de vue général, cette étude montre la pertinence de notre modélisation paramétrique même si les résultats théoriques montrent une erreur de 12% avec ceux de la vérité de terrain. Cette différence s'explique par le fait que l'information contribuant à l'estimation des paramètres est fournie par le contrôleur-moteur et est donc potentiellement sujette à erreur. Cette différence s'explique également par le fait que l'estimation des paramètres du modèle a été réalisée dans des conditions, qui ne sont pas obligatoirement les mêmes que celles observées lors de l'expérimentation. En outre, cette étude a mis en évidence le fait que les pertes internes ne

peuvent pas être négligées dans le cas d'un FRE car elles peuvent représenter jusqu'à près de 50% de l'énergie dissipée par ce dernier.

En outre, l'étude menée sur deux architectures différentes de FRE montre que la méthode et les coefficients de prédiction de consommation énergétique, sont transposables.

Cette étude a également permis de montrer l'impact que peut avoir l'électronique embarquée sur l'autonomie du FRE. L'ajout de fonctionnalités intelligentes sur ce type d'aide technique doit donc se faire en préservant l'autonomie énergétique du véhicule, en priorisant des systèmes peu énergivores.

Enfin, une alternative que nous souhaitons explorer est de rompre avec le modèle paramétrique en évaluant la pertinence d'approches basées Machine Learning, en considérant le FRE comme un système "boîte noire".

ACKNOWLEDGMENT

Ce travail est financé dans le cadre du projet INTERREG VA FMA ADAPT "Assistive Devices for empowering disAbled People through robotic Technologies" <http://adapt-project.com/index.php>. Le Programme FMA est un programme de Coopération Territoriale Européenne qui vise à financer des projets de coopération ambitieux dans la région frontalière entre la France et l'Angleterre. Le Programme est financé par le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER)

RÉFÉRENCES

- [1] Kauzlarich JJ.; Ulrich V.; Bresler M. and Bruning T. Wheelchair batteries : driving cycles and testing. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 1983, Volume 20, Issue 1, pp. 31-43
- [2] Johnson B. W. and Aylor J. H. Dynamic Modeling of an Electric Wheelchair. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Sept/Oct 1985, Volume IA-21, Issue 5, pp. 1284-1293
- [3] Cooper R. A. ; VanSickle D. P. ; Albright S. J. ; Stewart, K. J. ; Flannery, M. and Robertson R. N. Power wheelchair range testing and energy consumption during fatigue testing. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, October 1995, Volume 32, Issue 3, pp. 255—263
- [4] Dziubinski, M. ; Siemionek, E. ; Czajkowski, P. ; Plich, M. and Drozd, A. Experimental studies of wheelchair energy consumption. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport*, 2016, Volume 112, pp. 89
- [5] Shahab M. T. Energy-Efficient Motion Control of Mobile Robots, Technical Report, King Fahd University of Petroleum & Minerals, Feb. 2009
- [6] Xiao, X. and Whittaker, WR. Energy considerations for wheeled mobile robots operating on a single battery discharge, Technical Report CMU-RI-TR-14-16, Carnegie Mellon University Robotics Institute, 2014
- [7] Hou, L. ; Zhang, L. and Kim, J. Energy Modeling and Power Measurement for Mobile Robots. *Energies* 2019, Volume 12, Issue 27
- [8] Rentschler, AJ. ; Cooper, RA. ; Fitzgerald, SG. ; Boninger, ML. ; Guo, S. ; Ammer, WA. ; Vitek, M. and Algood, D. Evaluation of Selected Electric-Powered Wheelchairs Using the ANSI/RESNA Standards. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 2004, Volume 85, Issue 4, pp. 611-619
- [9] Campion G. and Chung W. Wheeled robots. *Springer Handbook of Robotics*, pp. 391-410