

Prise en compte du comportement des roues folles dans la cinématique des fauteuils roulants électriques

Aline Baudry, Sylvain Guegan, Marie Babel

▶ **To cite this version:**

Aline Baudry, Sylvain Guegan, Marie Babel. Prise en compte du comportement des roues folles dans la cinématique des fauteuils roulants électriques. IFRATH 2018 - 10ème Conférence sur les Aides Techniques pour les Personnes en Situation de Handicap, Handicap, Jun 2018, Paris, France. pp.1-7. hal-01821863

HAL Id: hal-01821863
https://inria.hal.science/hal-01821863

Submitted on 22 Jun 2018

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.

Prise en compte du comportement des roues folles dans la cinématique des fauteuils roulants électriques

Aline Baudry
Univ Rennes, INSA, CNRS, Inria, IRISA - UMR 6074, F-35000 Rennes, France
aline.baudry@insa-rennes.fr

Sylvain Guégan
Univ Rennes, INSA, LGCGM – EA 3913, F-35000 Rennes, France
sylvain.guegan@insa-rennes.fr

Marie Babel
Univ Rennes, INSA, CNRS, Inria, IRISA - UMR 6074, F-35000 Rennes, France
marie.babel@irisa.fr

***Abstract*—L'expérience de conduite d'un fauteuil roulant électrique peut être perturbée par les effets cinématiques et dynamiques des roues folles, particulièrement durant les manœuvres dans des pièces étroites et les changements de direction. Afin de minimiser ce comportement abrupt et non maîtrisé, nous proposons dans cet article, un modèle cinématique du fauteuil prenant en compte les effets des roues folles. L'étude de la cinématique des roues folles a été réalisée sur les trois types de fauteuils roulants existants : traction, propulsion et fauteuil six roues. L'orientation des roues folles a été mesurée pour différentes configurations : orientations initiales, vitesses du fauteuil et masses de l'utilisateur. La répétabilité des mouvements a été étudiée, et d'après ces essais, le comportement a été modélisé. Ce modèle a ensuite été utilisé pour la détermination de la cinématique réelle du fauteuil et de sa trajectoire. Il pourra à l'avenir être utilisé pour le développement d'une assistance à la conduite lors de manœuvres en calculant l'espace atteignable et en forçant l'orientation des roues folles.**

Keywords—Fauteuil roulant intelligent, Roues folles, Cinématique, Identification, Conduite

I. INTRODUCTION

Pour le développement personnel et cognitif, il est très important d'explorer son environnement et d'avoir des interactions sociales, mais cela peut être très compliqué pour les personnes à mobilité réduite. L'utilisation d'un fauteuil roulant électrique peut les aider à retrouver leur indépendance lorsqu'ils ne sont pas capables de propulser un fauteuil roulant manuel, ou lorsqu'ils ont besoin d'une tierce personne pour les tâches de la vie quotidienne [1]. Cependant, certaines personnes se voient refuser la permission de conduire un fauteuil roulant à cause de déficiences visuelles et/ou cognitives. Actuellement, 61 à 91% des utilisateurs de fauteuil roulant tireraient un bénéfice de l'utilisation d'un fauteuil roulant intelligent [2].

Dans cet objectif, depuis le début des années 80, les chercheurs se sont intéressés à ces fauteuils roulants intelligents et ont développé des fauteuils autonomes et semi-autonomes avec évitement d'obstacles [3], [4]. Dans ces projets, le fauteuil roulant est modélisé comme un robot mobile (2,0) [5].

La non-holonomie du fauteuil pose des problèmes pour la conception des lois de commande [6]. L'utilisation d'approches basées capteur permet de les éviter [7] mais le comportement des roues folles n'est généralement pas pris en compte. Cependant, les effets cinématiques et dynamiques de ces roues peuvent être très désagréables lors de la conduite du fauteuil. En particulier, elles peuvent causer des déviations de trajectoire et des accélérations non souhaitables durant les manœuvres et les changements de direction abrupts [8], [9].

Comme l'objectif des fauteuils roulants intelligents est d'assister l'utilisateur à atteindre une position aussi confortablement que possible, il est donc important de prendre en compte l'effet des roues folles dans le comportement du fauteuil. Ces roues passivement orientables sont conçues pour suivre des trajectoires non linéaires. Leur comportement cinématique a été étudié dans [10] pour des fauteuils roulants manuels lors de mouvements sans à-coups, lorsqu'elles suivent la trajectoire du fauteuil.

Cet estimateur a ensuite été utilisé dans le modèle dynamique d'un fauteuil roulant manuel implémenté sur un ergomètre simulant des trajectoires linéaires et non linéaires [11]. Il a aussi été exploité dans le développement d'assistances appliquées aux fauteuils roulants manuels [12] mais n'a jamais été utilisé pour des fauteuils roulants électriques.

Dans [13], il a été souligné que les collisions arrivaient souvent lors de changements de direction, surtout dans les environnements étroits.

Pour le développement d'une assistance à la manœuvre, un modèle est nécessaire. En effet, le comportement des roues folles dépend de leur friction avec le sol, et de la résistance au roulement qui s'oppose à leur auto-orientation [14]. La *formule magique de Pacejka* [15] fournit un modèle complet du comportement de n'importe quelle roue en prenant en compte ces efforts. Mais elle requiert une bonne connaissance de la nature du sol.

Pour implémenter une loi de commande d'assistance à la manœuvre, il n'est pas envisageable de considérer la multitude des sols rencontrés lors de la navigation à cause de la complexité à caractériser leur propriété en temps réel.

Dans [16], un schéma de compensation basé sur des mesures d'odométrie empêche le fauteuil de glisser à cause de ses roues folles, initialement désalignées avec la trajectoire

souhaitée. Cette assistance est basée sur des mesures et, pour une solution à bas coût, nous préférons développer une loi de commande sans capteur. Pour un tel schéma, il est donc nécessaire d'avoir un modèle du comportement.

Cet article est organisé comme suit. Premièrement, la section II développe la cinématique du fauteuil roulant et des roues folles. Ensuite, la section III présente l'étude des roues folles lors du changement de direction avance-recul. Finalement, la section IV utilise la fonction de transfert déterminée pour calculer la cinématique du fauteuil roulant. Enfin, la section V discute des perspectives de lois de commande pour l'assistance à la manœuvre.

II. MODELE CINEMATIQUE DES ROUES FOLLES ET DU FAUTEUIL ROULANT

A. *Le fauteuil roulant électrique, un robot mobile non-holonome.*

Le fauteuil roulant électrique est modélisé comme un robot mobile (2,0) [5], c'est-à-dire qu'il a deux degrés de mobilité qui sont la translation longitudinale et la rotation dans le plan. On dit de ce type de robot mobile qu'il est non-holonome puisque seulement deux degrés de mobilité permettent de contrôler la position et l'orientation du fauteuil (X, Y, θ) (Figure 1). Pour atteindre certaines configurations du fauteuil, il peut donc être nécessaire de réaliser plusieurs manœuvres.

Les vitesses associées à ces mouvements (V, Ω) découlent de la motorisation différentielle du fauteuil.

$$V = \frac{R}{2}(\omega_R + \omega_L) \quad (1), \qquad \Omega = \frac{R}{D}(\omega_R - \omega_L) \quad (2)$$

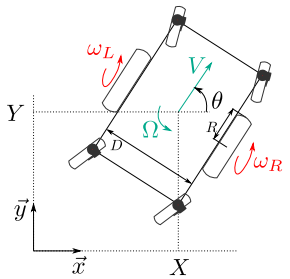


Figure 1 - Motorisation différentielle du fauteuil roulant électrique.

Aux deux roues motorisées du fauteuil roulant, s'ajoutent des roues qui permettent de le stabiliser, les roues folles.

B. *L'influence des roues folles sur la cinématique du fauteuil.*

Les roues folles (Figure 2 (a)) sont des roues dont l'axe de rotation est déporté de l'axe d'orientation d'une distance d. Ce déport permet à la roue de s'orienter lors du mouvement [5] contrairement aux roues fixes (Figure 2 (b)).

Ces roues présentent donc l'avantage de suivre des trajectoires non linéaires mais lors de changements de directions brusques (un mouvement de recul après un mouvement d'avance par exemple), elles s'opposent au mouvement du fauteuil avant de s'auto-orienter.

En effet, lors de leur orientation, la cinématique du fauteuil roulant souhaitée n'est pas respectée, et on observe des déviations de trajectoire ainsi que des accélérations brutales.



(a) Roue passivement orientable (roue folle) (b) Roue fixe

Figure 2 – Représentation d'une roue avec déport d (a), communément appelée roue folle et schéma d'une roue fixe (b).

C. *Comportement des trois types de fauteuil roulant*

Selon la disposition et le nombre de roues folles, trois types de fauteuils roulants existent : les fauteuils à traction et à propulsion, qui ont chacun deux roues folles, et les fauteuils roulants six roues, avec quatre roues folles.

Les fauteuils à six roues sont adaptés à la conduite en intérieur, grâce à leur grande manœuvrabilité. En effet, la présence des quatre roues folles permet de faire des rotations sur soi-même et de réduire l'espace requis pour les manœuvres et les demi-tours. Au contraire, les fauteuils roulants à quatre roues (traction et propulsion) sont plus enclins à être utilisés en extérieur grâce à la taille plus importante des roues folles. Leur taille permet d'être moins importuné par les variations de terrain, comme les trous et les trottoirs. Cependant, ces fauteuils présentent le désavantage d'être instables à vitesse élevée [17] à cause du mouvement de pivotement des roues folles [18].

D. *Modélisation de la cinématique du fauteuil t en prenant en compte les roues folles.*

Lorsque le mouvement est établi, les roues folles du fauteuil ont une orientation et une vitesse de rotation données par la cinématique du fauteuil. Ici, nous allons nous intéresser au régime transitoire, lorsque les roues s'orientent dans la direction souhaitée.

1) Vitesse idéale de la roue associée à la vitesse du fauteuil.

La vitesse en régime établi de la roue folle se détermine en transportant la vitesse du fauteuil au point de contact de la roue avec le sol (repère R_F vers le repère R_C sur la Figure 3 (a)). Mais puisque l'orientation de la roue n'est pas motorisée et que les axes des repères R_A et R_C sont alignés, on peut calculer la vitesse de la roue au niveau de l'axe.

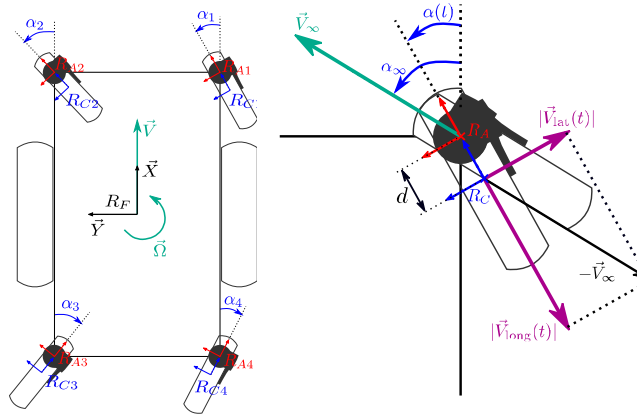
$$\overrightarrow{V_\infty} = \vec{V} + \overrightarrow{AF} \times \vec{\Omega} \qquad (3)$$

En notant la position de l'axe de la roue folle $(P_X, P_Y, 0)'$, on obtient

$$\overrightarrow{V_\infty} = \begin{pmatrix} V - P_Y \Omega \\ P_X \Omega \\ 0 \end{pmatrix}. \qquad (4)$$

Cette vitesse en régime établie nous permet de calculer l'angle α que doit avoir la roue folle pour que la cinématique du fauteuil soit respectée.

$$\alpha = \operatorname{atan2}(P_X\,\Omega, V - P_Y\,\Omega) \qquad (5)$$



(a) Repères du fauteuil et des différentes roues avec leurs orientations associées.

(b) Projection du vecteur vitesse théorique dans le repère courant de la roue folle avant droite (1).

Figure 3 – Orientation des roues folles du fauteuil (a) et représentation du vecteur vitesse à l'instant t (b). Les repères R_A sont les repères au niveau des axes des roues folles et les repères R_C sont les repères au point de contact avec le sol.

2) Vitesse de la roue folle à l'instant t.

Lors du régime transitoire, la vitesse $\vec{V}(t)$ qui devrait être le long de l'axe longitudinal du repère $R_C(t)$ se décompose en une vitesse longitudinale et une vitesse latérale en raison de l'angle $(\alpha_\infty - \alpha(t))$.

Dans le repère de la roue $R_C(t)$ les vitesses longitudinales et latérales s'expriment

$$\|V_{long}(t)\| = \|V(t)\| \times \cos(\alpha_\infty - \alpha(t)) \qquad (6)$$

et

$$\|V_{lat}(t)\| = \|V(t)\| \times \sin(\alpha_\infty - \alpha(t)). \qquad (7)$$

Dans le repère du fauteuil $R_F(t)$, on obtient alors

$$\overrightarrow{V_{long}}(t) = \begin{pmatrix} \|V(t)\| \times \cos(\alpha_\infty - \alpha(t)) \times \cos(\alpha(t)) \\ \|V(t)\| \times \cos(\alpha_\infty - \alpha(t)) \times \sin(\alpha(t)) \\ 0 \end{pmatrix} (8)$$

et

$$\overrightarrow{V_{lat}}(t) = \begin{pmatrix} -\|V(t)\| \times \sin(\alpha_\infty - \alpha(t)) \times \sin(\alpha(t)) \\ \|V(t)\| \times \sin(\alpha_\infty - \alpha(t)) \times \cos(\alpha(t)) \\ 0 \end{pmatrix}. (9)$$

3) Cinématique du fauteuil issue de la vitesse des roues.

On peut déterminer la cinématique réelle du fauteuil avec les vitesses longitudinales de chaque roue folle.

$$\overrightarrow{V_F}(t)(/\vec{x}) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \overrightarrow{V_{long_i}}(/\vec{x}) \qquad (10)$$

$$\overrightarrow{\Omega_F}(t)(/\vec{z}) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \left\|\overrightarrow{V_{long_i}}\right\| \times \left\|\overrightarrow{A_iF}\right\| \times \cos\left(\beta_i - \frac{\pi}{2}\right) \qquad (11)$$

Où, $\beta = \left(\overrightarrow{A_iF}, \overrightarrow{V_{long_i}}\right)$.

On peut également noter que la vitesse longitudinale de la roue (Figure 3 (b)) va créer un mouvement de rotation grâce au déport d, qui va orienter la roue dans la bonne direction. Une étude cinématique n'est pas suffisante à ce niveau puisqu'il faut prendre en compte les efforts qui s'appliquent à la roue. Cependant, comme explicité dans l'introduction, nous ne souhaitons pas prendre en compte le contact avec le sol à cause de la complexité à identifier la friction en temps réel. Nous avons donc pris le parti de faire une étude cinématique du comportement. Dans l'objectif d'étudier ce mouvement, nous avons réalisé des mesures expérimentales qui nous ont permis d'obtenir une fonction de transfert suffisamment réaliste pour l'utiliser dans une loi de commande.

III. ÉTUDE DU COMPORTEMENT DES ROUES FOLLES LORS DE CHANGEMENTS DE DIRECTIONS

Afin de réaliser une loi de commande qui prenne en compte le comportement des roues folles, plus particulièrement leur mouvement d'orientation, il est nécessaire d'avoir un modèle de ce comportement. Dans un premier temps, nous avons vérifié que le comportement des roues est répétable puis nous l'avons modélisé sous la forme d'une fonction de transfert. Nous avons réalisé cette étude sur le mouvement d'avance-recul.

A. Moyens de mesure

Pour étudier le comportement des roues folles lors du changement de direction avance-recul, nous avons équipé le modèle *Permobil M400* (voir Figure 4) des capteurs suivants :

- *Mesure de l'orientation des roues folles :* Deux encodeurs incrémentaux avec 1000 pulsations par tour, pour une résolution de 0.36°, ont été montés sur l'axe de rotation des roues folles.
- *Mesure de la vitesse de rotation des moteurs* : Deux encodeurs incrémentaux avec 12 pulsations par tour ont été montés sur l'axe des moteurs. Avec un rapport de réduction de 24.5 :1, nous obtenons une résolution de 1.23°.

Nous avons également utilisé un laser de suivi pour mesurer la trajectoire du fauteuil. Le modèle utilisé, *Radian (API Automated Precision Inc)*, offre une résolution de 0.08µm, ce qui est beaucoup plus élevé que la précision requise que nous avons fixé au cm.

L'acquisition des données a été réalisée grâce à une *Raspberry Pi*, synchronisée avec le laser à une fréquence de 100Hz. Une carte de contrôle *Tiva (Texas Instruments)* connectée au bus CAN du fauteuil nous a permis de le contrôler.

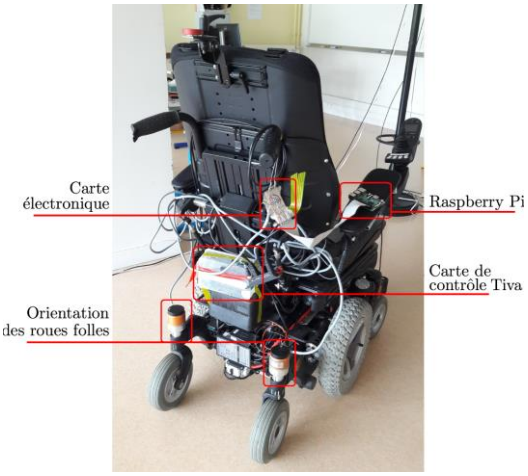


Figure 4 - *Permobil M400* instrumenté pour l'expérience.

B. *Protocole expérimental*

Dans la conception de cette expérience, nous avons choisi de faire varier les paramètres d'étude suivants :

- *L'orientation initiale des roues folles* (α_0) : [0°, 30°, 60°, 90°] comme illustré sur la Figure 5.
- *La vitesse de recul du fauteuil roulant* (V) *en régime établi* : [0.2m/s, 0.4m/s, 0.6m/s].
- *La masse de l'utilisateur* (M_R, masse relative ajoutée à celle du fauteuil) : [0Kg, 50Kg].

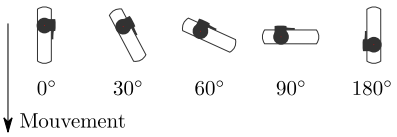


Figure 5 - Les différentes orientations initiales des roues folles utilisées lors de l'expérience.

Pour chaque configuration (α_0, V, M_R), nous avons réalisé cinq mesures. L'orientation initiale des roues folles a été faite de manière à ce que 0° corresponde au mouvement d'avance et 180° au mouvement de recul.
Nous avons utilisé la présence des quatre roues folles pour simuler les deux autres types de fauteuil existants : traction et propulsion. En effet, pour simuler un type ou l'autre, nous avons orienté les roues folles qui ne devaient pas être présentes dans la direction du mouvement de recul (180°).

Nous avons collecté des mesures pour les 24 configurations (α_0, V, M_R) pour chaque type de fauteuil, ce qui donne 72 cas de figure.

C. *Répétabilité du comportement*

Avant de modéliser le comportement des roues folles, il est important de s'assurer que celui-ci est répétable. Pour chaque configuration, 5 jeux de données ont été collectés. Nous avons donc croisé les données de chaque jeu pour vérifier que leur corrélation était bonne.

Sur la Figure 6, nous pouvons constater que la corrélation pour les trois orientations initiales (30°, 60° et 90°) est très proche de 1. Le comportement est donc répétable pour ces trois cas-là. Cependant, nous observons de grandes disparités dans le comportement lorsque les roues étaient initialement orientées à 0°. En effet, nous sommes sur une singularité puisque la roue doit faire un demi-tour. Le comportement n'est pas déterministe puisqu'une direction n'est pas meilleure que l'autre. Nous observerions le même comportement pour le changement de direction rotation vers la gauche/rotation vers la droite dans le cas où le fauteuil est en régime établi dans un sens.

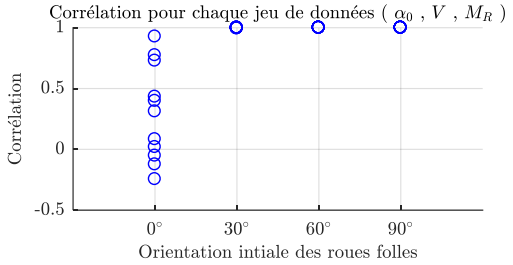
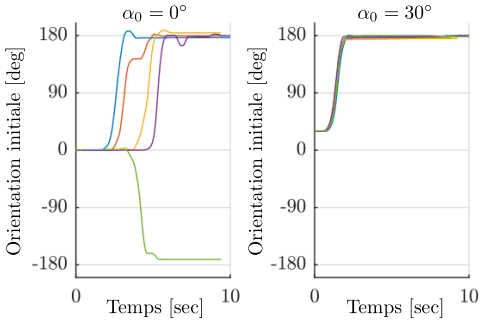
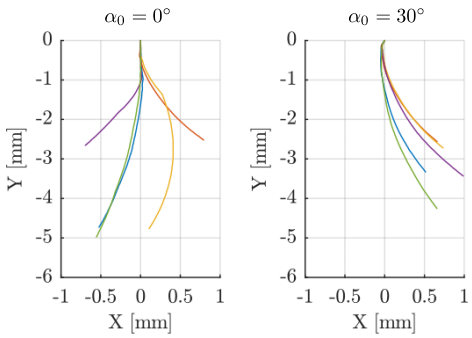


Figure 6 - Répétabilité du comportement en fonction de l'orientation initiale des roues.



(a) Evolution de l'orientation des roues folles.



(b) Trajectoire du fauteuil.

Figure 7 - Evolution de l'orientation des roues folles et les trajectoires associées lors d'un mouvement de recul, à une vitesse de 0.4 m/s et une masse relative de 0Kg, pour différentes orientations initiales des roues folles (α_0).

La Figure 7 (a) illustre bien cette non-répétabilité pour le cas 0° puisque, lors d'un essai sur les cinq, la roue a tourné dans le sens opposé pour atteindre l'orientation $-180°$, qui est identique à l'orientation 180°. Par ailleurs, le comportement est répétable pour le cas où les roues étaient initialement à 30°.
Puisque le comportement est répétable, il est possible de le modéliser. Nous avons pris le parti de la modéliser par une

fonction de transfert pour l'utiliser dans une loi de commande par la suite.

D. Identification de la fonction de transfert

Nous modélisons le comportement des roues folles sous la forme d'une fonction de transfert. Cette fonction permet de connaître la réponse du système à une consigne. Ici, la réponse est l'orientation des roues folles lors du mouvement. La consigne, quant à elle, est l'orientation que présentent les roues en régime établi, pour une cinématique donnée.
Pour le cas du recul, la consigne est donc de ±180°.

Pour la modélisation du comportement, nous avons décidé d'étudier les fonctions de transfert de 1er, 2ème et 3ème ordre définies par

$$\begin{cases} H_{1^{er}}(s) = \dfrac{K}{1+\tau_1 s} e^{-T_0 s} \\ H_{2^{ème}}(s) = \dfrac{K}{(1+\tau_1 s)(1+\tau_2 s)} e^{-T_0 s} \\ H_{3^{ème}}(s) = \dfrac{K}{(1+\tau_1 s)(1+\tau_2 s)(1+\tau_3 s)} e^{-T_0 s} \end{cases}$$

Où,

- K : gain statique [-]
- T_0 : retard [s]
- τ_1, τ_2 et τ_3 : constantes de temps [s].

Ici, le gain statique K est égal à 1 puisque l'orientation souhaitée sera atteinte en régime établi. Cependant, le retard T_0 ainsi que les constantes de temps τ_1, $\tau_2$et $\tau_3$sont à identifier. Pour l'identification de ces paramètres, un algorithme à régions de confiance [19] associé à l'erreur quadratique a été utilisé.

Tableau 1 - Corrélation entre les fonctions de transfert et les données.

Fonction de transfert	Corrélation [%]
1er ordre	93.680 ± 1.1698
2ème ordre	95.362 ± 1.1288
3ème ordre	95.957 ± 1.1523

L'identification des fonctions de transfert donne de très bon résultats (Corrélation > 93%) comme présenté dans le Tableau 1. Les fonctions de transfert pour les trois ordres donnent des résultats similaires. Ainsi, l'ajout de constantes de temps n'est pas nécessaire puisque l'amélioration de la précision n'est pas suffisamment importante pour justifier de complexifier le système.
Nous modélisons donc le comportement des roues folles par une fonction de transfert du 1er ordre.

IV. UTILISATION DE LA FONCTION DE TRANSFERT DANS LE CALCUL DE LA CINEMATIQUE DU FAUTEUIL

En utilisant la fonction de transfert du comportement des roues folles, nous sommes capables de déterminer la réelle cinématique du fauteuil lors d'un changement de direction.

Nous réalisons cette étude pour un mouvement de recul à 1m/s avec les roues folles avant initialement orientées de 10°, et les roues folles arrière initialement orientées de -10°.

Une vitesse de 1m/s correspond à des paramètres $\tau = 0.5$ s et $T_0 = 0.5$ s.

En utilisant les expressions (10) et (11), nous obtenons les vitesses représentées sur la Figure 8. Nous notons que lors de l'auto-orientation des roues folles, un mouvement de rotation survient. Le fauteuil tourne dans un sens, puis dans l'autre. Ce changement survient au moment où les roues passent par l'angle pour lequel on a un mouvement de rotation pure. À ce moment-là, on a effectivement une vitesse linéaire nulle. Ce comportement très désagréable de rotation dans un seul puis dans l'autre est ressenti lors de la conduite, et il conviendrait de l'atténuer au maximum dans le développement d'une loi de commande.

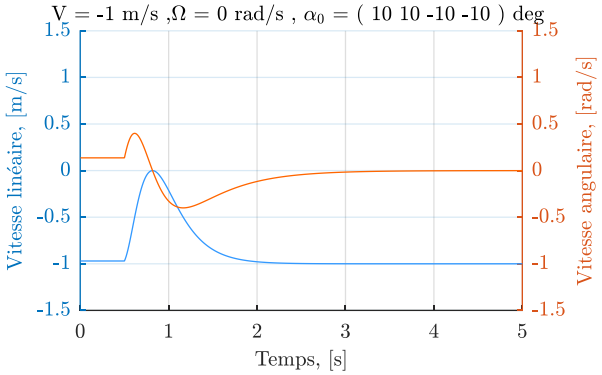


Figure 8 - Vitesses linéaire et angulaire du fauteuil pour une consigne de recul à 1 m/s avec les roues initialement orientées à ±10°.

Lorsque le régime est établi, nous avons bien une vitesse linéaire de -1m/s et une vitesse angulaire nulle.

La trajectoire issue de la cinématique du fauteuil lors du mouvement de recul présente une déviation de la trajectoire visée comme représenté sur la Figure 9. On observe le même type de trajectoire dans [8] et sur la Figure 7 (b).

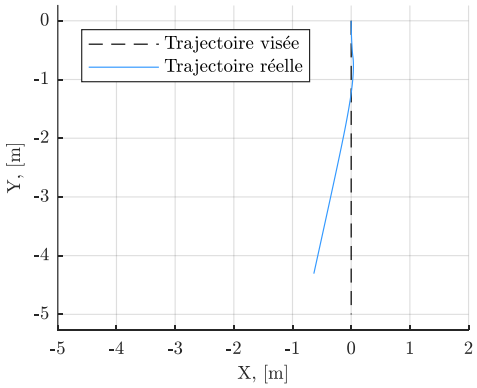


Figure 9 - Trajectoires visée et réelle du fauteuil, calculées depuis la cinématique visée et la cinématique réelle.

V. DISCUSSION

Cette étude a permis de réaliser un modèle du comportement cinématique du fauteuil roulant et des roues folles lors de changements de direction. Elle a permis de modéliser le comportement des roues folles par une fonction de transfert du 1er ordre. Celle-ci va être utilisée pour le développement d'une loi de commande pour l'assistance des manœuvres. L'objectif de cette loi de commande sera de minimiser le temps d'auto-orientation des roues ainsi que l'à-coup ressenti lors de la manœuvre. Il s'agira donc de faire un compromis entre ces deux objectifs. En effet, plus la vitesse est élevée, plus les roues folles s'orientent rapidement, mais plus l'à-coup est élevé.

Lors de cette étude, nous avons utilisé uniquement deux encodeurs pour mesurer l'orientation des roues folles, en faisant le postulat que le comportement des deux autres roues folles était similaire et donc ne nécessitant pas d'instrumentation. À l'avenir, une étude avec quatre encodeurs sera effectuée pour développer le point particulier du 0°. En effet, dans ce cas, c'est la première roue qui commence à s'auto-orienter qui entraîne les autres. Nous avons aussi noté que le comportement des roues folles lors du recul n'était pas modélisable lorsqu'elles étaient initialement orientées à 0°. La loi de commande devra donc forcer l'orientation des roues folles avant d'initier le mouvement de recul. Pour décider du sens dans lequel forcer cette orientation, nous nous appuierons sur l'étude de l'environnement utilisée dans [7].

VI. CONCLUSION

L'objectif de cet article était d'étudier la cinématique du fauteuil roulant électrique, lors de changements de direction, et de la modéliser. Les équations mathématiques régissant le comportement cinématique du fauteuil en fonction de la vitesse de rotation des deux roues motrices et de l'orientation des roues folles ont été établies. Ensuite, une étude sur le comportement des roues folles a permis de montrer qu'il pouvait être modélisé par une simple fonction de transfert du 1er ordre. Enfin, nous avons pu calculer la cinématique réelle du fauteuil roulant au regard de l'orientation des roues folles, afin de maîtriser parfaitement sa trajectoire.

Dans les prochains travaux, nous allons développer une loi de commande qui visera à minimiser l'à-coup ressenti lors de changements de direction. Cette loi de commande travaillera en collaboration avec l'algorithme d'évitement d'obstacles de [7] pour assister les manœuvres comme la sortie d'ascenseur par exemple. Nous envisageons également d'implémenter ce modèle dans un simulateur de conduite de fauteuil roulant électrique [20], qui prend en compte les effets des roues folles.

REMERCIEMENTS

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). Nous tenons à remercier Éric Bazin (INSA) et François Pasteau (Ergovie) pour le support fourni dans la réalisation des cartes électroniques. Nos remerciements vont également à Sylvain Rigaud (INSA) pour la fabrication des pièces mécaniques.

RÉFÉRENCES

[1] R. A. Cooper, *Wheelchair Selection and Configuration*. 1998.

[2] R. C. Simpson, E. F. LoPresti, and R. A. Cooper, "How many people would benefit from a smart wheelchair?," *J. Rehabil. Res. Dev.*, vol. 45, no. 1, pp. 53–72, Dec. 2008.

[3] R. C. Simpson, "Smart Wheelchairs: A Literature review," *J. Rehabil. Res. Dev.*, vol. 42, no. 4, pp. 423–436, 2005.

[4] D. Ding and R. A. Cooper, "Electric Powered Wheelchair," *IEEE Control Syst.*, vol. 25, no. 2, pp. 22–34, 2005.

[5] G. Campion and W. Chung, "Wheeled Robots," in *Springer Handbook of Robotics*, 2008, pp. 391–410.

[6] P. Morin and C. Samson, "Motion Control of Wheeled Mobile Robots," in *Springer Handbook of Robotics*, 2008, pp. 799–826.

[7] L. Devigne, V. Karakkat Narayanan, F. Pasteau, and M. Babel, "Low complex sensor-based shared control for power wheelchair navigation," in *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2016.

[8] D. Ding, R. A. Cooper, S. Guo, and T. A. Corfman, "Analysis of driving backward in an electric-powered wheelchair," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 12, no. 6, pp. 934–943, 2004.

[9] S. Guo, R. A. Cooper, T. Corfman, D. Ding, and G. Grindle, "Influence of Wheelchair Front Caster Wheel on Reverse Directional Stability," *Assist. Technol.*, vol. 15, no. 2, pp. 98–104, Dec. 2003.

[10] F. Chenier, P. Bigras, and R. Aissaoui, "An orientation estimator for the wheelchair's caster wheels," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 19, no. 6, pp. 1317–1326, 2011.

[11] F. Chénier, P. Bigras, and R. Aissaoui, "A new dynamic model of the manual wheelchair for straight and curvilinear propulsion," in *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, 2011, vol. 18, no. 10, pp. 1031–1043.

[12] L. Xi, "Force Sensorless Power Assist Control for Wheelchair on Flat Road Using Recursive Least Square with Multiple Forgetting," in *IEEE International Workshop on Sensing, Actuation and Motion Control, SAMCON*, 2016.

[13] R. P. Gaal, N. Rebholtz, H. Ralf, and P. F. Pfaelzer, "Wheelchair rider injuries : Causes and consequences for wheelchair design and selection," *J. Rehabil. Res. Dev.*, vol. 34, pp. 58–71, 1997.

[14] B. W. Johnson and J. H. Aylor, "Dynamic Modeling of an Electric Wheelchair," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-21, no. 5, pp. 1284–1293, Sep. 1985.

[15] H. B. Pacejka and E. Bakker, "THE MAGIC FORMULA TYRE MODEL," *Veh. Syst. Dyn.*, vol. 21, no. sup001, pp. 1–18, Jan. 1992.

[16] D. A. Lee, D. G. Jung, K. S. Woo, L. K. Kim, H. Mok, and S. Han, "Orientation compensation for initially misaligned caster wheels," in *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2013, vol. 11, no. 5, pp. 1071–1074.

[17] T. J. Collins and J. J. Kauzlarich, "Directional instability of rear caster wheelchairs," *J. Rehabil. Res. Dev.*, vol. 25, no. 3, pp. 1–18, 1988.

[18] J. J. Kauzlarich, T. Bruning, and J. G. Thacker, "Wheelchair caster shimmy and turning resistance," *J. Rehabil. Res. Dev.*, vol. 21, no. 2, pp. 15–29, 1984.

[19] R. H. Byrd, M. E. Hribar, and J. J. Nocedal Siam Optim, "An interior point algorithm for large-scale nonlinear programming," *SIAM J. Optim.*, vol. 9, no. 4, pp. 877–900, 1999.

[20] L. Devigne, M. Babel, F. Nouviale, V. Narayanan, F. Pasteau, and P. Gallien, "Design of an immersive simulator for assisted power wheelchair driving," *IEEE ICORR.*, vol. 17, 2017.