

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En** : Electrotechnique

**Spécialité** : Commandes électriques

**Par** : Kehli Mostefa et Kherbouche Mohammed Ilyes

### Sujet

**Commande par Backstepping d'un fauteuil roulant électrique**

Soutenu publiquement, le 23/06/2022, devant le jury composé de :

Mme Benrezzak N	MAA	Université de Tlemcen	Président
M Lazreg M H	MCB	Université de Tlemcen	Examineur
Mme Boubekeur D	MCB	ISTA, Université Oran 1	Encadreur
M Boumediene A	Pr	Université de Tlemcen	Co-Encadreur

Année universitaire : 2021 / 2022

## ***Remerciements***

En préambule à ce mémoire

Nous remercions Allah qui nous a aidé et nous a donné la patience et le courage  
durant ces longues années d'étude.

Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui  
nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi  
qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

Nous tenant à remercier sincèrement Dr Boubekeur Djamila et Pr Boumediene  
Abdelmadjid en tant que nos encadrants, et co-encadreur, et aux membres de jury  
Mme Benrezzak N en tant que président du jury et Dr Lazreg H en tant  
qu'examineur.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis,  
qui nous ont toujours soutenue et encouragée au cours de la réalisation de ce  
mémoire.

**Merci à tous**

## *Dédicace 1*

Je Tiens tout d'abord à remercier Allah de m'avoir aidé à réaliser ce

mémoire et mes études,

À toi ma très chère mère,

À toi mon très cher Père,

Les personnes qui ont sacrifié leur vie pour moi, et qui ont pris le défi

pour mes études

Et m'éclairé le chemin de ma réussite.

Soyez sûr que je continuerai mon chemin.

Je vous dédie ce travail en témoignage de mon profond amour.

À mon cher frère et mes chères sœurs Qui sont toujours à mes côtés et

qui m'ont soutenu durant mon parcours universitaire,

À toute ma famille,

À tous mes amis,

À mon binôme et tous les collègues.

**KEHLI MOSTEFA**

## *Dédicace 2*

Je Tiens tout d'abord à remercier Allah de m'avoir aidé à réaliser ce

mémoire et tous mes études,

À vous très chers parents,

Merci d'avoir été avec moi tout au long de mon parcours universitaire

Et m'avez éclairé le chemin de ma réussite.

Soyez sûr que je continuerai mon chemin.

À mes chères frères Abdessamad, Abdallah, Ayoub et Abdeljalil Qui sont

toujours à côté de moi et m'encouragent durant mon parcours

universitaire,

À toute ma famille,

À tous mes amis,

Abdelkader, Nadjib, Yacine, Mostafa, Amine, Nadir et Yasser

Qui me souhaitent de la réussite.

Salutation spéciale à Hadjer qui a été mon soutien moral

À mon cher binôme Kehli Mostefa.

**KHERBOUCHE MOHAMMED ILYES**

## *Résumé*

Dans notre travail nous avons étudié un robot mobile de type unicycle avec deux roues motrices en arrière et deux folles placé en avant pour assurer sa stabilité. Sa modélisation cinématique et dynamique nous confirme sa nature non linéaire multivariable.

Afin de réaliser notre objectif, nous avons divisé notre travail en deux phases ; la première consiste à modéliser le FRE (en considérant le modèle de l'actionneur MSAP qui génère les couples d'entrée du système) et synthétisé une commande linéaire classique par PID dans le but de contrôler la position de FRE.

Concernant la seconde, nous avons utilisé une commande non linéaire par Backstepping afin de contrôler la position du FRE en donnant des références constantes pour le déplacement dans un environnement intérieur, en suite interprété mes résultats obtenus. Les résultats de simulation confirment que notre système (FRE+commande) présente une solide robustesse en présence des variations paramétriques et de perturbations.

## *Abstract*

In our work we have studied a unicycle-type mobile robot with two driving wheels behind and two idlers placed in front to ensure its stability. Its kinematic and dynamic modeling confirms its multivariable nonlinear nature.

In order to achieve our object, we divided our work into two phases; the first consists in modeling the electric wheelchair (considering the model of the permanent magnet synchronous motor which generates the input torques of the system) and synthesizing a classical linear command by PID in order to control the position of the electric wheelchair.

Concerning the second, we used a nonlinear control by Backstepping in order to control the position of the electric wheelchair by giving constant references for the displacement in an interior environment, then interpreted my obtained results. The simulation results confirm that our system (the electric wheelchair + command) presents a solid robustness in the presence of parametric variations and disturbances.

## ملخص

درسنا في عملنا روبوتاً متحركاً من نوع أحادي العجلة يتكون من عجلتين للقيادة في الخلف وعجلتي تباطؤ في الأمام لضمان ثباته. تؤكد النمذجة الحركية والديناميكية على طبيعتها اللاخطية متعددة المتغيرات.

من أجل تحقيق هدفنا، قسمنا عملنا إلى مرحلتين؛ تتمثل المرحلة الأولى في نمذجة الكرسي الكهربائي المتحرك (مع الأخذ بعين الاعتبار نموذج المحرك المتزامن بمغناطيس دائم الذي يولد أزواج المداخل للنظام) وتوليف أمر خطي كلاسيكي عن طريق PID من أجل التحكم في حركة الكرسي الكهربائي المتحرك.

فيما يتعلق بالمرحلة الثانية، استخدمنا عنصر تحكم غير خطي بواسطة Backstepping من أجل التحكم في موضع الكرسي الكهربائي المتحرك من خلال إعطاء مراجع ثابتة للإزاحة في بيئة داخلية، ثم فسرنا النتائج التي حصلت عليها. تؤكد نتائج المحاكاة أن نظامنا (التحكم + الكرسي الكهربائي المتحرك) يقدم قوة صلابة في ظل وجود اختلافات واضطرابات بارومترية.

# Sommaire

<b>Remerciement</b> .....	<b>ii</b>
<b>Dédicace 1</b> .....	<b>iii</b>
<b>Dédicace 2</b> .....	<b>iv</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>v</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>vi</b>
<b>ملخص</b> .....	<b>vii</b>
<b>Sommaire</b> .....	<b>viii</b>
<b>Table des figures</b> .....	<b>ix</b>
<b>Notation</b> .....	<b>x</b>
<b>Abréviation</b> .....	<b>xi</b>
<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 Bref état de l’art</b> .....	<b>3</b>
1.1 Introduction.....	4
1.2 Les robots mobiles.....	4
1.2.1 Définition d’un robot.....	4
1.2.2 Classification des robots mobiles .....	4
1.2.3 Les robots mobiles à roues.....	5
1.2.4 Application des robots mobiles à roues .....	6
1.3 Les fauteuils roulants.....	6
1.3.1 Les fauteuils roulants dans l'histoire .....	6
1.3.2 Profils d’utilisateurs de fauteuils roulants .....	7
1.3.3 Critères de choix d’un fauteuil roulant.....	8
1.4 Les fauteuils roulants électriques .....	8
1.4.1 Description d’un fauteuil roulant électrique .....	9
1.4.2 Les différents types de fauteuil roulant électrique .....	10
1.5 Les fauteuils roulants électrique intelligents.....	11
1.6 Les actionneurs électriques .....	14
1.7 Les moyens de pilotage d’un fauteuil roulant électrique.....	15
1.8 Commande des fauteuils roulants électriques .....	16
1.9 Conclusion .....	17

<b>Chapitre 2 Modélisation et commande linéaire du fauteuil roulant électrique</b> .....	18
2.1 Introduction .....	19
2.2 Modélisation cinématique du fauteuil roulant électrique.....	19
2.3 Modélisation dynamique du fauteuil roulant électrique .....	20
2.4 Représentation d'état du fauteuil roulant électrique : .....	24
2.5 Description et modélisation de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP).....	25
2.5.1 Description de la machine synchrone à aimants permanents .....	25
2.5.2 L'avantage des machines synchrones à aimants permanentes .....	26
2.5.3 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents .....	27
2.6 Mise sous forme d'équation d'état .....	31
2.7 Modèle du système global .....	31
2.8 Régulateur proportionnel intégral dérivée (PID).....	32
2.8.1 Principe de fonctionnement .....	33
2.8.2 Principe de conception d'un régulateur PID.....	34
2.8.3 Application du correcteur PID au modèle simplifié du fauteuil roulant électrique.....	34
2.8.4 Résultats de simulation .....	34
2.8 Conclusion : .....	36
<b>Chapitre 3 La commande non linéaire par Backstepping</b> .....	37
3.1 Introduction.....	38
3.2 Méthode de Lyapunov .....	38
3.3 Commande Backstepping .....	39
3.3.1 Principe.....	39
3.3.2 Exemple sur la commande par Backstepping .....	39
3.4 Application de la commande par Backstepping au FRE simplifié .....	42
3.5 Application de la commande par Backstepping au fauteuil roulant électrique avec MSAP .....	47
3.6 Commande vectorielle .....	52
3.6.1 Principe.....	52
3.6.2 Calcul de la commande vectorielle.....	53
3.7 Etude robustesse .....	55
3.8 Conclusion .....	58
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>59</b>
<b>Annexe A-B</b> .....	<b>60</b>
<b>Bibliographie</b> .....	<b>61</b>

## *Table des figures*

Figure 1.1 : Exemples des robots mobiles à roues.....	6
Figure 1.2 : Le fauteuil roulant dans l'histoire .....	7
Figure 1.3 : Description d'un fauteuil roulant de type Ottobock b400.....	9
Figure 1.4 : Le projet de VAHM .....	12
Figure 1.5 : FRE et le Projet WAD .....	13
Figure 1.6 : Wheelesley Robot .....	13
Figure 2.1 : Modèle cinématique du fauteuil roulant électrique.....	19
Figure 2.2 : Modèle dynamique du système de l'utilisateur de fauteuil roulant .....	20
Figure 2.3 : Représentation de Msap .....	26
Figure 2.4 : Les enroulements de la Msap.....	27
Figure 2.5 : Les enroulements a,b,c .....	29
Figure 2.6 : Schéma synoptique du modèle globale (FRE+MSAP) .....	31
Figure 2.7 : Schéma bloc du correcteur PID .....	33
Figure 2.8 : Schéma de la commande de fauteuil roulant électrique avec PID .....	34
Figure 2.9 : Commande de position du système découplé à une entrée rampe .....	35
Figure 2.10 : Commande de position du système découplé à une entrée échelon.....	35
Figure 3.1 : Résultat de simulation de modelé simplifié (pente $\psi = 0^\circ$ ).....	46
Figure 3.2 : Résultat de simulation de modelé simplifié (pente $\psi = 10^\circ$ ).....	47
Figure 3.3 : Modèle de la Msap après découplage .....	52
Figure 3.4 : Grandeurs électriques et mécaniques de modelé global (pente= $10^\circ$ ) .....	54
Figure 3.5 : Grandeurs électriques et mécaniques de modelé global (pente= $30^\circ$ ) .....	55-56
Figure 3.6 : Grandeurs électriques et mécaniques de modelé global (pente= $-10^\circ$ ) .....	56-57

## ***Notation***

$C_a$ : Coefficient de frottement de l'armature.

$C_r, C_l$ : Couple exercées sur les mouvements.

$C_{Fr}, C_{Fl}$ : Couple exercé sur le mouvement de rotation des roues motrices

$c_r, c_l$ : Couple généré par les deux moteurs droite et gauche.

$C_w$ : Coefficient de frottement visqueux.

$f$ : Coefficient de frottement visqueux.

$f_{rd}, f_{ld}$ : Forces de frottements.

$F_r, F_l$ : Forces de réaction des roues sur terre.

$f_n$ : Fréquence d'alimentation.

$g$ : La gravité.

$I_n$ : Courant nominale

$J$ : Moment d'inertie du FRE autour de l'axe Z.

$J_a$ : Moment d'inertie de l'armature (moteur+réducteur).

$J_w$ : Moment d'inertie de la roue.

$J_1$ : Moment d'inertie du rotor.

$L$ : La distance entre les deux roues.

$r$ : Droite.

$l$ : Gauche.

$L_d$ : Inductance statorique selon l'axe d.

$L_q$ : Inductance statorique selon l'axe q.

$M$ : La masse totale (FRE+opérateur).

$m_w$ : La masse de la roue.

$N_n$ : Vitesse de rotation nominale.

$p$ : Nombre de pair de pôles.

$P_n$ : Puissance nominale.

$R_s$ : Résistance statorique.

$R$ : Le rayon des roues.

$\alpha_{mr}, \alpha_{ml}$ : L'angle de rotation des deux moteurs droite et gauche respectivement.

$\alpha_r, \alpha_l$ : L'angle de rotation des deux roue droite et gauche respectivement.

$\sigma$ : Le ratio.

## ***Abréviation***

FRE : Fauteuil Roulant Electrique.

MSAP : Machine Synchrone à Aimants Permanents.

VAHM : Le projet Véhicule autonome pour Handicapés Moteurs.

WAD : Le projet Wheelchair Attractor Dynamics.

EOG : Les signaux physiologiques de type Electro-Oculogramme.

EEG : Les signaux physiologiques de type Electro-Encelogramme.

EMG : Les signaux physiologiques de type Electromyogramme.

## ***Introduction générale***

Les robots mobiles feront bientôt partie intégrante de notre quotidien. Les progrès de la robotique mobile ont permis de créer des robots qui peuvent fonctionner dans nos bureaux, maisons, écoles, hôpitaux et laboratoires de recherche. Les robots joueront bientôt plus de rôles que leur application courante en tant qu'assembleurs industriels [1].

Parmi les robots qui ont attiré notre attention, ces ceux qui ont une énorme contribution à l'aide des personnes à mobilité réduite et aux personnes ayant des besoins spéciaux.

Améliorer la mobilité des personnes handicapées entraînant une mobilité réduite est un véritable défi technique. Différentes solutions de mobilité personnelle ont été développées pour améliorer la qualité de vie de ces personnes, augmenter leur autonomie, augmenter leurs opportunités sociales ou simplement leur permettre d'atteindre une position debout. Un accident vasculaire cérébral ou une lésion de la moelle épinière peut entraîner des problèmes de mobilité. Ces personnes ont besoin d'une approche différente pour appréhender leur mobilité de manière innovante pour favoriser leur retour à l'emploi ou aux loisirs.

La solution la plus utilisée, à la fois simple et efficace, pour acquérir une forme d'indépendance et d'autonomie c'est le fauteuil roulant électrique [2]. Il est devenu une technologie d'aide à la mobilité essentielle pour les personnes ayant une d'efficiency motrice. Il est avant tout destiné à toute personne en situation de handicap et éprouvant des difficultés à propulser elle-même un fauteuil roulant manuel soit en raison de sa d'efficiency, soit en raison de sa situation environnementale et qui dispose de capacités cognitives permettant d'assurer la maîtrise du fauteuil motorisé.

Une autre caractéristique est que le déplacement est directement commandé par l'utilisateur par l'intermédiaire d'un boîtier de commande. La conduite du fauteuil s'effectue généralement par l'intermédiaire d'un joystick mais parfois l'utilisation d'une commande spéciale est indispensable (au menton, à la tête, par contacteurs, avec d'effilement, au souffle, à induction...) [3].

Le fauteuil roulant électrique, étudié dans ce travail, est un robot de type unicycle à deux roues motrices placées en arrières, et deux roues folles pour assurer sa stabilité placée en avant. C'est un système électromécanique dont l'analyse complète fait appel conjointement aux disciplines principales suivantes :

- Mécanique : les transmissions, le procédé à régler.
- Electromécanique : le moteur à courant continu, la machine électrique synchrone ou asynchrone.
- Electronique de puissance : les convertisseurs de puissances et sources d'énergie.
- Automatique : la commande, l'observation et l'identification.
- Informatique : la supervision, le diagnostic.

Ce système "multidisciplinaire" peut se définir comme une chaîne d'asservissement. Augmenter alors globalement les performances d'une telle chaîne électromécanique passe obligatoirement par une approche système des problèmes. Néanmoins, dans le cadre de ce projet, nous limiterons notre analyse aux méthodes de l'automatique appliquées à la commande de position du fauteuil roulant électrique menu d'actionneurs de type machine synchrone à aimants permanents (MSAP) [4].

Dans ce mémoire nous allons présenter la modélisation et la commande non linéaire par Backstepping du fauteuil roulant électrique menu de deux actionneurs de type moteur synchrone à aimants permanents.

Afin d'atteindre notre objectif, nous allons diviser notre travail en trois chapitres :

Le premier est un chapitre introductif dans lequel nous allons présenter les robots mobiles en précisant les robots mobiles à roues et ses applications. Ensuite, nous présentons un état de l'art des fauteuils roulants électrique avec les détails de ses différents types et leur critère de choix avec une description sur les fauteuils roulants intelligents. Après cela, nous allons expliquer les types des actionneurs qui peuvent être utilisés pour un fauteuil roulant en met le point sur le moteur synchrone à aimants permanents. Enfin, nous allons citer les moyens de pilotage des fauteuils roulants électrique et les commandes appliquées.

Le deuxième chapitre constitue la modélisation cinématique et dynamique d'un fauteuil roulant électrique, la modélisation de moteur synchrone à aimants permanents, et la commande linéaire en utilisant un correcteur classique du fauteuil roulant électrique.

Dans le dernier chapitre, nous allons traiter le réglage du système simplifier et global en utilisant la commande non linéaire Backstepping pour le contrôle de position. Les résultats de simulations vont nous permettre de visualiser les performances de notre système commandé.

# Chapitre 1

**Bref état de l'art**

## 1.1 Introduction

En raison des difficultés, les limites de l'être humain dans l'accomplissement de diverses tâches l'ont motivé à découvrir et à développer des technologies qui facilitent la vie quotidienne. À cet égard, les robots sont conçus à cet effet, pour contourner les limites humaines.

Dans ce chapitre, nous définirons les robots mobiles en précisant les robots mobiles à roues et ses applications. Ensuite, nous présentons un état de l'art des fauteuils roulants électrique avec les détails de ses différents types et leur critère de choix avec une description sur les fauteuils roulants intelligents. Après cela, nous allons expliquer les types des actionneurs qui peuvent être utilisés pour un fauteuil roulant en mettant le point sur le moteur synchrone à aimants permanents. Enfin, nous allons citer les moyens de pilotage des fauteuils roulants électrique et les commandes appliquées.

## 1.2 Les robots mobiles

### 1.2.1 Définition d'un robot

Un robot est un système mécanique composé de corps mobiles reliés par des actionneurs qui lui donnent des capacités de mouvement dans l'espace physique. Les structures mécaniques utilisés sont de types très divers, qu'il s'agisse de robots manipulateurs constitués d'un bras terminé par un outil ou un organe de préhension (pince, main multi-doigts, etc.), ou encore de robots mobiles avec des principes de locomotion adaptés à divers environnements (roues, chenilles, pattes, etc.).

Enfin il existe également de nombreux autres types de robots mobiles (robots marins, sous-marins, drones volants, micro et nano robots), généralement l'étude de ce type de robot se fait dans des thématiques spécifiques avec des problèmes particuliers à l'application visée [1].

### 1.2.2 Classification des robots mobiles

On peut classer les robots mobiles selon leur degré d'autonomie, système de locomotion, leur domaine d'application, leur système de localisation et l'énergie utilisée. Nous allons présenter ici quatre classifications qui semblent être les plus intéressantes [5] [6] :

- **Classification selon le degré d'autonomie**

Un robot mobile autonome est un système automoteur doté de capacités décisionnelles et de moyens lui permettant d'accomplir sous contrôle humain réduit un certain nombre de tâches dans un environnement non complètement connu. On peut citer quelques types :

- ✓ Véhicule télécommandé par un opérateur : Ces robots sont commandés par un opérateur qui leur impose chaque tâche élémentaire à réaliser.
- ✓ Véhicule télécommandé au sens de la tâche à réaliser : ce type de véhicule contrôle automatiquement ses actions.
- ✓ Véhicule semi-autonome : Ce type de véhicule réalise des tâches prédéfinies sans l'aide de l'opérateur.

- **Classification selon le type de locomotion**

Selon le système de locomotion, on peut distinguer quatre types des robots :

- ✓ **Les robots mobiles à roues** : La mobilité par roues est la structure mécanique la plus utilisée. Ce type de robot assure un déplacement avec une accélération et une vitesse rapide mais nécessite un sol relativement plat.
  - ✓ **Les robots mobiles à chenilles** : L'utilisation des chenilles présente l'avantage d'une bonne adhérence au sol et d'une faculté de franchissement d'obstacles. L'utilisation est orientée vers l'emploi sur des sols accidentés ou de mauvaise qualité au niveau de l'adhérence (présence de boue, herbe...).
  - ✓ **Les robots mobiles marcheurs** : Les robots mobiles marcheurs sont destinés à réaliser des tâches variées dont l'accès au site est difficile et dangereux à l'homme.
  - ✓ **Les robots mobiles rampants** Le système est composé d'un ensemble de module ayant chacun plusieurs mobilités. Ici aussi les techniques utilisées découlent des méthodes de locomotion des animaux et des insectes (humanoïdes), à quatre pattes (type cheval), et à six pattes (type araignée).
- **Classification selon la motricité et l'énergie**

Le déplacement des robots est réalisé par des moteurs de types :

- ✓ Électrique.
- ✓ Thermique.
- ✓ Hydraulique.

### 1.2.3 Les robots mobiles à roues

Les robots mobiles à roues sont les plus répandus actuellement. La raison est essentiellement ; la simplicité de conception du mécanisme. La plupart des robots mobiles opérationnels jusqu'à présent, évoluent sur sites aménagés : environnement intérieur ou sites industriels. Ces robots comportent, généralement, trois ou quatre roues. Dans les cas marginaux, ils peuvent prendre six roues voire plus. On peut distinguer plusieurs types de roues : [1] [7]

- Roues motrices.
- Roues motrices directrices.
- Roues libres.
- Roues libres directrices.
- Roues folles.



Figure 1.1 : Exemples des robots mobiles à roues

### 1.2.4 Application des robots mobiles à roues

Aujourd'hui, le marché commercial de la robotique mobile est toujours relativement restreint en dehors des robots aspirateurs vendus à plusieurs millions d'exemplaires. Cependant, il existe de nombreuses perspectives de développement qui en feront probablement un domaine important dans le futur. Les applications des robots peuvent se trouver dans de nombreuses activités "ennuyeuses, salissantes ou dangereuses" (3D's en anglais pour Dull, Dirty, Dangerous), mais également pour des applications ludiques ou de service, comme l'assistance aux personnes âgées ou handicapées.

Parmi les domaines d'applications possibles de la robotique, citons :

- La robotique de service (hôpital, bureaux, maison),
- La robotique de loisir (jouets, robot 'compagnon'),
- La robotique industrielle ou agricole (entrepôts logistiques, récolte de productions agricoles, mines),
- La robotique en environnement dangereux (spatial, industriel, militaire, catastrophes naturelles). [8]

## 1.3 Les fauteuils roulants

Un fauteuil roulant (en langage familier "chaise roulante", "charriot" ou encore "charrette") est un dispositif médical classé parmi les aides techniques de déplacement. Il est utilisé pour améliorer l'autonomie aux personnes à mobilité réduite. La chaise roulante doit prendre en considération les spécificités de l'individu concerné, son environnement et ses besoins (sociaux, professionnels et loisir). [9][10].

### 1.3.1 Les fauteuils roulants dans l'histoire

Il fallait que deux objets soient inventés : D'abord la chaise et puis la roue. Ceci nous replonge dès lors à 4000 ans avant JC. La première trace de roue montée comme élément de mobilité nous vient de Chine vers 1300 ans avant JC. D'autres viennent de Grèce, 525 avant J.C. L'Egypte ancienne, la Perse ou d'autres grandes époques de l'Histoire ont certainement eu des objets semblables bien que on n'en trouvent aucune trace connu à ce jour.

Toutefois, il faut noter que pendant longtemps, les fauteuils roulant étaient réservés à l'élite ou la noblesse et étaient des symboles de puissance.

Il faut encore avoir l'idée d'associer la roue à une chaise ou même à un lit et là on peut remonter vers 530 avant JC ou l'on a la première représentation sur un vase Grec d'un enfant allongé sur un lit muni de roulettes.

Quelques années plus tard, vers 525 avant JC en Chine, on peut voir la première gravure et preuve évidente de la naissance du fauteuil roulant.

- Le premier fauteuil roulant moderne connu a été inventé vers 1554 pour Philippe II d'Espagne et fût appelé "chaise pour invalide".

- En 1655, Stephen Farffler, horloger à Nuremberg et probablement lui-même amputé ou paraplégique, inventa le premier fauteuil roulant auto-propulsé
- En 1783, l'anglais John Dawson, de Bath, inventa une petite voiture où le fauteuil est tenu par deux grosses roues à l'arrière et une plus petite à l'avant.
- Durant la fin du 18<sup>ème</sup> siècle, on verra surtout des versions plus confortables de fauteuils où la personne handicapée aura droit à un certain confort (repose pied réglable dossier inclinable, coussin...)
- La première patente pour un fauteuil roulant a été déposée en 1869. Il s'agissait d'un châssis métallique fixe surmonté d'un siège en osier et soutenu par deux grosses roues.
- Vers 1881, des arceaux apparaissent et permettent de manipuler le fauteuil de manière indépendante et ce n'est qu'en 1912 qu'un moteur de 1 cheval 3/4 est attaché à un tricycle pour invalide.
- En 1916 apparaissent en Angleterre les premiers fauteuils roulants motorisés.
- En 1933, à Los Angeles, Harry Jennings invente le premier fauteuil roulant pliable pour son ami Herbert Everest. Ils en déposent la patente et fondent Everest & Jennings. La compagnie restera leader sur le marché américain jusqu'au milieu des années '90. Elle a été rachetée en 1996.
- En 1950, le premier fauteuil roulant électrique fut inventé par le canadien George Klein pour assister les vétérans de la seconde guerre.
- Les premiers jeux paralympiques ont lieu à Tokyo en 1964.
- En 1966, en Suède, Dr. Per Uddén invente le premier fauteuil électrique destiné à donner de la mobilité et faciliter la vie de son propriétaire. Ainsi est née la société Permobil [11].

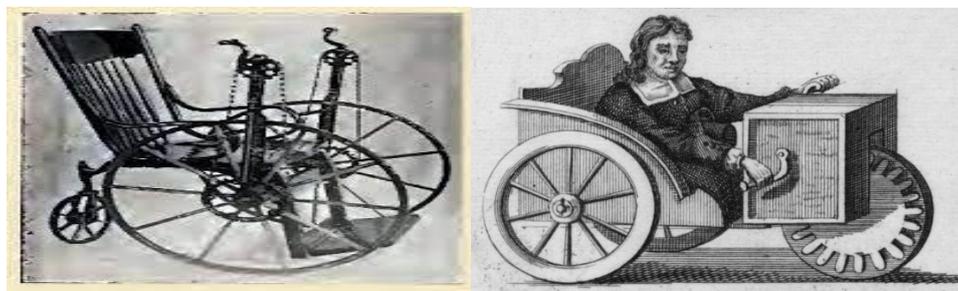


Figure 1.2 : Le fauteuil roulant dans l'histoire

### 1.3.2 Profils d'utilisateurs de fauteuils roulants

Les utilisateurs de fauteuils roulants n'ont pas tous les mêmes handicaps ou capacités. Certains ont la mobilité de leurs membres inférieurs ou supérieurs et d'autres peuvent même se tenir debout sur de courtes distances. Nous désignons 4 profils :

- **Profil 1** : Paraplégie : Personne ayant perdu ses capacités des membres inférieurs sans aucune altération aux membres supérieurs et présentant un bon équilibre du tronc.

- **Profil 2** : Tétraplégie incomplète : Personne ayant perdu ses capacités des membres inférieurs avec une perte partielle des capacités des membres supérieurs et présentant un équilibre précaire du tronc.
- **Profil 3** : Hémiplégie : Personne ayant perdu ses capacités sur un hémicorps.
- **Profil 4** : Tétraplégie complète/Myopathie : Personne ayant perdu les capacités au niveau de ses quatre membres avec un équilibre du tronc très instable [2].

### 1.3.3 Critères de choix d'un fauteuil roulant

Le choix final repose sur trois critères principaux :

- **Environnementaux**

Les conditions du lieu d'utilisation et ses spécificités sont importantes à prendre en compte : le lieu d'habitation et de travail présentent des spécificités comme la largeur des portes et des ascenseurs, la hauteur des meubles ou encore un déplacement en ville ou en campagne ce n'est pas pareil. Ces conditions de déplacement délimitent les capacités de franchissement et d'autonomie de l'utilisateur qui influencent le choix de la solution de mobilité choisie.

- **Techniques**

La maniabilité, la légèreté, la compacité, la solidité, le confort, la qualité de roulement, la technique de contrôle (électrique, manuelle) et les différentes fonctionnalités sont des caractéristiques de confort et de mobilité prises en compte et examinées par les futurs utilisateurs lors du choix de leurs solutions de mobilité.

La qualité du dispositif est aussi un point clé puisque cela détermine la capacité à résister aux conditions d'utilisation et environnementales qui le détériorent.

- **Personnels**

La solution de mobilité choisie doit être adaptée à son utilisateur que ce soit sur des aspects physiologiques comme la morphologie, les capacités fonctionnelles qui sont liées au type de handicap ou encore personnels comme les goûts et l'image qu'elle peut renvoyer ce qui détermine son acceptation. Le coût aussi est déterminant même si certaines solutions sont remboursables en partie, il faut tout de même régler l'autre moitié ce qui oriente le choix. [2]

## 1.4 Les fauteuils roulants électriques

Les fauteuils roulants à propulsion par moteur électrique sont indiqués pour les personnes ne pouvant se déplacer seules en fauteuil roulant manuel. Ils permettent de retrouver une indépendance notamment au niveau des sorties, à l'extérieur du domicile. La conduite du fauteuil s'effectue par commande électronique mais parfois l'utilisation d'une commande spéciale est indispensable [12].

### 1.4.1 Description d'un fauteuil roulant électrique

Le présent fauteuil roulant est exclusivement prévu pour le déplacement autonome ou accompagné des personnes souffrant d'un handicap partiel ou total des membres inférieurs. Il est possible d'utiliser le fauteuil roulant aussi bien en milieu intérieur qu'en milieu extérieur, sur un sol stable. Le schéma correspondant montre les composants de base d'un fauteuil roulant électrique de modèle (Ottobock b400) le plus utilisé en Algérie [13] :

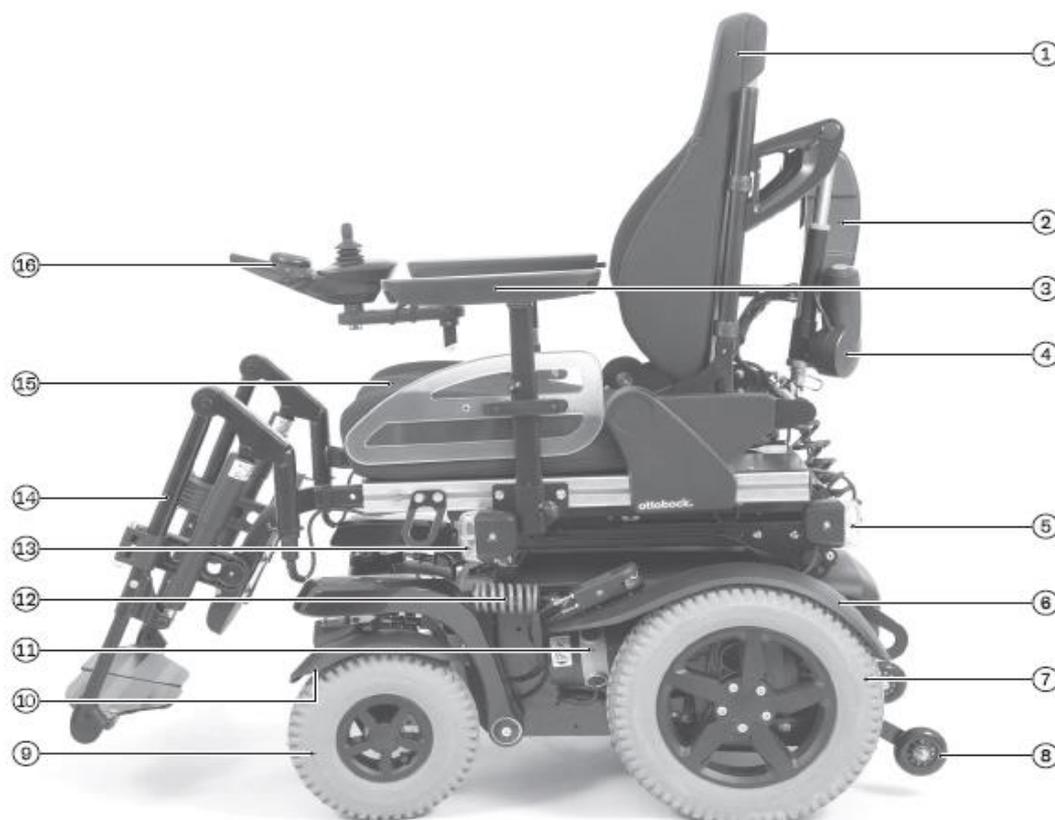


Figure 1.3 : Description d'un fauteuil roulant de type Ottobock b400

- 1 ⇒ Dossier
- 2 ⇒ Support de module pour système électronique
- 3 ⇒ Protège-vêtements avec accoudoir
- 4 ⇒ Dispositif de réglage de l'inclinaison du dossier
- 5 ⇒ Feux arrière
- 6 ⇒ Garde-boue de la roue motrice
- 7 ⇒ Roue motrice
- 8 ⇒ Anti-bascule
- 9 ⇒ Roue directrice de commande
- 10 ⇒ Garde-boue de la roue directrice
- 11 ⇒ Moteur avec déverrouillage des freins (réglage électrique)
- 12 ⇒ Suspension
- 13 ⇒ Feu avant
- 14 ⇒ Repose-jambe
- 15 ⇒ Coussin d'assise
- 16 ⇒ Boîtier de commande

### 1.4.2 Les différents types de fauteuil roulant électrique

Il existe différents types de fauteuils qui sont présentés comme suit :

- **Fauteuil d'intérieur**



Pliant, il est moins volumineux qu'un fauteuil d'extérieur. Notons qu'il est cependant difficile et fatiguant pour la tierce personne de le plier. Son autonomie va de 10 à 16 km et sa vitesse est réglable de 0 à 6 km/h. On peut le mettre dans le coffre d'une voiture [12].

- **Fauteuil d'extérieur**



Non pliant, il est plus volumineux. Son autonomie va de 16 à 45 km et sa vitesse est réglable de 0 à 10 km/h. Ce fauteuil nécessite un moyen de transport adapté car on ne peut pas le mettre dans un coffre de voiture. Le diamètre de ses roues permet de franchir des seuils ou des petits obstacles [14].

- **Fauteuil verticalisateur**



Comme l'indique leur nom, ce sont des fauteuils qui permettent aux utilisateurs de passer d'une position assise à une position debout. La verticalisation se fait soit manuellement par un système de vérin soit électriquement à l'aide d'une télécommande. Ce type des fauteuils est équipé d'un système de sécurité qui empêche le déclenchement brusque de la verticalisation lors d'un transfert [15].

- **Fauteuil à hauteur variable :**



Permet de lever l'utilisateur en position assise. Tout comme le verticalisateur il permet de mieux appréhender l'environnement et peut être important pour l'intégration sociale. Certains fauteuils électriques peuvent combiner verticalisation et hauteur variable en position assise [14].

- **Les fauteuils roulants automatisés**



Un fauteuil roulant électrique automatisé est une application de la robotique mobile apparentée à la robotique de service où l'utilisateur n'est pas a priori compétent dans le domaine technologique.

Cette application est également apparentée à la téléopération à sens où l'homme apporte à meilleure compréhension de l'environnement et la machine est faite de précision et de répétabilité [16].

Le fauteuil roulant électrique automatisé est équipé d'un certain nombre de dispositifs qui le distinguent de la plupart des fauteuils roulants actionnés, à savoir :

- ✓ Il permet à l'utilisateur d'être à la même hauteur que son interlocuteur.
- ✓ Il assure un déplacement sur différents types de terrains (trottoirs, escaliers, sable, gravier, etc).
- ✓ Il fonctionne à piles.
- ✓ Cependant il présente quelques limitations telles que :
- ✓ Il n'est pas adapté aux enfants, ni aux personnes trop fortes.
- ✓ Il ne permet pas la verticalisation.
- ✓ Il est très encombrant : trop volumineux pour entrer dans une voiture par exemple.
- ✓ Il coûte relativement cher (environ 18000 Euros) et il n'est pas remboursé par les assurances [17].

### 1.5 Les fauteuils roulants électrique intelligents



Les fauteuils roulants traditionnels, manuels ou électriques peuvent généralement être utilisés pour répondre aux besoins de déplacement des personnes à mobilité réduite. Ils leur offrent une mobilité autonome et élargissent leurs horizons professionnels et éducatifs, renforçant ainsi leur sentiment d'indépendance. Le rôle des fauteuils roulants électriques intelligents est de fournir une assistance à la mobilité à partir d'une perception de l'environnement et d'une cognition leur étant propre. Au cours de leur développement, les différents prototypes de fauteuil roulant électrique intelligent ont connu de nombreuses évolutions, notamment dans leur conception et dans

leur approche de l'assistance à la mobilité. Ces améliorations sont souvent liées aux progrès et à

l'accessibilité technologique. Un fauteuil roulant électrique intelligent doit disposer d'un ensemble de capteurs lui permettant d'analyser l'environnement, ainsi que de mesurer son propre état [18].

On peut citer quelques projets appliqués aux fauteuils roulants électrique intelligent :

- **Le projet VAHM**

Le projet VAHM (Véhicule autonome pour Handicapés Moteurs) a pour but de proposer aux personnes ayant un handicap physique lourd de se déplacer facilement par. L'interface est composée d'un bouton et d'un cadran indiquant successivement huit directions de déplacement, comme présente la figure 4. Lorsque l'utilisateur veut suivre une direction, il doit attendre qu'elle s'affiche sur le cadran et presser le bouton à ce moment. Lorsqu'il relâche le bouton, le fauteuil s'arrête et il faut choisir une nouvelle direction.

Ce système présente l'avantage de ne nécessiter qu'un seul type d'action de la part de l'utilisateur, mais a l'inconvénient d'être lent et fastidieux. C'est pourquoi le fauteuil doit se déplacer de la manière la plus autonome possible. Pour cela, il est équipé de capteurs qui collectent des données sur son environnement et d'agents réactifs qui lui permettent des comportements simples (longer les murs, éviter les obstacles, etc.) [19]. Le premier prototype, Vahm-1, est un robot mobile « Robuter » équipé d'un siège et d'une perception réalisée à partir de la fusion de donnée issue de capteurs ultrasons associés à deux codeurs odométriques [20]. Celui-ci présente une architecture logicielle coopérative [21] permettant de faire varier le niveau d'autonomie du robot en fonction de l'environnement et de la personne [22].

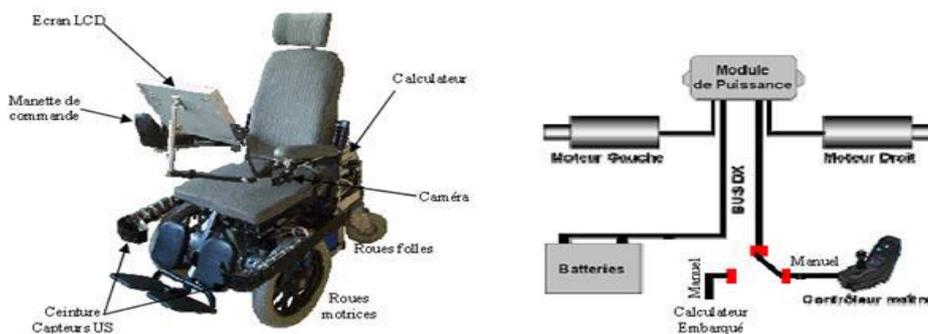


Figure 1.4 : Le projet de VAHM

- **Le projet WAD**

Le fauteuil électrique du projet WAD (Wheelchair Attractor Dynamics) dispose d'une aide à la navigation adaptée à un large public.

L'architecture de commande du Projet WAD (Wheel chair Attractor Dynamics) est installée actuellement sur un fauteuil roulant électrique modèle CRUISER de chez INVACARE. Ce fauteuil est équipé d'un système DX de base (joystick et module de puissance) auquel on a rajouté le module DX Key, qui permet un interfaçage aisé via le port parallèle d'un ordinateur portable qui sert à naviguer, soit de manière autonome pour se positionner, soit pour éviter les obstacles pendant que l'utilisateur navigue [23].



Figure 1.5 : FRE et le Projet WAD

- **Le Projet Wellesley College, MIT**

Le projet MIT Intelligent (Wheelchair Project) a commencé en 2005 et actuellement en cours et développé. Wheellesley est le nom donné à la chaise qu'il a utilisée dans le développement expérimental fait par Holly Yanco, d'abord au Wellesley Collège et maintenant au MIT.

Il utilise une caméra, des télémètre ultrasonores et des capteurs infrarouges pour la détection des obstacles. Ceci permet à l'utilisateur de naviguer en sécurité à l'extérieur. Et peut basculer automatiquement entre les modes de navigation l'extérieur et intérieur. Il a été employé pour tester la navigation commandée par les signaux Electro-Oculogramme [23].



Figure 1.6 : Wheellesley Robot

À partir des années 80, les évolutions de la technologie ont révolutionné la conception et la fabrication des fauteuils roulants intelligents. Nouveaux matériaux, nouveaux types de roulements, faciliter la traction et la commande, la réduction du poids est un facteur clé.

L'utilisation du fauteuil dans des sports comme le basket a largement contribué à son évolution esthétique. Certains athlètes ont conçu et fabriqué des fauteuils correspondant à leurs attentes : faciles démonter, légers et transportables [24].

Les difficultés de conduite présentées peuvent constituer un facteur de risque d'accident, de chute ou de blessure pour les utilisateurs. Avec l'avancement des technologies, des systèmes robotisés et intelligents sont de plus en plus intégrés aux fauteuils roulants électriques afin de faciliter et d'assurer des déplacements plus sécuritaires et ainsi, rendre les utilisateurs plus autonomes dans leurs déplacements. Le fauteuil électrique intelligent est alors proposé [25] [26] [27] [28].

## 1.6 Les actionneurs électriques

Pour choisir le moteur électrique dans n'importe quel réducteur il faut prendre en mains ses avantages et ses inconvénients dont nous nous allons présenter quelques-uns.

- **Moteur à courant continu (DC)**

La machine à courant continu est un convertisseur d'énergie, totalement réversible, elle peut fonctionner soit en moteur, convertissant de l'énergie électrique en énergie mécanique, soit en génératrice, convertissant de l'énergie mécanique en énergie électrique. Dans les deux cas un champ magnétique est nécessaire aux différentes conversions. Cette machine est donc un convertisseur électromécanique. Le principal avantage d'un moteur à courant continu est son faible coût, et la capacité qu'il offre de régler facilement sa vitesse à l'aide d'un gradateur. Le problème principal de ce type de moteur est le collecteur. En effet, pour assurer un bon contact entre les balais et le collecteur, la pression de contact entre les deux doit être importante, surtout à des vitesses élevées. Un second problème peut apparaître sur ce type de moteurs. Si le moteur tourne à une vitesse trop élevée, cela affecte la personne handicapée et rend difficile le contrôle de fauteuil roulant électrique [10]. Les recherches (Ami et al, Miyata et al, Chuy et al) sont étudiées un robot de type unicycle est propulsé par deux moteurs à courant continu (CC) pour fournir une relation entre la tension d'entrée aux moteurs et le couple de commande nécessaire pour équilibrer le robot [5] [29] [30].

- **Le moteur brushless**

Le moteur « brushless », moteur sans balais, tire son nom par opposition au moteur à courant continu qui dispose de bobinages sur le rotor et nécessite un collecteur pour alimenter ce bobinage. Ce collecteur est un point faible du moteur à courant continu : pertes énergétiques (mécaniques et électriques), usure, étincelles, etc. Les moteurs sans balais (brushless) contiennent beaucoup des inconvénients comme le risque de mauvais démarrage ou de décrochages, coût élevé, plus petites séries et peu de séries économiques. Les chercheurs de projet (Dakhli et al) donnent une amélioration des chaises roulantes actuelles par l'utilisation des moteurs DC brushless au lieu de moteurs DC avec réducteurs conventionnel, vues les performances de ces moteurs, le projet réalisé a permis une conception d'une chaise dont les performances sont meilleures par rapport au fauteuil roulant électrique.

- **Moteur à aimants permanents**

Les moteurs à aimants permanents sont semblables aux moteurs à réluctance variable, sauf que le rotor possède des pôles NORD et SUD. À cause des aimants permanents, le rotor reste freiné à sa dernière position lorsque le bloc d'alimentation cesse de fournir des impulsions. Ce dernier type d'aimants constitue un espoir important dans le domaine des moteurs électriques. Quant aux ferrites, dont le prix est acceptable en production de grande série, ils confèrent des performances relativement modestes aux MSAP mais ne sont pas à exclure. Les MSAP sont souvent retenus pour l'entraînement de véhicules électriques de même les fauteuils roulants électriques par exemple dans les projets Dinale et al., et Heo Y et al. Les moteurs synchrones à aimant permanent sont souvent

retenus pour l'entraînement de véhicules électriques de même les fauteuils roulants électriques et particulièrement pour les entraînements directs des roues [31] [32].

## 1.7 Les moyens de pilotage d'un fauteuil roulant électrique

Le choix de la communication homme machine est primordial pour un système interagissant avec l'homme, et d'autant plus quand celui-ci est en situation de handicap. Elle doit être adaptée à la personne et doit fournir, du côté utilisateur, toutes les indications lui permettant de choisir l'action souhaitée, et du côté machine, toutes les informations nécessaires à l'exécution de la tâche demandée. Sa conception dépend essentiellement de la nature des fonctionnalités proposées (notamment de leur rôle et de leurs degrés d'autonomie), du type d'organe de contrôle permettant à l'utilisateur d'accomplir les interactions homme machine, et de l'interface présentée à l'utilisateur [18][33].

- **Commande par joysticks**

L'organe de commande le plus utilisé est le joystick. L'avantage de ce type de commande est la manière intuitive dont on l'utilise. Cependant, il nécessite une certaine dextérité et un contrôle continu, ce qui le rend difficilement utilisable aux personnes atteintes de certains types de déficiences lourdes [18] [33]. Le joystick permet de mieux reproduire la tâche de conduite en fauteuil, produisant les mêmes actions pour piloter le fauteuil qu'en réel. Il existe différents types de joystick que l'on peut aisément tester en simulation : les joysticks conventionnels et les joysticks isométriques [23].

- **Commandes de type tout-ou-rien**

Ce type de commande est utilisé dans le cas où l'utilisateur ne peut pas utiliser un joystick. Pour cette commande, il existe plusieurs types de capteurs par exemple les capteurs de contact (type Bumper par exemple) pour la tête, des capteurs de souffle et d'autres boutons poussoirs [33].

- **Commandes basées sur suivi oculaire**

Ces types de commande sont basées sur les yeux qui permettent aux personnes handicapées de contrôler la direction du fauteuil roulant grâce aux mouvements de leur regard. Certains systèmes utilisent un capteur de proximité pour éviter les collisions. Cependant, le système disponible utilise une énorme caméra attachée à des lunettes. La grande caméra peut gêner la vision de l'utilisateur. De plus, le contrôle du fauteuil roulant par des mouvements oculaires sur de longues distances provoque une fatigue de l'utilisateur [23] [34].

- **Commandes par reconnaissance vocale**

La reconnaissance vocale a été très souvent utilisée pour les fauteuils roulants intelligents (ex., NavChair, SENARIO, TetraNauta et MIT) en raison du coût et de la large disponibilité du matériel de reconnaissance vocale aussi bien en hardware qu'au software. Le contrôle de la reconnaissance vocale applicable aux fauteuils roulants est doté de systèmes de détection et d'évitement des obstacles [23]. Un système de reconnaissance vocale dépendant des systèmes de capteurs ultrasons et infrarouges a été intégré dans un fauteuil roulant. De cette façon, on a pu obtenir un fauteuil roulant qui peut être conduit à l'aide de commandes vocales et avec la possibilité d'éviter les obstacles et, au bas niveau, la détection de trous [35].

- **Commandes par la langue**

Dans ce type de commande l'utilisateur porte un casque équipé de capteurs magnétiques ainsi qu'un aimant situé sur sa langue, ce qui permet d'obtenir la position de la langue par rapport à sa position au repos. Le premier type de commande proposée associe cinq mouvements (avance, recul, gauche, droite et position neutre) à la position de la langue correspondante. Ensuite, un second type de commande permet à l'utilisateur de combiner les cinq déplacements. Par exemple, il peut indiquer une commande pour tourner lorsque le fauteuil avance, et ainsi le fauteuil tourne et avance en même temps [18] [33].

- **Commandes basées sur l'analyse des signaux physiologiques**

Ces commandes sont basées sur l'acquisition et l'analyse des signaux physiologiques de type EOG (Electro-Oculogramme), EEG (Electro-Encelogramme) ou EMG (Electromyogramme). Tout d'abord, l'utilisation de capteur EOG (Electro-Oculogramme), mesurant une différence de potentiels électriques induits par la rotation oculaire, permet après traitement d'extraire l'endroit observé par l'utilisateur sur l'interface. Depuis, les contrôles des entrées dérivées des expressions de l'utilisateur sont généralement bruyants. Les systèmes qui utilisent les méthodes d'expression d'utilisateur nécessitent une intégration à partir des informations obtenues par la détection de l'environnement aussi [36].

## 1.8 Commande des fauteuils roulants électriques

Au cours des dernières recherches, la technologie a trouvé de nombreuses méthodologies pour commander divers types de robots mobiles, en particulier le fauteuil roulant électrique. Au cours de nos recherches, nous avons parcouru de nombreux projets qui ont été mis en œuvre par de nombreux chercheurs, et le résultat était différent, nous allons citer quelques-uns :

- **Contrôle de vitesse :** L'objectif de projet [37] c'est de contrôler la vitesse des roues gauche et droite pour suivre les commandes de vitesse souhaitées. Le résultat de la simulation montre que la vitesse du fauteuil roulant électrique utilisant ce système de contrôle suit le modèle de vitesse souhaité. Un autre projet [38] ils proposent une stratégie de contrôle PID flou auto-ajustable des paramètres en fonction de la déviation de la vitesse du fauteuil roulant. Il est prouvé que le système possède une bonne robustesse, un dépassement nul, un contrôle de vitesse en douceur, une perturbation anti-charge, etc, qui répondent aux exigences de contrôle du fauteuil roulant électrique.
- **Contrôle de mouvement :** les chercheurs de projet [39] présentent nouveau travail sur la trajectoire de conduite fluide pour fauteuil roulant électrique basé sur la courbe spline du troisième ordre et le joystick utilisé comme système d'aide à la mobilité pour les personnes handicapées. Certains résultats de simulations montrent l'efficacité du système de contrôle proposé. Une autre recherche de [40] vise à réaliser le contrôle du mouvement des fauteuils roulants électriques, ils sont proposés une nouvelle commande appliquée sur le déplacement des fauteuils roulants électriques basé sur la commutation du mode de conduite.

- **Contrôle des moyens de pilotage :** Les chercheurs (Y Oonishi et al) ont conçu un nouveau contrôleur de fauteuil roulant à assistance électrique. Les contrôleurs d'assistance électrique conventionnels se concentrent uniquement sur l'amplification de la force d'entrée humaine à l'aide d'un capteur de couple. Le contrôleur proposé n'utilise pas de capteur de couple mais un capteur d'électromyogramme (EMG) [41]. Un autre travail de (A goil et al) présente un algorithme de contrôle collaboratif d'un fauteuil roulant semi-autonome d'assistance. L'idée clé est d'apprendre la variance des tâches à partir des démonstrations et d'extraire les contraintes de commande utilisateur autorisées à partir de la variance et les premiers résultats sont montrés de bonnes performances [42]. On distingue, entre autres, le contrôle par une manette de commande (joystick), par souffle et aspiration pour les personnes ne pouvant manipuler un joystick classique, par commande vocale, ou par commande occipitale, par exemple la recherche dans [43].

## 1.9 Conclusion

Après toutes les développements scientifiques et technologiques concernant le fauteuil roulant électrique, il existe des projets qui sont toujours en cours de planification et d'études pour permettre aux personnes ayant des besoins spéciaux de répondre plus facilement aux exigences de leur vie.

Dans ce premier chapitre tout d'abord nous avons défini les robots mobiles en précisant les robots mobiles à roues. Ensuite, nous avons présenté un bref état de l'art des fauteuils roulants électrique en détaillant ses différents types et leur critère de choix. Après, nous avons discuté des types de moteurs qui peuvent être utilisés comme actionneur au fauteuil roulant et les moyens de pilotage.

Nous allons modéliser, dans le chapitre suivant, le fauteuil roulant électrique et le moteur synchrone à aimants permanents afin d'obtenir un modèle global.

# Chapitre 2

**Modélisation et commande linéaire  
du fauteuil roulant électrique**

## 2.1 Introduction

L'une des premières étapes dans l'étude des robots consiste à définir la classe du robot selon les différentes actions à mener, le type de robot, ainsi que les différents éléments qui le constituent. Une fois ceci fait, il sera possible de développer des algorithmes permettant de le commander.

Dans ce chapitre, nous allons présenter la modélisation cinématique et dynamique et la représentation d'état de fauteuil roulant électrique. Ensuite, nous allons faire la description et les avantages de moteur synchrone à aimants permanents et sa modélisation. Nous allons appliquer par la suite une commande linéaire sur le modèle simplifié du fauteuil roulant électrique afin de le maîtriser.

## 2.2 Modélisation cinématique du fauteuil roulant électrique

Considérons le robot mobile de type unicycle est présenté dans (figure 2.1). Par simplicité, le robot est représenté par sa projection sur un plan parallèle au sol. L'unicycle est équipé de deux roues actionnées indépendamment. Pour modéliser ce système nous considérons le point  $O_m$  situé au milieu de l'essieu des roues [4].

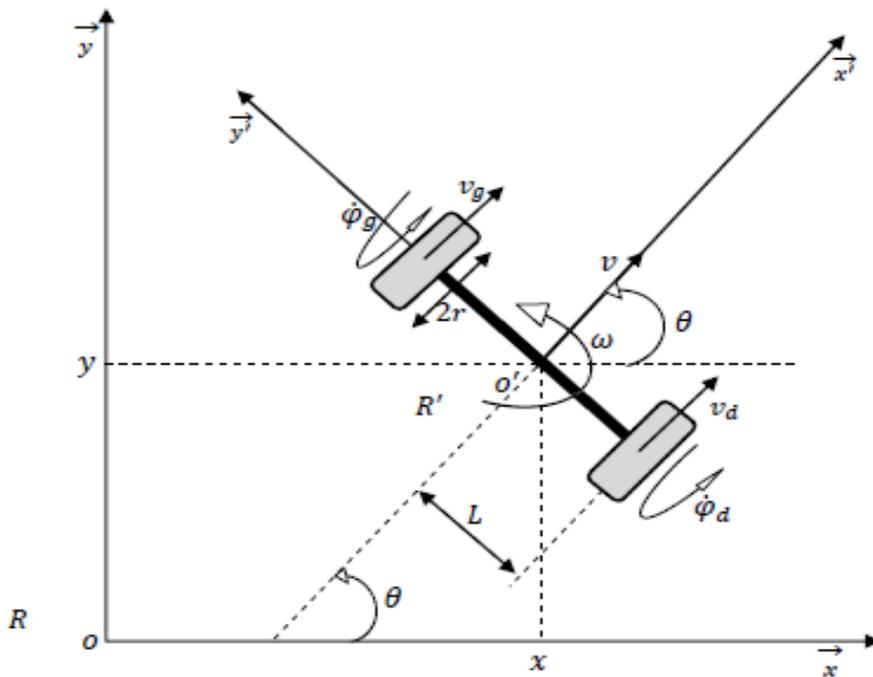


Figure 2.1 : Modèle cinématique du fauteuil roulant électrique

Dans la pratique, comme la valeur de l'angle  $\alpha_l$  ne présente pas d'intérêt majeur, on ne retient que le vecteur  $q = (x, y, \theta)^t \in Q = R^2 \times S^1$  pour caractériser la configuration du robot unicycle (fauteuil roulant électrique). Un modèle cinématique associée est donnée par :

$$\dot{q} = \bar{X}(q)v \Leftrightarrow \begin{cases} \dot{x} = v \cos \theta \\ \dot{y} = v \sin \theta \\ \dot{\theta} = w \end{cases}, \dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}, v = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix}, \bar{X}(q) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Avec :

$v_1 = v = \frac{R}{2}(\dot{\alpha}_r + \dot{\alpha}_l)$  c'est la vitesse longitudinale ou d'avancement du robot,

$v_2 = \theta = w = \frac{R}{2L}(\dot{\alpha}_r - \dot{\alpha}_l)$  c'est la vitesse de rotation autour de l'axe perpendiculaire au plan de roulement. La similarité de ce modèle avec le modèle de la roue [4], justifie l'appellation de robot de type unicycle.

### 2.3 Modélisation dynamique du fauteuil roulant électrique

Les équations du modèle dynamique qui décrivent le mouvement du robot sont données soit par la méthode d'Euler - Lagrange, soit par la méthode de Newton-Euler. Dans le but d'analyser le mouvement du FRE, nous procédons par la méthode Newtonienne établie dans [4]. Un repère fixe a été assigné comme il est illustré dans la figure suivante :

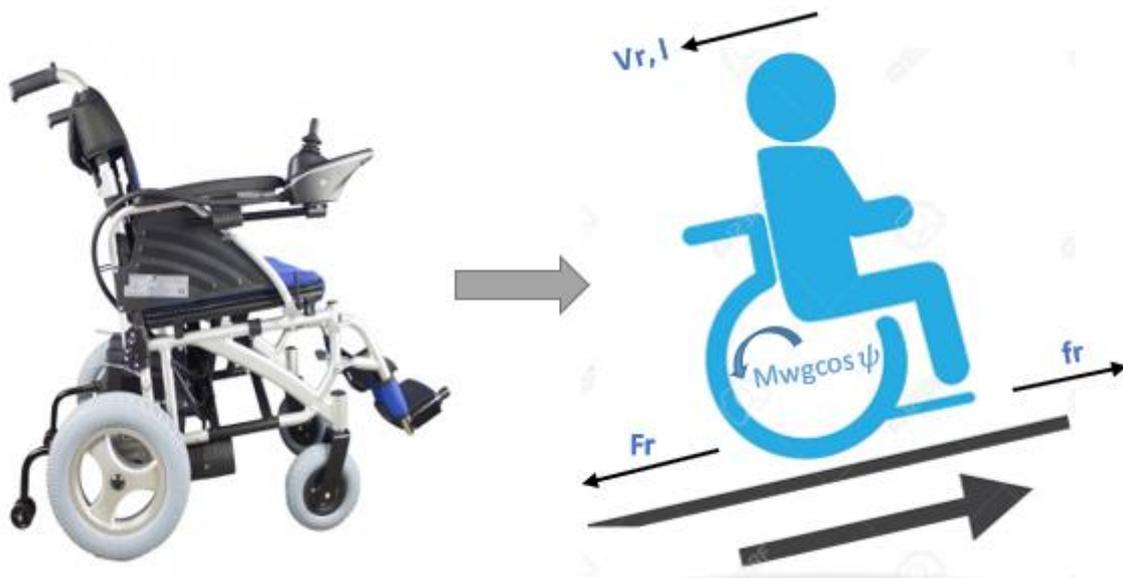


Figure 2.2 : Modèle dynamique du système de l'utilisateur de fauteuil roulant

Avec :

$V$  : est la vitesse Longitudinale du FRE

$\psi$ : étant l'angle de lacet

$\alpha_r$  et  $\alpha_l$  : sont les angles de rotation droite et gauche respectivement.

Supposons que le FRE est sur une pente dont l'angle  $\psi$ . On considère le sens positif de mouvement en allant du haut en bas. On suppose aussi qu'il n'y a pas de différences sur les paramètres physiques entre les deux moteurs ainsi que les roues d'entraînement.

On commence par établir les équations de mouvement des moteurs droite et gauche qui sont donnés par :

$$J_a \ddot{\alpha}_{mr} + C_a \dot{\alpha}_{mr} + C_r = c_r \quad (2.2)$$

$$J_a \ddot{\alpha}_{ml} + C_a \dot{\alpha}_{ml} + C_l = c_l \quad (2.3)$$

A partir de la deuxième loi de Newton  $\Sigma \vec{F} = m\dot{v}$ , on obtient la dynamique des deux roues droite et gauche comme suite pour un mouvement de translation :

$$m_w \dot{v}_r = m_w g \sin \psi + F_r - f_{rd} \quad (2.4)$$

$$m_w \dot{v}_l = m_w g \sin \psi + F_l - f_{ld} \quad (2.5)$$

Et en utilisant la deuxième loi de Newton  $\Sigma \text{moments} = J\ddot{\alpha}$ ; les équations du mouvement de rotation sont obtenues :

$$J_w \ddot{\alpha}_r + C_w \dot{\alpha}_r = C_{Fr} - RF_r \quad (2.6)$$

$$J_w \ddot{\alpha}_l + C_w \dot{\alpha}_l = C_{Fl} - RF_l \quad (2.7)$$

Les équations du mouvement du fauteuil roulant électrique avec l'opérateur pour un mouvement longitudinal et rotationnel peuvent être introduite de cette façon :

$$M\dot{v} = M g \sin \psi + f_{rd} + f_{ld} \quad (2.8)$$

$$J\dot{\omega} = \frac{L}{2}(-f_{rd} + f_{ld}) \quad (2.9)$$

Prenant les relations (2.10) (2.11) (2.12) pour introduire la dynamique du moteur dans la dynamique totale qui comporte les deux roues motrices ainsi que la masse totale, dont ils sont reliés par le ratio ou le paramètre de réduction noté par  $\sigma$  tel que :

- La relation entre l'accélération du moteur et des roues du fauteuil :

$$\begin{cases} \ddot{\alpha}_{mr} = \frac{1}{\sigma} \ddot{\alpha}_r \\ \ddot{\alpha}_{ml} = \frac{1}{\sigma} \ddot{\alpha}_l \end{cases} \quad (2.10)$$

- La relation entre la vitesse angulaire du moteur et des roues du fauteuil :

$$\begin{cases} \dot{\alpha}_{mr} = \frac{1}{\sigma} \dot{\alpha}_r \\ \dot{\alpha}_{ml} = \frac{1}{\sigma} \dot{\alpha}_l \end{cases} \quad (2.11)$$

- La relation entre les couples générés par les moteurs et les couples exercés sur les roues :

$$\begin{cases} C_r = \sigma C_{Fr} \\ C_l = \sigma C_{Fl} \end{cases} \quad (2.12)$$

Dans des conditions de roulement sans glissement, les vitesses longitudinale  $v$  et de rotation  $w$  du robot sont liées aux vitesses de rotation des roues motrices ( $\dot{\alpha}_r, \dot{\alpha}_l$ ) par les relations présentées par la suite :

- Pour la vitesse longitudinale  $v$  on a :

$$v = \frac{v_r + v_l}{2} \quad (2.13)$$

Avec  $v_r = R\dot{\alpha}_r$  et  $v_l = R\dot{\alpha}_l$  les vitesses des roues droite et gauche respectivement

L'équation (2.13) devient :

$$v = \frac{R}{2}(\dot{\alpha}_r + \dot{\alpha}_l) \quad (2.14)$$

Pour la vitesse de rotation de la roue du robot  $w$  :

$$w = -\frac{R}{L}(\dot{\alpha}_r - \dot{\alpha}_l) \quad (2.15)$$

Afin d'introduire la dynamique du moteur dans la dynamique totale qui comporte les deux roues motrices ainsi que la masse totale, dont ils sont reliés par le ratio, nous avons procédé aux équations (2.10) (2.11) (2.12) :

$$(2.2) \Leftrightarrow \frac{1}{\sigma}J_a\ddot{\alpha}_r + \frac{1}{\sigma}C_a\dot{\alpha}_r + \sigma C_{Fr} = c_r \quad (2.2')$$

$$(2.3) \Leftrightarrow \frac{1}{\sigma}J_a\ddot{\alpha}_l + \frac{1}{\sigma}C_a\dot{\alpha}_l + \sigma C_{Fl} = c_l \quad (2.3')$$

$$(2.4) + (2.5) \Leftrightarrow m_w(\dot{v}_r + \dot{v}_l) = 2m_w g \sin \psi + F_r + F_l - (f_{rd} + f_{ld}) \quad (2.16)$$

$$(2.16) + (2.8) \Leftrightarrow M\dot{v} + m_w(\dot{v}_r + \dot{v}_l) = (2m_w + M)g \sin \psi + F_r + F_l$$

$$\Leftrightarrow M\left(\frac{R}{2}(\ddot{\alpha}_r + \ddot{\alpha}_l)\right) + m_w R(\ddot{\alpha}_r + \ddot{\alpha}_l) = (2m_w + M)g \sin \psi + F_r + F_l$$

$$\Leftrightarrow \ddot{\alpha}_r R\left(\frac{M}{2} + m_w\right) + \ddot{\alpha}_l R\left(\frac{M}{2} + m_w\right) - (2m_w + M)g \sin \psi = F_r + F_l \quad (2.17)$$

$$(2.9) \Leftrightarrow J\left(-\frac{R}{L}(\ddot{\alpha}_r - \ddot{\alpha}_l)\right) = \frac{L}{2}(-f_{rd} + f_{ld})$$

$$\Leftrightarrow J\left(-\frac{2R}{L^2}(\ddot{\alpha}_r - \ddot{\alpha}_l)\right) = (-f_{rd} + f_{ld}) \quad (2.18)$$

$$(2.4) - (2.5) \text{ on tire } -f_{rd} + f_{ld}$$

$$\Leftrightarrow m_w(R\ddot{\alpha}_r - R\ddot{\alpha}_l) = F_r - F_l - f_{rd} + f_{ld}$$

$$\Leftrightarrow m_w(R\ddot{\alpha}_r - R\ddot{\alpha}_l) - F_r + F_l = -f_{rd} + f_{ld}$$

$$\Leftrightarrow J \left( -\frac{2R}{L^2} (\ddot{\alpha}_r - \ddot{\alpha}_l) \right) = m_w (R\ddot{\alpha}_r - R\ddot{\alpha}_l) - F_r + F_l$$

$$\Leftrightarrow J \left( -\frac{2R}{L^2} (\ddot{\alpha}_r - \ddot{\alpha}_l) \right) - m_w (R\ddot{\alpha}_r - R\ddot{\alpha}_l) = F_l - F_r \quad (2.19)$$

$$(2.17) - (2.19) \Leftrightarrow \ddot{\alpha}_r R \left( \frac{M}{2} + m_w \right) + \ddot{\alpha}_l R \left( \frac{M}{2} + m_w \right) - (2m_w + M)g \sin \psi - J \left( -\frac{2R}{L^2} (\ddot{\alpha}_r - \ddot{\alpha}_l) \right) - m_w (R\ddot{\alpha}_r - R\ddot{\alpha}_l) = 2F_r$$

$$\Leftrightarrow F_r = \ddot{\alpha}_r \left( \frac{M}{2} + 2m_w + J \frac{2}{L^2} \right) \frac{R}{2} + \ddot{\alpha}_l \left( \frac{M}{2} - J \frac{2}{L^2} \right) \frac{R}{2} - \frac{1}{2} (2m_w + M)g \sin \psi$$

$$(2.17) + (2.19) \Leftrightarrow \ddot{\alpha}_r R \left( \frac{M}{2} + m_w \right) + \ddot{\alpha}_l R \left( \frac{M}{2} + m_w \right) - (2m_w + M)g \sin \psi + J \left( -\frac{2R}{L^2} (\ddot{\alpha}_r - \ddot{\alpha}_l) \right) - m_w (R\ddot{\alpha}_r - R\ddot{\alpha}_l) = 2F_l$$

$$\Leftrightarrow F_l = \ddot{\alpha}_r \left( \frac{M}{2} - J \frac{2}{L^2} \right) \frac{R}{2} + \ddot{\alpha}_l \left( \frac{M}{2} + 2m_w + J \frac{2}{L^2} \right) \frac{R}{2} - \frac{1}{2} (2m_w + M)g \sin \psi$$

$$[(2.2') \text{ et } (2.3')] \Leftrightarrow \begin{cases} \frac{1}{\sigma} J_a \ddot{\alpha}_r + \frac{1}{\sigma} C_a \dot{\alpha}_r + \sigma [J_r \ddot{\alpha}_r + C_r \dot{\alpha}_r + R F_r] = c_r \\ \frac{1}{\sigma} J_a \ddot{\alpha}_l + \frac{1}{\sigma} C_a \dot{\alpha}_l + \sigma [U_r \ddot{\alpha}_l + C_r \dot{\alpha}_l + R F_l] = c_l \end{cases} \quad (2.20)$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \ddot{\alpha}_r \left( \frac{1}{\sigma} J_a + \sigma J_r \right) + \left( \frac{1}{\sigma} C_a + \sigma C_r \right) \dot{\alpha}_r + \sigma R F_r = c_r \\ \ddot{\alpha}_l \left( \frac{1}{\sigma} J_a + \sigma J_r \right) + \left( \frac{1}{\sigma} C_a + \sigma C_r \right) \dot{\alpha}_l + \sigma R F_l = c_l \end{cases} \quad (2.21)$$

Après différents calcul :

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \ddot{\alpha}_r \left( \frac{1}{\sigma} J_a + \sigma J_r \right) + \left( \frac{1}{\sigma} C_a + \sigma C_r \right) \dot{\alpha}_r + \sigma \left[ \ddot{\alpha}_r \left( \frac{M}{4} + m_w \right) R^2 + J \left( \frac{R}{L} \right)^2 \right. \\ \quad \left. + \ddot{\alpha}_l \left( \frac{M}{4} - J \left( \frac{1}{L^2} \right) \right) R^2 - \left( \frac{M}{2} + m_w \right) R g \sin \psi \right] = c_r \\ \ddot{\alpha}_l \left( \frac{1}{\sigma} J_a + \sigma J_r \right) + \left( \frac{1}{\sigma} C_a + \sigma C_r \right) \dot{\alpha}_l + \sigma \left[ \ddot{\alpha}_r \left( \frac{M}{4} + m_w \right) R^2 + J \left( \frac{R}{L} \right)^2 \right. \\ \quad \left. + \ddot{\alpha}_l \left( \frac{M}{4} - J \left( \frac{1}{L^2} \right) \right) R^2 - \left( \frac{M}{2} + m_w \right) R g \sin \psi \right] = c_l \end{cases} \quad (2.22)$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \ddot{\alpha}_r \left( \frac{1}{\sigma} J_a + \sigma \left\{ J_r + \left( \frac{M}{4} + m_w \right) R^2 + J \left( \frac{R}{L} \right)^2 \right\} \right) + \ddot{\alpha}_l \left( \sigma R^2 \left( \frac{M}{4} - \frac{J}{L^2} \right) \right) \\ \quad + \left( \frac{1}{\sigma} C_a + \sigma C_r \right) \dot{\alpha}_r = c_r + \sigma \left( \frac{M}{2} + m_w \right) R g \sin \psi \\ \ddot{\alpha}_l \left( \frac{1}{\sigma} J_a + \sigma \left\{ J_r + \left( \frac{M}{4} + m_w \right) R^2 + J \left( \frac{R}{L} \right)^2 \right\} \right) + \ddot{\alpha}_r \left( \sigma R^2 \left( \frac{M}{4} - \frac{J}{L^2} \right) \right) \\ \quad + \left( \frac{1}{\sigma} C_a + \sigma C_r \right) \dot{\alpha}_l = c_l + \sigma \left( \frac{M}{2} + m_w \right) R g \sin \psi \end{cases} \quad (2.23)$$

On obtient le modèle final de notre système écrit sous cette forme :

$$J_e \begin{bmatrix} \ddot{\alpha}_r \\ \ddot{\alpha}_l \end{bmatrix} + C_e \begin{bmatrix} \dot{\alpha}_r \\ \dot{\alpha}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_r \\ C_l \end{bmatrix} + T$$

Tels que:

$$J_e = \begin{bmatrix} a & b \\ b & a \end{bmatrix}, C_e = \begin{bmatrix} c & 0 \\ 0 & c \end{bmatrix}$$

Avec a,b,c sont définies comme suit :

$$\begin{aligned} a &= \frac{1}{\sigma} J_a + \sigma \left\{ J_w + \left( \frac{M}{4} + m_w \right) R^2 + \left( \frac{r}{L} \right)^2 J \right\} \\ b &= \sigma R^2 \left( \frac{M}{4} - \frac{1}{L^2} J \right) \\ c &= \frac{1}{\sigma} C_a + \sigma C_w \\ T &= \sigma \left( \frac{M}{2} + m_w \right) g R \sin \psi \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Le modèle du FRE s'écrit sous cette forme d'état :

$$\begin{bmatrix} a & b \\ b & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\alpha}_r \\ \ddot{\alpha}_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c & 0 \\ 0 & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\alpha}_r \\ \dot{\alpha}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_r + \frac{R}{a+b} \sigma \left( \frac{M}{2} + m_w \right) R g \sin \psi \\ c_l + \frac{R}{a+b} \sigma \left( \frac{M}{2} + m_w \right) R g \sin \psi \end{bmatrix}$$

$$y = \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R/2 & R/2 \\ -R/L & R/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\alpha}_r \\ \dot{\alpha}_l \end{bmatrix}$$

## 2.4 Représentation d'état du fauteuil roulant électrique :

Pour un système mécanique le choix du vecteur d'état dépend du degré de liberté. Si on a q degré de liberté on a 2q composantes du vecteur d'état (l'état et sa dérivée). Revenant à notre système qui contient deux degrés de liberté  $[\alpha_r, \alpha_l]$  mais les valeurs utilisées dans le modèle sont les déplacements  $S_{r,l}$  Tel que :  $\dot{S}_{r,l} = R \dot{\alpha}_{r,l}$ , [4]

Nous pouvons écrire notre modèle sous la forme matricielle :

$$\frac{1}{R} \begin{bmatrix} a & b \\ b & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{S}_r \\ \dot{S}_l \end{bmatrix} + \frac{1}{R} \begin{bmatrix} c & 0 \\ 0 & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{S}_r \\ \dot{S}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_r \\ C_l \end{bmatrix} + T \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Le FRE va être présenté sous la forme d'état linéaire multi variable suivante :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + B_v V \\ y = Cx + Du \end{cases}$$

Considérons la variable d'état, l'entrée de commande  $u$ , et celle de perturbation  $T$  défini par :

Ce qui conduit au modèle d'état suivant :

$$\begin{cases} \frac{a}{R}\ddot{S}_r + \frac{a}{R}\ddot{S}_l + \frac{c}{R}S_r = c_r + T \\ \frac{b}{R}\ddot{S}_r + \frac{a}{R}\ddot{S}_l + \frac{c}{R}S_l = c_l + T \end{cases}$$

D'où:

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= \frac{aR}{a^2 - b^2}c_r - \frac{bR}{a^2 - b^2}c_l + \frac{bc}{a^2 - b^2}x_4 - \frac{ac}{a^2 - b^2}x_2 + \frac{R}{a + b}T \\ \dot{x}_4 &= \frac{aR}{a^2 - b^2}c_r - \frac{bR}{a^2 - b^2}c_l - \frac{bc}{a^2 - b^2}x_4 + \frac{ac}{a^2 - b^2}x_2 + \frac{R}{a + b}T \end{aligned}$$

Sous la forme d'équation du 1<sup>er</sup> ordre, le modèle devient :

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{[x]} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & I_1 & 0 & I_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & I_3 & 0 & I_4 \end{bmatrix} [x] + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ y_1 & y_2 \\ 0 & 0 \\ y_3 & y_4 \end{bmatrix} [u] + \begin{bmatrix} 0 \\ R \\ \frac{R}{a + b} \\ 0 \\ R \\ R + b \\ \frac{R}{S_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [x] \end{aligned} \right.$$

Avec:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_4 = -ac/(a^2 - b^2) \\ I_2 &= I_3 = bc/(a^2 - b^2) \\ y_1 &= y_4 = aR/(a^2 - b^2) \\ y_2 &= y_3 = -bR/(a^2 - b^2) \end{aligned}$$

## 2.5 Description et modélisation de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP)

Pour se rapprocher du modèle réel, nous allons considérer le modèle d'un actionneur qui produit les couples d'entrée du système. En fonction d'avantages et inconvénients des moteurs électriques nous avons choisi d'utiliser la machine synchrone à aimants permanents dans la motorisation des deux roues arrière du fauteuil roulant électrique. Avant de donner la nouvelle modélisation du fauteuil roulant électrique avec actionneur, nous allons donner la modélisation de moteur synchrone à aimants permanents.

### 2.5.1 Description de la machine synchrone à aimants permanents

Les moteurs synchrones à aimants permanents se répandent de plus en plus comme actionneurs dans les industries automatisées où ils remplacent les moteurs à courant continu. Ils présentent sur

ces derniers l'avantage d'avoir de meilleures performances (en termes de couple massique, par exemple) et de ne pas avoir de collecteur mécanique (ce collecteur possède problèmes d'entretien et de comportement dans les environnements difficiles).

Pour le MSAP, la fonction de collecteur est réalisée par un ensemble électronique : un onduleur de puissance, une mesure de position et une commande des courants pour contrôler le couple.

La commande non linéaire présente l'avantage de pouvoir commander séparément les courants et le couple. Avec cette technique de commande, le modèle du moteur est décomposé en deux sous-systèmes linéaires. Chaque sous-système représente une boucle indépendante de commande d'une variable donnée (vitesse, couple, courant etc.). La dynamique du système linéarisé est choisie par une imposition-des pôles.

Le moteur synchrone à aimants permanents MSAP présente un stator assemblable au rotor de toutes les machines électriques triphasées. Le changement du bobinage rotorique par des aimants permanents apporte beaucoup de simplicité comme l'élimination des ballais (donc les pertes rotoriques). Cependant, le flux rotorique n'est plus commandable.

Le développement des matériaux magnétiques permet aux MSAP d'être de plus en plus utilisées dans différents domaines de l'industrie. La densité de puissance massique élevée, le rendement élevé, l'augmentation de la constante thermique et l'augmentation de la fiabilité (due à l'absence des contacts glissants bagues-ballais de ces machines) leurs permettent de concurrencer fortement les machines asynchrones et à courant continu [44].

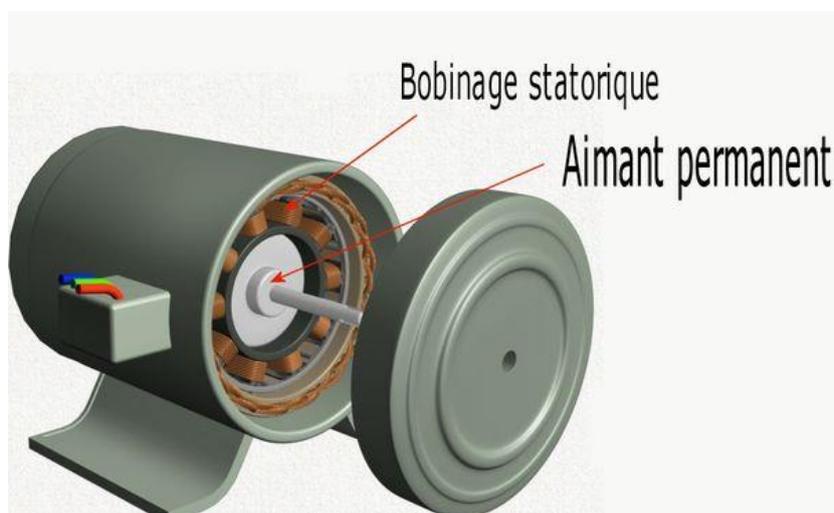


Figure 2.3 : Représentation de Msap

### 2.5.2 L'avantage des machines synchrones à aimants permanents

Lors de construction des machines synchrones à aimants permanents (MSAP) l'utilisation des aimants permanents à la place des bobinages d'excitation offre beaucoup d'avantage [44] :

- Commutateur mécanique remplacé par une autre électronique, Ce qui a pour effet de rendre le contrôle du moteur plus complexe et coûteux que celui d'un moteur à courant continu,
- Suppression de l'alimentation du rotor (absence du contact bagues balais).
- Moins des pertes de cuivre, les pertes viennent surtout du stator.

- Facteur de puissance et rendement du moteur est améliorées.
- Une faible inertie et un couple massique élevé.
- Une meilleure performance dynamique.
- Construction et maintenance plus simple.
- Pas d'échauffement au rotor, et absence des pertes joules.

### 2.5.3 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

La mise en équation de la machine synchrone avec les hypothèses classiques que nous avons retenues, nous ne mentionnerons que les points qui nous semblent essentiels et les choix qui sont propres par rapport à ce qui se fait habituellement.

#### Les hypothèses simplificatrices

Les modèles présentés pour la machine tiennent compte d'hypothèses présentées ci-dessous [4] :

- Caractéristique magnétique de la machine linéaire (circuit magnétique non saturé).
- La variation des résistances des enroulements en fonction de la température négligeable.
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer. Cela revient à considérer la variation sinusoïdale des inductances mutuelle entre les enroulements statoriques en fonction de l'angle de leurs axes magnétiques.
- La symétrie de la machine
- L'effet de peau est négligé.
- Les pertes fer sont négligées.
- Les effets des encoches ne sont pas pris en compte

La figure (2.4) donne la représentation des enroulements pour une machine synchrone triphasée à aimants permanents :

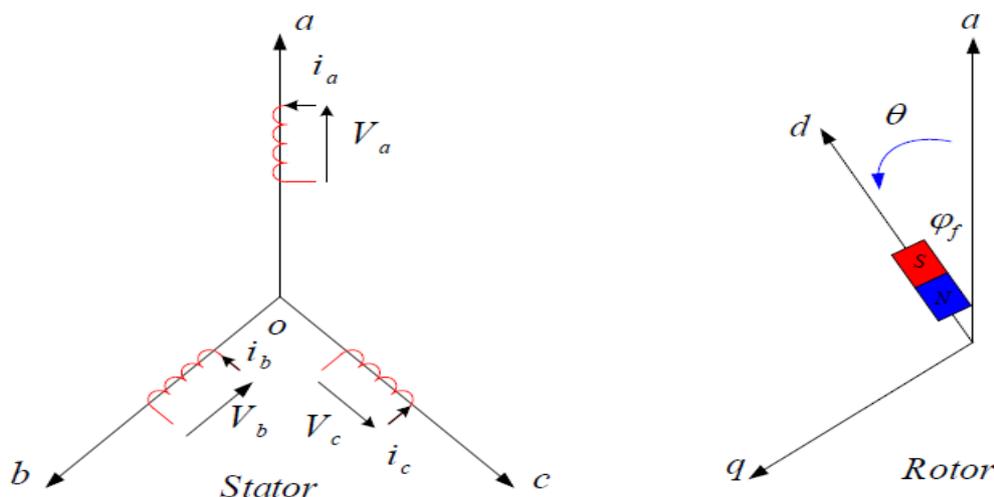


Figure 2.4 : les enroulements de la Msap

Le modèle mathématique de moteur synchrone à aimants permanents est similaire à celui de la machine synchrone classique. Dans le cadre des hypothèses simplificatrices et pour une machine équilibrée les équations de la machine s'écrivent comme suit [44] :

➤ **Équations électriques**

$$[V_{abc}] = [R_s] [I_{abc}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{abc}] \quad (2.24)$$

Où :

$R_s$  = La résistance des enroulements statorique.

$[V_{abc}] = [V_a V_b V_c]^T$  : Vecteur tensions statoriques.

$[I_{abc}] = [i_a i_b i_c]^T$  : Vecteur courants statoriques.

$[\varphi_{abc}] = [\varphi_a \varphi_b \varphi_c]^T$  : Vecteur flux statoriques.

➤ **Équations magnétiques**

$$[\varphi_{abc}] = [L_s] [i_{abc}] + [\varphi_{f. abc}] \quad (2.25)$$

Où :

$[\varphi_{f. abc}] = [\varphi_{af} \varphi_{bf} \varphi_{cf}]$ : Vecteur flux créé par l'aimant dans l'enroulement statoriques.

$[L_s]$  = Matrice d'inductances statoriques. Elle contient des termes constants que nous regroupons dans  $[L_{s0}]$  et des termes variables dépendant de  $\theta$ , que nous regroupons dans  $[L_{s1}(\theta)]$  :

$$[L_{ss}(\theta)] = [L_{ss0}] + [L_{ss1}(\theta)] \quad (2.26)$$

$$[L_{ss0}] = \begin{bmatrix} L_{s0} & M_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & L_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & M_{s0} & L_{s0} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$[L_{ss1}(\theta)] = L_{s1} \begin{bmatrix} \cos(2\theta) & \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(2\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(2\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(2\theta) \\ \cos\left(2\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos(2\theta) & \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Où :

$M_{s0}$ : Inductance mutuelle entre deux phases statoriques,

$L_{s0}$  : Inductance propre d'une phase statorique,

$\theta$ : caractérise la position angulaire du rotor par rapport au stator.

La dernière relation importante complétant le modèle de la MSAP, est l'équation fondamentale

de la mécanique décrivant la dynamique du rotor de la machine :

$$C_{em} = J \frac{d\Omega}{dt} + fr\Omega + Cr \quad (2.29)$$

Avec :

$J$  : Moment d'inertie de la partie tournante ;

$\Omega$ : Vitesse angulaire mécanique du rotor;

$C_{em}$ : Couple électromagnétique de la machine ;

$Cr$ : Couple résistant, ou de charge ;

$fr$ : Coefficient de frottement.

### ➤ Transformation de PARK (d, q)

Les équations obtenues dans le repère (a, b, c) sont fortement couplées. Elles sont fonctions de la position du rotor  $\theta$ . Ceci fait apparaître des difficultés pour la résolution du système. Pour simplifier ce problème, la plupart des travaux dans la littérature font appel à l'utilisation de la transformation de Park. Cette transformation, appliquée aux variables réelles (tensions, courants et flux), permet d'obtenir des variables fictives appelées les composantes d-q ou de Park. Ceci peut être interprété comme étant une substitution des enroulements des phases du système réel (a, b, c) en enroulements orthogonaux d'axes (d, q) tournant à une vitesse  $\Omega$  par rapport au stator. Ce changement de repère rend les équations dynamiques de la machine plus simples ce qui facilite leur étude et leur analyse.

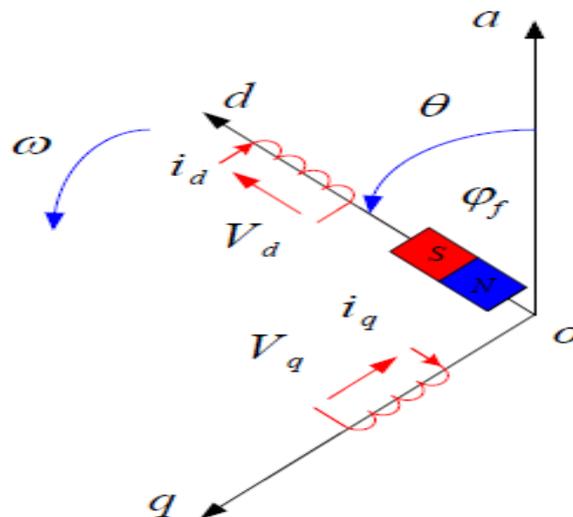


Figure 2.5 : Les enroulements a,b,c

La transformation de Park est définie comme suit :  $[X_{dq0}] = [P(\theta)] [X_{abc}] \quad (2.30)$

Où :

X peut-être un courant, une tension ou un flux et  $\theta$  représente la position du rotor. Les termes  $X_d$ ,  $X_q$  représentent les composantes longitudinale et transversale des variables statoriques (tensions, courants, flux et inductances).

La matrice de transformation  $[P(\theta)]$  est donnée par :

$$[P(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(2\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

Où  $\theta$  correspond à la position du repère choisi pour la transformation.

L'angle  $\theta$  est défini comme suit :

$$\theta(t) = \int_0^t \omega(t) dt$$

Tel que:

$\theta$ : Angle entre l'axe magnétique (a) et l'axe longitudinal (d).

$\Omega$ : vitesse de rotation du référentiel choisi.

Le changement de variables relatifs aux courants, tensions et flux est défini par la transformation dont la matrice inverse a pour forme :

$$[P(\theta)]^t = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{2} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{2} \\ \cos\left(2\theta + \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

### ➤ Application de la transformation de Park à la MSAP

En choisissant le référentiel de Park (d, q) lié au rotor et en appliquant la transformation (2.30) au système (2.24), on obtient :

$$[V_{dq}] = [P(\theta)] [V_{abc}] = [P(\theta)] [R_s] [i_{abc}] + [P(\theta)] \frac{d}{dt} [\varphi_{abc}] \quad (2.33)$$

On peut déduire les équations de Park sous une forme vectorielle comme suit :

$$[V_{dq}] = [R_s] [i_{dq}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{dq}] + p\Omega [\varphi^* dq] \quad (2.34)$$

Où :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

$$[\varphi^* dq] = \begin{bmatrix} -\varphi q \\ \varphi d \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

Alors, le modèle de la machine synchrone à aimants permanents après la transformation de Park est donné par :

$$\begin{bmatrix} Vq \\ Vd \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Rs + Ld S & -p\Omega Lq \\ p\Omega Ld & Rs + Lq S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Id \\ Iq \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ p\Omega \varphi f \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Avec :

$$\begin{bmatrix} \varphi d \\ \varphi q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ld & 0 \\ 0 & Lq \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Id \\ Iq \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varphi f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

## 2.6 Mise sous forme d'équation d'état

Considérons les tensions ( $Vd$ ,  $Vq$ ) comme grandeurs de commande, les courants statoriques ( $Id$ ,  $Iq$ ) comme variables d'état. A partir des équations (2.37) (2.38) ; On peut écrire le système d'équations comme suit :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} Id \\ Iq \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{Rs}{Ld} & \frac{Lq}{Ld} p\Omega \\ -\frac{Ld}{Lq} p\Omega & -\frac{Rs}{Ld} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Id \\ Iq \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{Ld} & 0 \\ 0 & \frac{1}{Ld} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Vq \\ Vd \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{p\Omega}{Lq} \end{bmatrix} [\varphi f]$$

$$J \frac{d\Omega}{dt} = Cem - Cr - f\Omega$$

$$Cem = \frac{3}{2} p [(Ld - Lq) Id Iq + \varphi f Iq]$$

## 2.7 Modèle du système global

Après avoir la modélisation de moteur synchrone à aimants permanents nous allons l'insérer dans notre modèle du fauteuil roulant électrique comme il est schématisé dans (la figure 2.6) :

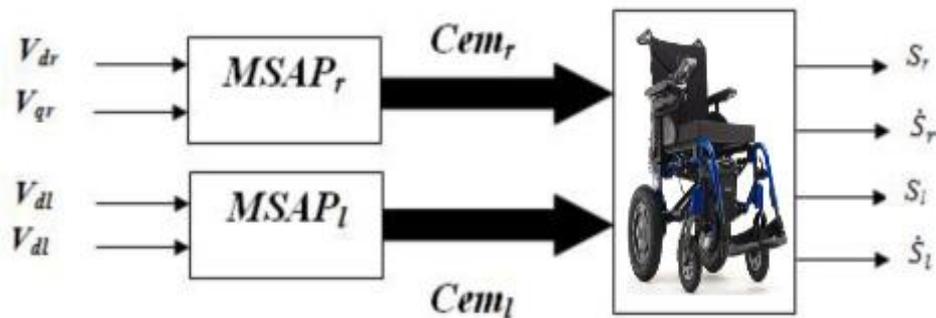


Figure 2.6 : Schéma synoptique du modèle globale (FRE+MSAP)

Notre modèle global non linéaire est écrit sous la forme suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = I_1 x_2 + I_2 x_4 + y_1 p [(L_{dr} - L_{qr})x_5 x_7 + \phi_f x_7] + y_2 p [(L_{dl} - L_{ql})x_6 x_8 + \phi_f x_8] + \frac{R}{a+b} T \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = I_3 x_2 + I_4 x_4 + y_3 p [(L_{dr} - L_{qr})x_5 x_7 + \phi_f x_7] + y_4 p [(L_{dl} - L_{ql})x_6 x_8 + \phi_f x_8] + \frac{R}{a+b} T \\ \dot{x}_5 = -p\Omega \frac{L_{dr}}{L_{qr}} x_7 - \frac{R_s}{L_{qr}} x_5 + \frac{1}{L_{qr}} V_{qr} - \frac{p\Omega}{L_{qr}} \phi_f \\ \dot{x}_6 = -p\Omega \frac{L_{dl}}{L_{ql}} x_8 - \frac{R_s}{L_{ql}} x_6 + \frac{1}{L_{ql}} V_{ql} - \frac{p\Omega}{L_{ql}} \phi_f \\ \dot{x}_7 = -\frac{R_s}{L_{dr}} x_7 + p\Omega \frac{L_{qr}}{L_{dr}} x_5 + \frac{1}{L_{dr}} V_{dr} \\ \dot{x}_8 = -\frac{R_s}{L_{dl}} x_8 + p\Omega \frac{L_{ql}}{L_{dl}} x_6 + \frac{1}{L_{dl}} V_{dl} \end{array} \right.$$

Avec:

$$x = [S_r \dot{S}_r S_l \dot{S}_l i_{qr} i_{ql} i_{dr} i_{dl}]^T, u = [V_{qr} V_{ql} V_{dr} V_{dl}]^T, V = T$$

D'où:

x : représente les variables d'état du système

u : représente les entrées de système

T : variable perturbation dépendant de l'effet de la pente de chemin de déplacement.

## 2.8 Régulateur proportionnel intégral dérivée (PID)

Le correcteur PID est un organe de contrôle permettant d'effectuer une régulation en boucle fermée d'un système industriel. Certainement la structure de commande la plus couramment utilisée dans l'industrie. Il s'est en effet imposé dans 90% des architectures de commande, dont la plupart ne sont constituées que des actions proportionnelles et intégrales. La prévalence de cette approche vient, au-delà de sa simplicité, des performances qu'elle offre aux systèmes pilotés, quel que soit leur domaine d'application.

Mathématiquement le régulateur PID est un algorithme qui délivre un signal de commande à partir de la différence entre la consigne et la mesure (l'erreur).

Le régulateur PID classique est constitué d'une action proportionnelle P, d'une action intégrale I et d'une action dérivée D. Les combinaisons possibles entre ces actions permettent de donner trois structures de la commande PID à savoir : la structure série, la structure parallèle et la structure mixte. Chacune des structures présente des avantages par rapport aux autres [45].

Le régulateur PID est caractérisé par la fonction de transfert suivante :

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot s$$

Avec :  $K_p$  ,  $K_i$  ,  $K_d$  sont les paramètres du contrôleur PID respectivement.

### 2.8.1 Principe de fonctionnement

Le signal de commande est donc la somme de termes : un terme proportionnel à l'erreur, un autre proportionnel à l'intégral de l'erreur et le dernier proportionnel à la dérivée de l'erreur. La partie proportionnelle est considérée comme action de commande basée sur le présent, et la partie intégrale basée sur le passé, et la dernière partie qui est la dérivée est basée sur le futur. On va voir le rôle de chaque action pour bien illustrer leur fonctionnalité [45]:

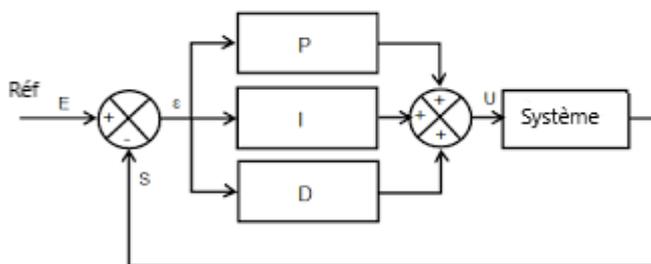


Figure 2.7 : Schéma bloc du correcteur PID

- **Action proportionnelle P**

La composante proportionnelle ne dépend que de la différence entre le point de consigne et la variable de processus (sortie). Cette différence est appelée terme d'erreur. Le gain proportionnel  $K_p$  détermine le rapport entre la réponse de sortie et le signal d'erreur. Par exemple, si le terme d'erreur a un 10, un gain proportionnel de 5 produirait une réponse proportionnelle de 50. En général, l'augmentation du gain proportionnel augmentera la vitesse de réponse du système de commande. Cependant, si le gain proportionnel est trop important, la variable de processus commencera à osciller. Si on augmente  $K_p$ , les oscillations deviendront plus grandes et le système deviendra instable et peut même osciller hors de contrôle.

- **Action Intégrale I**

La composante intégrale va intégrer le terme d'erreur en fonction du temps, pour avoir une erreur statique égale à zéro. Un phénomène appelé enroulement intégral (Wind up) résulte lorsque l'action intégrale sature le contrôleur qui conduira le signal d'erreur vers zéro.

- **Action dérivé D**

La composante dérivée entraîne une diminution de la sortie si la variable de processus augmente rapidement. La réponse dérivée est proportionnelle au taux de changement de la variable de processus. En augmentant le paramètre de gain dérivé  $K_d$ , le système de commande réagira plus fortement aux modifications du terme d'erreur et augmentera la vitesse de la réponse globale du

système de commande. La plupart des systèmes de contrôle utilisent un très faible gain dérivé ( $K_d$ ), car la réponse dérivée est très sensible au bruit dans le signal de variable de processus. Si le signal de retour du capteur est bruyant ou si le débit de la boucle de contrôle est trop lent, la réponse dérivée peut rendre le système de contrôle instable [46].

### 2.8.2 Principe de conception d'un régulateur PID

La bonne conception d'un régulateur repose sur les principes suivants :

- Spécifier les performances (stabilité, précision, rapidité) désirées pour le procédé.
- Connaître le modèle dynamique du procédé qui décrit la relation entre les variations de la commande et celles de la sortie.
- Choisir la structure et calculer un régulateur permettant d'atteindre les performances désirées pour le modèle du procédé considéré

### 2.8.3 Application du correcteur PID au modèle simplifié du fauteuil roulant électrique

Le régulateur PID est bien adapté à la plupart des processus de type industriel, il est relativement robuste par rapport aux variations des paramètres du procédé, pour cela dans le but de contrôler la position du fauteuil roulant électrique on a relié notre modèle simplifier avec un PID celons le schéma suivant :

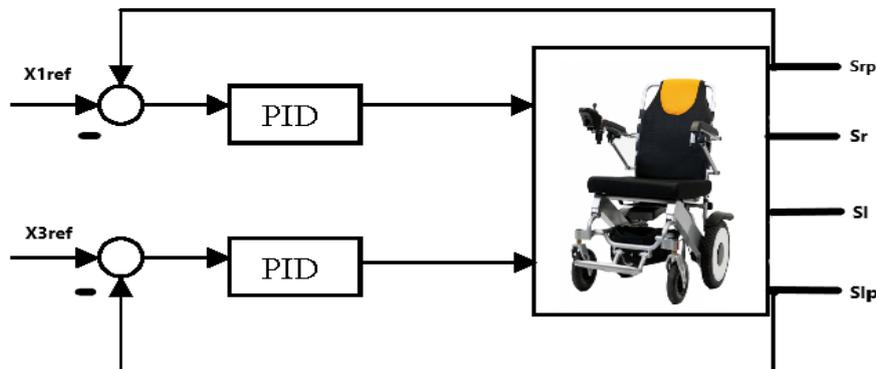


Figure 2.8 : Schéma de la commande de fauteuil roulant électrique avec PID

### 2.8.4 Résultats de simulation

Afin de tester la commande proposée pour le modèle linéaire réduit, nous avons simulé le système réglé, pour une référence de position  $x=2m$  :

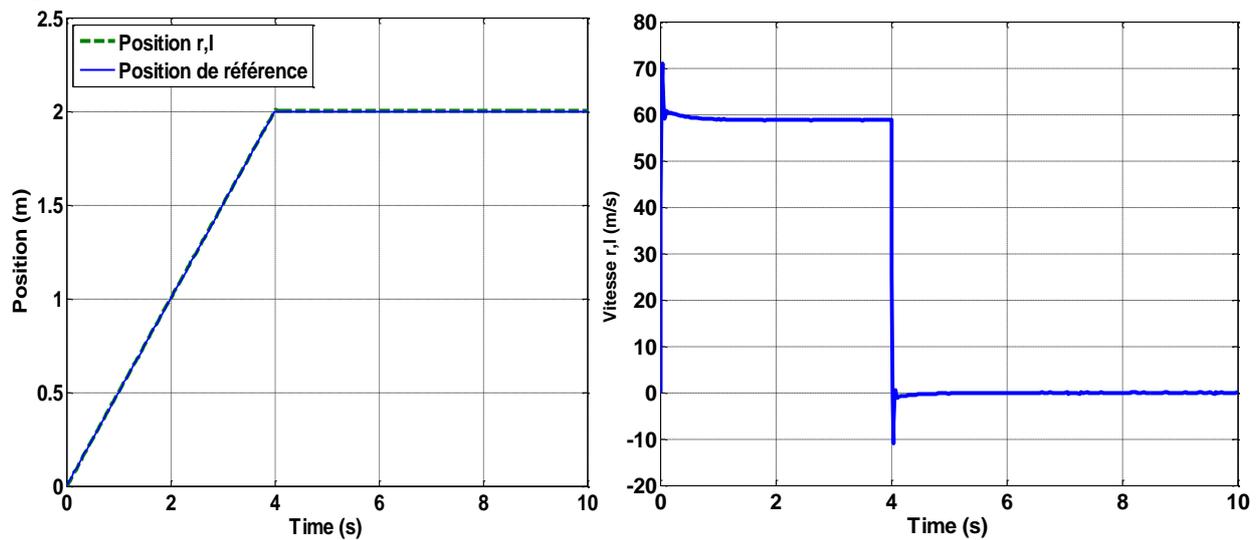


Figure 2.9 : Commande de position du système découplé à une entrée rampe

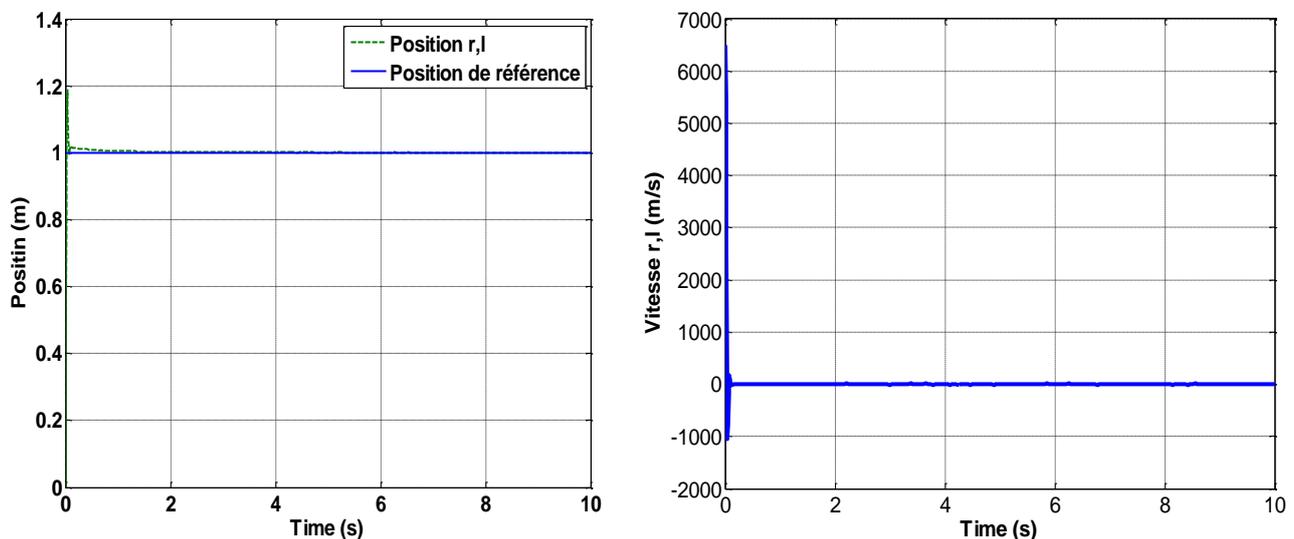


Figure 2.10 : Commande de position du système découplé à une entrée échelon

Les figures (2.9, 2.10) nous donnent les performances de la commande par PID avec le modèle simplifié de fauteuil roulant électrique pour le réglage de la position avec une entrée à une rampe et échelon respectivement.

- **Interprétation des résultats**

On remarque que :

- ✓ L'erreur statique est nul.
- ✓ Le temp de repense avec un entré échelon est très rapide par rapport un autre fauteuil dédié aux personnes d'aides à mobilités réduites.
- ✓ La raison d'utilisation l'entré rampe est indisponible pour avoir des résultats satisfaisants.

## 2.8 Conclusion :

La modélisation de ce système nous a permis de modéliser chaque partie et en plus nous a permis de comprendre plus le système avant l'application de la commande.

Dans ce deuxième chapitre nous avons présenté la modélisation cinématique et dynamique de fauteuil roulant électrique. Ensuite, nous avons présenté sa représentation d'état. Après, nous avons donné la description et la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents et on a cité quelques avantages de cet actionneur avant de mise sous forme les équations d'état du fauteuil roulant électrique avec l'actionneur. Enfin, nous avons défini la commande classique linéaire PID pour la commande de notre modèle simplifié et nous avons mis les résultats de la position et la vitesse avec deux références (rampe et échelon). Mais pour améliorer les performances de la commande de ce système et donc avoir de bons résultats, nous allons utiliser la commande non linéaire par backstepping sur le modèle simplifié et sur le modèle global dans le troisième chapitre.

# Chapitre 3

**La commande non linéaire par  
Backstepping**

### 3.1 Introduction

La commande Backstepping présente une alternative prometteuse aux méthodes de contrôle des systèmes non linéaires, elle combine le choix de la fonction de Lyapunov avec celui des lois de commande et d'adaptation. Ceci lui permet, en plus de la tâche pour laquelle le contrôleur est conçu (poursuite et/ou régulation), de garantir en tout temps, la stabilité globale du système compensé. Pour un système non linéaire ayant des paramètres non constants, les lois de commande classiques peuvent être insuffisantes et non robustes lorsque les exigences sur la précision et autres caractéristiques dynamiques du système sont exigées. La technique du Backstepping offre une méthode systématique pour répondre à ce type de problème. Elle combine la notion de fonction de contrôle de Lyapunov avec une procédure récursive de conception. Cela permet de surmonter l'obstacle de la dimension des systèmes d'ordre plus élevé et d'exploiter la souplesse de conception de leurs contrôleurs [47].

Dans ce chapitre nous présentons des définitions sur la méthode de Lyapunov et sur la commande par backstepping en citant un exemple. Ensuite, nous appliquons cette commande sur le modèle du fauteuil roulant électrique sans et avec l'actionneur. En dernier, nous présentons les résultats de la simulation pour le suivie de référence et le rejet de perturbation.

### 3.2 Méthode de Lyapunov

La commande des systèmes non linéaire s'appuie sur deux approches possibles. La première vise à linéaires le système à commander, afin de profiter des techniques consacrées aux systèmes linéaires. La deuxième approche consiste à trouver une fonction de commande de Lyapunov garantissant certaines performances pour le système en boucle fermée. De telles fonctions peuvent être très difficiles à trouver pour un système non linéaire d'ordre élevé. La technique du Backstepping permet de réduire avantageusement cette complexité. L'analyse de la stabilité dans le cadre de l'utilisation du Backstepping est basée sur la méthode de Lyapunov qui constitue un outil très puissant pour tester et trouver des conditions suffisantes à la stabilité des systèmes dynamiques, sans avoir à résoudre explicitement les équations différentielles les décrivant. « Stable, si son énergie mécanique totale, diminue avec le temps », Lyapunov a pu décrire une fonction similaire ayant les propriétés de l'énergie et pour laquelle l'analyse de stabilité devient plus simple [48].

#### 3.2.1 Première méthode de Lyapunov

Cette méthode permet d'analyser la stabilité, d'un système à partir de l'étude de la stabilité locale réalisation de la dynamique autour d'un point d'équilibre. Cette méthode est d'une importance limitée, car elle ne permet d'étudier que la stabilité locale et ne donne pas d'information sur le domaine de stabilité globale. De plus, dû aux commande Backstepping appliquée à la machine MSAP, il n'est pas possible de tenir compte de tous les types de phénomènes non linéaires [48].

### 3.2.2 Deuxième méthode de Lyapunov

Cette méthode est basée sur le concept d'énergie dans un système. Le principe de cette méthode consiste à analyser la stabilité du système, sans même résoudre les équations différentielles non linéaires qui le régissent. La stabilité dépend uniquement de l'étude des variations (signe de la dérivée) de l'énergie, ou d'une fonction qui lui est équivalente, le long de la trajectoire du système. L'étude de la stabilité d'un système caractérisé par un vecteur d'état  $X$ , consiste alors à chercher une fonction  $V(x)$  (représentative de l'énergie) de signe défini (généralement positive), dont la dérivée  $dv/dt$  est semi-définie et de signe opposé dans le même domaine [48].

## 3.3 Commande Backstepping

### 3.3.1 Principe

Depuis quelques années, beaucoup de progrès ont été faits dans le domaine de la commande des systèmes non linéaires. La technique du Backstepping fait partie de ces nouvelles percées dans ce domaine. Elle propose une méthode de synthèse systématique destinée à la classe des systèmes non linéaires ayant une forme triangulaire. Elle est basée sur la décomposition du système entier de commande, qui est généralement multi variable (MIMO) et d'ordre élevé en une cascade de sous-systèmes de commande du premier ordre. Pour chaque sous système, une loi de commande dite virtuelle est calculée. Cette dernière servira comme référence pour le sous-système suivant jusqu'à l'obtention de la loi de commande réelle pour le système complet. Par ailleurs, cette technique a l'avantage de conserver les non linéarités utiles pour la performance et la robustesse de la commande, contrairement aux méthodes de linéarisation. La détermination des lois de commande qui découle de cette approche est basée sur l'emploi des fonctions de Lyapunov de commande (CLF) [47].

### 3.3.2 Exemple sur la commande par Backstepping

Considérons le problème de système non linéaire sous la forme :

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= f_1(x_1) + g_0(x_1)x_2 \\ \dot{x}_2 &= f_2(x_1, x_2) + g_1(x_1, x_2)x_3 \\ &\vdots \\ \dot{x}_n &= f_n(x_1, \dots, x_n) + g_{n-1}(x_1, \dots, x_n)u\end{aligned}\tag{3.1}$$

Avec  $x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T \in R^n \ u \in R$

Afin d'illustrer la procédure récursive de la méthode Backstepping, on considère que la sortie du système  $y = x_1$  désire suivre le signal de référence  $y_x$ . Le système étant d'ordre  $n$ . la mise en oeuvre s'effectue en  $n$  étapes [48].

- **Etape 1**

On commence par la première équation du système (3.1), où  $x_2$  sera considérée comme une commande virtuelle intermédiaire. La première référence désirée est notée :

$$(x_1)_d = \alpha_0 = y_* \quad (3.2)$$

Ce qui conduit à l'erreur de régulation suivante :

$$e_1 = x_1 - \alpha_0 \quad (3.3)$$

Ainsi sa dérivée est :

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_1 - \dot{\alpha}_0 = f_1(x_1) + g_0(x_1)x_2 - \dot{\alpha}_0 \quad (3.4)$$

Pour un tel système, nous construisons d'abord la fonction de Lyapunov  $V_1$  sous une forme quadratique

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^2 \quad (3.5)$$

Sa dérivée temporelle est :

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 = e_1 [f_1(x_1) + g_0(x_1)x_2 - \dot{\alpha}_0] \quad (3.6)$$

Un choix judicieux de  $x_2$  rendrait  $\dot{V}_1$  négative et assurerait la stabilité pour la dynamique de (3.4).

Pour cela, prenons :  $x_2 = \alpha_1$  telle que :

$$f_1(x_1) + g_0(x_1)x_2 - \dot{\alpha}_0 = -k_1 e_1 \quad (3.7)$$

$k_1 > 0$  est une constante de conception.

Ainsi, la loi de commande pour le système (3.4) sera donnée par :

$$\alpha_1 = \frac{1}{g_0(x_1)} [-k_1 e_1 + \dot{\alpha}_0 - f_1(x_1)] \quad (3.8)$$

Ce qui implique

$$\dot{V}_1 = -k_1 e_1 \leq 0 \quad (3.9)$$

### • Etape 2

Maintenant, la nouvelle référence désirée sera la variable de commande pour le sous-système précédent (3.4) :

$$(x_2)_* = \alpha_1 \quad (3.10)$$

D'où l'erreur de régulation

$$e_2 = x_2 - \alpha_1 \quad (3.11)$$

Sa dérivée est :

$$\dot{e}_2 = \dot{x}_2 - \dot{\alpha}_1 = f_2(x_1, x_2) + g_1(x_1, x_2)x_3 - \dot{\alpha}_1 \quad (3.12)$$

Pour le système (3.12), la fonction de Lyapunov étendue est :

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}e_2^2 = \frac{1}{2}[e_1^2 + e_2^2] \quad (3.13)$$

Dont la dérivée est :

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + e_2 \dot{e}_2 \\ &= -k_1 e_1 + e_2 [f_2(x_1, x_2) + g_1(x_1, x_2)x_3 - \dot{\alpha}_1] \end{aligned} \quad (3.14)$$

Le choix de  $x_3$  qui stabilisera la dynamique du système (3.12), et rendra  $\dot{V}_2$  négative est :

$$x_3 = \alpha_2 \quad (3.15)$$

Telle que :

$$f_2(x_1, x_2) + g_1(x_1, x_2)x_3 - \dot{\alpha}_1 = -k_2 e_2 \quad (3.16)$$

$k_2 > 0$  est une constante de conception.

Ainsi, la loi de commande pour le système (3.12) sera donnée par :

$$\alpha_2 = \frac{1}{g_1(x_1, x_2)} [-k_2 e_2 + \dot{\alpha}_1 - f_2(x_1, x_2)] \quad (3.17)$$

Avec :

$$\alpha_1 = \frac{g_0(x_1)[-k_1 e_1 + \ddot{\alpha}_0 - \dot{f}_1(x_1)] - [-k_1 e_1 + \ddot{\alpha}_0 - f_1(x_1)]g_0(x_1)}{g_0^2(x_1)} \quad (3.18)$$

Un tel choix implique que :

$$\dot{V}_2 = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 \leq 0 \quad (3.19)$$

- **Etape n**

Maintenant, la nouvelle référence désirée sera la variable de commande pour le sous-système précédent :

$$(x_n)_* = \alpha_{n-1} \quad (3.20)$$

D'où l'erreur de régulation :

$$e_n = x_n - \alpha_{n-1} \quad (3.21)$$

Sa dérivée est :

$$\dot{e}_n = \dot{x}_n - \dot{\alpha}_{n-1} = f_n(x_1, \dots, x_n) + g_{n-1}(x_1, \dots, x_n)u - \dot{\alpha}_{n-1} \quad (3.22)$$

Pour le système (3.22), la fonction de Lyapunov étendue est :

$$V_n = V_1 + V_2 + \dots + \frac{1}{2}e_n^2 = \frac{1}{2}[e_1^2 + e_2^2 + \dots + e_n^2] \quad (3.23)$$

Dont la dérivée est :

$$\begin{aligned} \dot{V}_n &= \dot{V}_1 + \dot{V}_2 + \dots + e_n \dot{e}_n \\ &= -k_1 e_1 - k_2 e_2 + e_n [f_n(x_1, \dots, x_n) + g_{n-1}(x_1, \dots, x_n)u - \dot{\alpha}_{n-1}] \end{aligned} \quad (3.24)$$

Dans cette dernière étape, on est arrivé à déduire la loi de commande pour le système entier. Un bon choix doit satisfaire :

$$f_n(x_1, \dots, x_n) + g_{n-1}(x_1, \dots, x_n)u - \dot{\alpha}_{n-1} = -k_n e_n \quad (3.25)$$

$k_n > 0$  est une constante de conception.

Ainsi, la loi de commande pour le système sera donnée par :

$$u = \frac{1}{g_{n-1}(x_1, \dots, x_n)} [-k_n e_n + \dot{\alpha}_{n-1} - [f_n(x_1, \dots, x_n)]] \quad (3.26)$$

Ce qui garantit la négativité de la dérivée de la fonction de Lyapunov étendue :

$$\dot{V}_n = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - \dots - k_n e_n^2 \leq 0 \quad (3.27)$$

### 3.4 Application de la commande par Backstepping au FRE simplifié

Nous allons présenter les étapes de dimensionnement afin de contrôler la position des roues droite et gauche, nous définissons une variable erreur qui représente la différence entre la position mesurée et celle désirée ce qui va générer des commandes virtuelles que nous allons utiliser pour commander les vitesses de déplacement droite et gauche, en dernier, on obtient l'expression des commandes réelles les deux couples d'entrées [4]. On commence par la présentation du dimensionnement de la commande de position de la roue droite :

#### Etape 1 : Contrôle de la position de la roue droite

$$e_1 = x_1 - x_{1 \text{ ref}} \quad (3.28)$$

Considérons la fonction énergie candidate de Lyapunov suivante :

$$V(e_1) = (1/2)e_1^2 \quad (3.29)$$

La dérivée temporelle de cette fonction est de la forme :

$$\begin{aligned}\dot{V}(e_1) &= e_1 \dot{e}_1 \\ &= e_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_{1ref})\end{aligned}\quad (3.30)$$

En utilisant la première équation du modèle :

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (3.31)$$

La dérivée de la variable erreur  $e_1$  est donnée par :

$$\dot{e}_1 = x_2 - \dot{x}_{1ref} \quad (3.32)$$

Pour obtenir la dérivée négative, on considère  $x_2$  comme commande virtuelle telle que :

$$\begin{aligned}x_2 &= \varphi(e_1) \\ &= -C_1 e_1 + \dot{x}_{1ref}\end{aligned}\quad (3.33)$$

Donc :

$\dot{V}(e_1) = -C_1 e_1^2 < 0$  avec  $C_1$  est une constante définie positive.

Le théorème est vérifié, donc le premier sous système est asymptotiquement stable.

### Etape 2 : Contrôle de la vitesse de la roue droite

Pour le suivi de trajectoire de la roue droite, l'erreur de vitesse est définie comme suite :

$$e_2 = x_2 - x_{2ref} \quad (3.34)$$

Sachant que  $x_{2ref} = \varphi(e_1)$  comme commande virtuelle, déterminer à partir de l'étape 1

Augmentons l'ordre de la fonction d'énergie de Lyapunov

$$V(e_1, e_2) = (1/2)e_1^2 + (1/2)e_2^2 \quad (3.35)$$

Sa dérivée est sous cette forme :

$$\begin{aligned}\dot{V}(e_1, e_2) &= e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2 \\ \dot{e}_2 &= \dot{x}_2 - \dot{x}_{2ref} \\ &= l_1 x_2 + l_2 x_4 + T + y_1 c_r + y_2 c_l - \dot{x}_{2ref}\end{aligned}\quad (3.36)$$

$$\dot{e}_2 = \dot{x}_2 - \dot{x}_{2ref} \quad (3.37)$$

Cherchons l'expression de  $\dot{x}_{2ref}$  :

$$\text{On a : } x_{2ref} = -C_1 e_1 + \dot{x}_{1ref} \quad (3.38)$$

La dérivée est comme suite:

$$\begin{aligned}\dot{x}_{2ref} &= -C_1 \dot{e}_1 + \ddot{x}_{1ref} \\ &= -C_1 (x_2 - \dot{x}_{1ref}) + \ddot{x}_{1ref} \\ &= -C_1 (e_2 - x_{2ref} - \dot{x}_{1ref}) + \ddot{x}_{1ref}\end{aligned}\quad (3.39)$$

Remplaçant (3.39) dans l'équation (3.38) on obtient :

$$\dot{e}_2 = l_1 x_2 + l_2 x_4 + T + y_1 c_r + y_2 c_l + C_1 (e_2 + x_{2\text{ref}} - \dot{x}_{1\text{ref}}) - \dot{x}_{1\text{ref}} \quad (3.40)$$

L'expression des commandes réelles apparait explicitement :

$$y_1 c_r + y_2 c_l = -C_2 e_2 - l_1 x_2 - l_2 x_4 - T - C_1 (e_2 + x_{2\text{ref}} - \dot{x}_{1\text{ref}}) + \ddot{x}_{1\text{ref}} \quad (3.41)$$

Nous posons :

$$y_0 = -C_2 e_2 - l_1 x_2 - l_2 x_4 - T - C_1 (e_2 + x_{2\text{ref}} - \dot{x}_{1\text{ref}}) + \ddot{x}_{1\text{ref}} \quad (3.42)$$

Donne :

$$\dot{V}(e_1, e_2) = -C_1 e_1^2 - C_2 e_2^2 < 0 \text{ Avec } C_1, C_2 > 0$$

La stabilité du deuxième sous système est vérifiée.

Pour résoudre (3.41) avec deux inconnus, une autre équation est introduite pareillement aux deux étapes 1 et 2 respectivement.

On continue par la présentation du dimensionnement de la commande de position de la roue gauche :

### Etape 3 : Contrôle de la position de la roue gauche.

Une variable erreur qui représente la différence entre la position mesurée et celle désirée de la roue gauche est défini par :

$$e_3 = x_3 - x_{3\text{ref}} \quad (3.43)$$

La fonction de Lyapunov augmentée est donnée par :

$$V(e_1, e_2, e_3) = (1/2)e_1^2 + (1/2)e_2^2 + (1/2)e_3^2 \quad (3.44)$$

L'expression de sa dérivée est :

$$\begin{aligned} \dot{V}(e_1, e_2, e_3) &= e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2 + e_3 \dot{e}_3 \\ \dot{e}_3 &= \dot{x}_3 - \dot{x}_{3\text{ref}} \end{aligned} \quad (3.45)$$

D'après le modèle :

$$\dot{x}_3 = x_4 \quad (3.46)$$

La commande virtuelle est :  $x_4 = \varphi(e_3)$

$$= -C_3 e_3 + \dot{x}_{3ref} \quad (3.47)$$

D'où :  $\dot{V}(e_1, e_2, e_3) = -C_1 e_1^2 - C_2 e_2^2 - C_3 e_3^2 < 0$  Avec  $C_1, C_2, C_3$  positifs

Jusqu'à maintenant nous avons abouti la stabilité du 3<sup>ème</sup> sous système, mais il faut l'apparition de la commande réelle, la raison pour laquelle nous allons introduire une quatrième étape.

#### Etape 4 : Le contrôle de la vitesse de la roue gauche

Finalement, une quatrième variable erreur de poursuite en vitesse :

$$e_4 = x_4 - x_{4ref} \quad (3.48)$$

Sachant que  $x_{4ref} = \varphi(e_3)$  comme commande virtuelle de l'étape 3 va être une grandeur de référence pour cette étape.

La fonction énergie de Lyapunov augmentée est considérée comme suite :

$$V(e_1, e_2, e_3, e_4) = (1/2)e_1^2 + (1/2)e_2^2 + (1/2)e_3^2 + (1/2)e_4^2 \quad (3.49)$$

Sa dérivée est donnée par :

$$\begin{aligned} \dot{V}(e_1, e_2, e_3, e_4) &= e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2 + e_3 \dot{e}_3 + e_4 \dot{e}_4 \\ \dot{e}_4 &= \dot{x}_4 - \dot{x}_{4ref} \\ &= l_3 x_2 + l_4 x_4 + T + y_3 c_r + y_4 c_l - \dot{x}_{4ref} \end{aligned} \quad (3.50)$$

Avec :

$$\dot{x}_{4ref} = -C_3(x_4 - \dot{x}_{3ref}) + \ddot{x}_{3ref} \quad (3.51)$$

Enfin l'apparition des commandes réelles :

$$y_3 c_r + y_4 c_l = -C_4 e_4 - l_3 x_2 - l_4 x_4 - T - C_3(x_4 - \dot{x}_{3ref}) + \ddot{x}_{3ref} = y_5 \quad (3.52)$$

Finalement :

$$\dot{V}(e_1, e_2, e_3, e_4) = -C_1 e_1^2 - C_2 e_2^2 - C_3 e_3^2 - C_4 e_4^2 < 0 \text{ Avec } C_1, C_2, C_3, C_4 \text{ tous positifs}$$

Cette condition nous mène à garantir la stabilité globale de notre système.

Le système à deux inconnues est résumé comme suite :

$$\begin{cases} y_1 c_r + y_2 c_l = y_0 \\ y_3 c_r + y_4 c_l = y_5 \end{cases} \quad (3.53)$$

Les couples moteurs droite et gauche sont obtenus après la résolution des deux équations :

$$c_r = y_0/y_1 - (y_2/y_1)c_l \quad (3.54)$$

Et

$$c_l = (y_1 y_5 - y_3 y_0) / (y_4 y_1 - y_3 y_2) \tag{3.55}$$

- **Résultats de simulation:**

Pour valider le dimensionnement de la commande nous allons présenter des essais suivis de référence par simulation du modèle simplifié pour deux cas de pente.

- ✓ **Pour une pente de 0°**

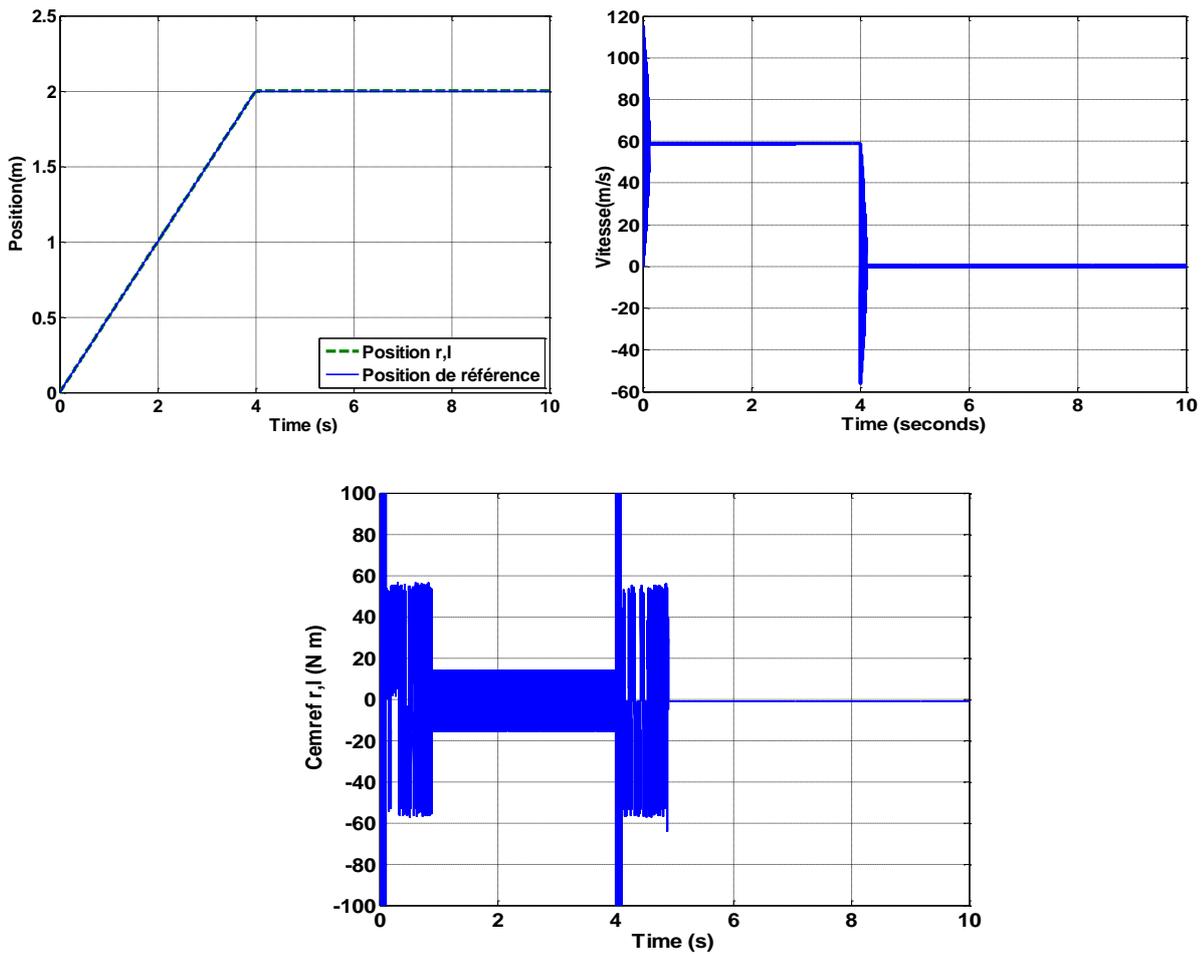


Figure 3.1 : résultat de simulation de modelé simplifié (pente  $\psi = 0^\circ$ )

- ✓ **Pour une pente de 10°**

Afin de tester la commande backstepping, nous avons simulé le système réglé, pour une référence de position  $x=2m$  :

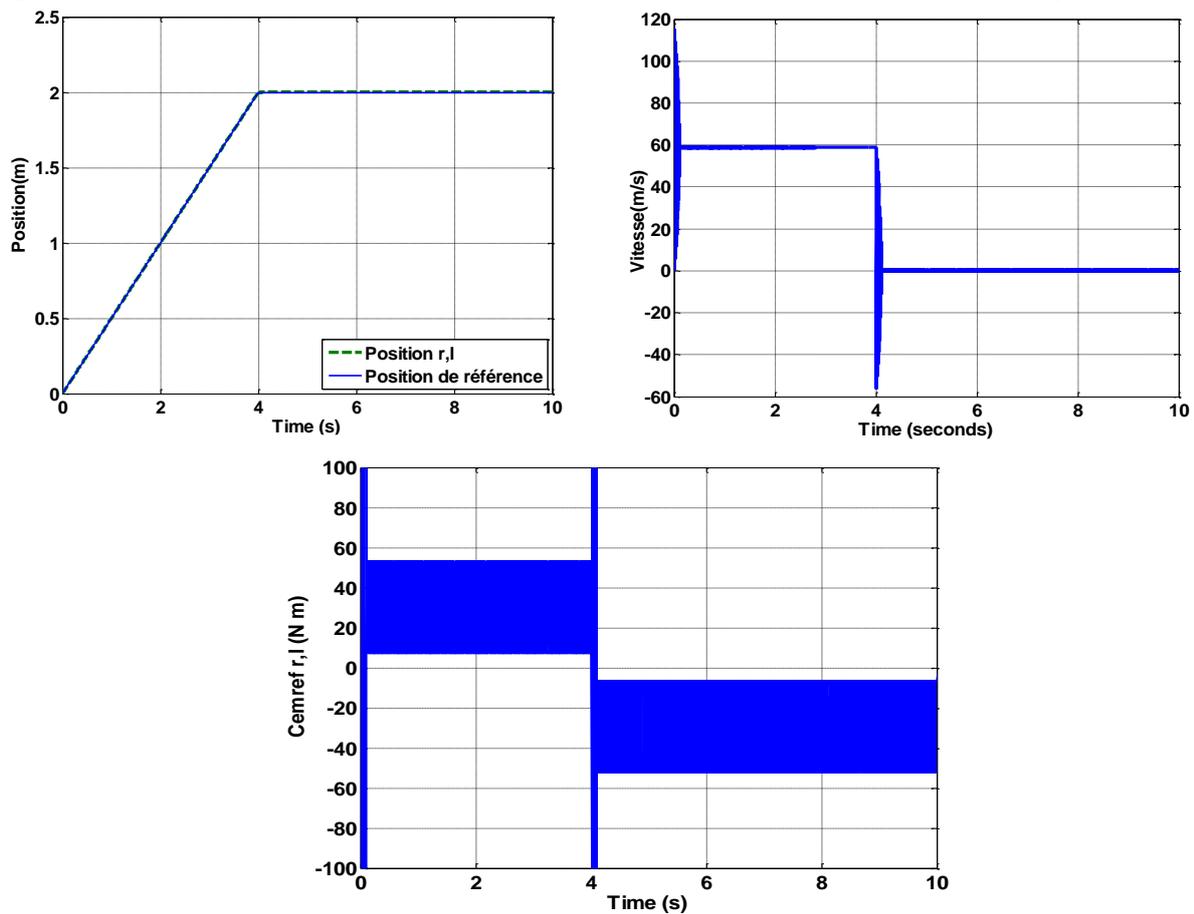


Figure 3.2 : résultat de simulation de modelé simplifié (pente  $\psi = 10^\circ$ )

### • Interprétation

Les deux figures (3.1, 3.2) nous donnent les performances de la commande backstepping avec le modèle simplifié de fauteuil roulant électrique pour le réglage de la position avec une entrée rampe.

- ✓ Les courbes de simulation permettent de visualiser poursuite de la référence l'entré rampe.
- ✓ Le couple prend une valeur positive dans le régime transitoire est une autre valeur négative pour le régime permanent.
- ✓ Le temp de repense est acceptable, ça veut dire il est adaptable avec le cas de malade.

En remarque que la position et la vitesse sont identique mais il y a un changement dans l'allure du couple. Si la pente est  $0^\circ$  le couple est nul, mais si la pente est égale à  $10^\circ$  le couple n'est pas nul.

### 3.5 Application de la commande par Backstepping au fauteuil roulant électrique avec MSAP

Après l'application de la commande backstepping sur notre modèle de fauteuil roulant électrique, nous allons calculer la commande backstepping du modèle global de fauteuil roulant électrique avec l'actionneur MSAP [4].

**Etape 1 : Contrôle de la position de la roue droite**

Définissons une variable d'erreur qui représente la différence entre la position mesurée et celle désirée.

$$e_1 = x_1 - x_{1\text{ref}} \quad (3.56)$$

Considérons la fonction énergie candidate de Lyapunov suivante :

$$V(e_1) = (1/2)e_1^2 \quad (3.57)$$

Sa dérivée temporelle est de la forme :

$$\dot{V}(e_1) = e_1 \dot{e}_1 = e_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_{1\text{ref}}) \quad (3.58)$$

$$\text{Selon notre modèle : } \dot{x}_1 = x_2 \quad (3.59)$$

La dérivée de la variable d'erreur  $e_1$  est donnée par :

Pour obtenir la dérivée négative, nous considérons  $x_2$  comme commande virtuelle telle que:

$$x_2 = \varphi(e_1) = -C_1 e_1 + \dot{x}_{1\text{ref}} \quad (3.60)$$

$$\dot{V}(e_1) = -C_1 e_1^2 < 0 \text{ Avec } C_1 > 0$$

Puisque le théorème est vérifié, le premier sous système est asymptotiquement stable.

**Etape 2 : Contrôle de la vitesse de la roue droite**

Pour le suivi de trajectoire de la roue droite, l'erreur de vitesse est définie comme suite :

$$e_2 = x_2 - x_{2\text{ref}} \quad (3.61)$$

Augmentons l'ordre de la fonction énergie de Lyapunov

$$V(e_1, e_2) = (1/2)e_1^2 + (1/2)e_2^2 \quad (3.62)$$

D'où sa dérivée est :

$$\dot{V}(e_1, e_2) = e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2 \quad (3.63)$$

Cherchons maintenant  $\dot{e}_2$

$$\dot{e}_2 = l_1 x_2 + l_2 x_4 + y_1 \text{Cem}_r + y_2 \text{Cem}_l + T - \dot{x}_{2\text{ref}} \quad (3.64)$$

$x_{2\text{ref}}$  est la commande virtuelle de l'étape précédente et qui est maintenant la grandeur de référence:

$$\begin{aligned} x_{2\text{ref}} &= -C_1 e_1 + \dot{x}_{1\text{ref}} \\ \dot{x}_{2\text{ref}} &= -C_1 \dot{e}_1 + \ddot{x}_{1\text{ref}} \end{aligned} \quad (3.65)$$

Après calcul nous obtenons :

$$\hat{e}_2 = l_1 x_2 + l_2 x_4 + y_1 C_{em_r} + y_2 C_{em_l} + T + C_1 (e_2 - x_{2\text{ref}}) \quad (3.66)$$

Les deux grandeurs  $C_{em_r}$  et  $C_{em_l}$  vont être choisis comme commandes virtuelles dont leur expression apparaît explicitement :

$$\text{Nous notons : } y_0 = -C_2 e_2 - l_1 x_2 - l_2 x_4 - T - C_3 (x_2 - \dot{x}_{1\text{ref}}) - \ddot{x}_{1\text{ref}} \quad (3.67)$$

$$\dot{V}(e_1, e_2) = -C_1 e_1^2 - C_2 e_2^2 < 0 \quad (3.68)$$

La stabilité du deuxième sous système est garantie.

Pour résoudre l'équation (3.67) avec deux inconnus, une autre équation est introduite pareillement des deux étapes 3 et 4 respectivement.

### Etape 3 : Contrôle de la position de la roue gauche

Une variable erreur qui représente la différence entre la position mesurée et celle désirée de la roue gauche :

$$e_3 = x_3 - x_{3\text{ref}} \quad (3.69)$$

Soit la fonction énergie de Lyapunov suivante :

$$V(e_1, e_2, e_3) = (1/2)e_1^2 + (1/2)e_2^2 + (1/2)e_3^2 \quad (3.70)$$

D'où :

$$e_3 \dot{e}_3 = e_3 (\dot{x}_3 - \dot{x}_{3\text{ref}}) \quad (3.71)$$

$$\text{Selon notre modèle : } \dot{x}_3 = x_4 \quad (3.72)$$

La commande virtuelle choisit est:

$$x_4 = \varphi(e_3) = -C_3 e_3 + \dot{x}_{3\text{ref}} \quad (3.73)$$

$$\dot{V}(e_1, e_2, e_3) = -C_1 e_1^2 - C_2 e_2^2 - C_3 e_3^2 < 0 \text{ Pour les coefficients } C_1, C_2, C_3 \text{ positifs}$$

Jusqu'à maintenant nous avons assuré la stabilité du troisième sous système, nous allons maintenant créer une nouvelle erreur entre la variable de commande virtuelle et sa valeur mesurée, noté  $e_4$ .

### Etape 4 : Contrôle de la vitesse de la roue gauche

La quatrième variable erreur est :

$$e_4 = x_4 - x_{4\text{ref}} \quad (3.74)$$

Nous augmentons l'ordre de la fonction de Lyapunov :

$$V(e_1, e_2, e_3, e_4) = (1/2)e_1^2 + (1/2)e_2^2 + (1/2)e_3^2 + (1/2)e_4^2 \quad (3.75)$$

Sa dérivée est :

$$\dot{V}(e_1, e_2, e_3, e_4) = e_1\dot{e}_1 + e_2\dot{e}_2 + e_3\dot{e}_3 + e_4\dot{e}_4 \quad (3.76)$$

Développement de  $\dot{e}_4$

$$\dot{e}_4 = l_3x_2 + l_4x_4 + y_3Cem_r + y_4Cem_l + T - \dot{x}_{4ref} \quad (3.77)$$

$x_{4ref}$  est la commande virtuelle de l'étape précédente et qui est maintenant la grandeur de référence. Les deux grandeurs  $Cem_r, Cem_l$  vont être choisies comme commandes virtuelles, dont leur expression est :

$$y_3 Cem_{rref} + y_4 Cem_{lref} = -C_4e_4 - l_3x_2 - l_4x_4 - T - C_3(x_4 - \dot{x}_{3ref}) - \ddot{x}_{3ref} \quad (3.78)$$

$$\text{Nous notons } y_5 = -C_4e_4 - l_3x_2 - l_4x_4 - T - C_3(x_4 - \dot{x}_{3ref}) - \ddot{x}_{3ref} \quad (3.79)$$

Le système à deux inconnues est résumé comme suite :

Après la résolution du système à deux inconnus, nous déterminons l'expression des deux commandes virtuelles définies par :

Ces deux commandes virtuelles ainsi obtenues vont être utilisées comme grandeurs de référence aux étapes 5 et 6 respectivement.

### Étape 5 : Contrôle du couple de la roue droite.

Pour cette étape nous choisissons  $e_5$  comme :

$$e_5 = Cem_r - Cem_{rref} \quad (3.80)$$

Soit la fonction énergie augmentée suivante :

$$V(e_1, e_2, e_3, e_4, e_5) = (1/2)e_1^2 + (1/2)e_2^2 + (1/2)e_3^2 + (1/2)e_4^2 + (1/2)e_5^2 \quad (3.81)$$

Sa dérivée est sous la forme :

$$\dot{V}(e_1, e_2, e_3, e_4, e_5) = e_1\dot{e}_1 + e_2\dot{e}_2 + e_3\dot{e}_3 + e_4\dot{e}_4 + e_5\dot{e}_5 \quad (3.82)$$

Développement de  $\dot{e}_5$  :

$$\dot{e}_5 = Cem'_r - Cem'_{rref} \quad (3.83)$$

Avec l'expression couple (pole lisse)

$$Cem_r = P\varphi_f I_{ql} \quad (3.84)$$

Remplaçant dans l'équation (3.83)

$$\dot{e}_5 = (P\varphi_f/L_q)[(V_{qr} - R_s I_{qr} - wL_d I_{qr} - w\varphi_f) - Cem_{rref}] \quad (3.85)$$

Pour stabiliser  $e_5$  à l'origine, il faut choisir  $V_{qr}$  de façon à ce que la dérivée de la fonction énergie soit négative.

D'où la commande réelle  $V_{qr}$ , est sous la forme :

$$V_{qr} = -C_5 e_5 + R_s I_{qr} + wL_d I_{dr} + w\varphi_f + (L_q/P\varphi_f)Cem_{rref} \quad (3.86)$$

Avec :

$$Cem_{rref} = (1/y_0)\dot{y}_0 - (y_2/y_1)Cem_{lref} \quad (3.87)$$

$$\text{Et } \dot{y}_0 = -[l_1(C_1 + C_2) + l_1^2 + l_2 l_3]x_2 - [l_2(C_1 + C_2) + l_1 l_2 + l_2 l_4]x_4 - [C_1 + C_2 + l_1 + l_2]T - [y_1(C_1 + C_2) + l_1 y_1 + l_2 y_3]Cem_r + [y_2(C_1 + C_2) + l_1 y_1 + l_2 y_4]Cem_l - C_1(C_1 + C_2)(e_2 + x_{2ref}) \quad (3.88)$$

### Etape 6 : Contrôle du couple de la roue gauche.

Cette étape consiste à introduire une dernière erreur  $e_6$  qui présente l'écart entre le couple mesuré et le couple de référence de la roue gauche:

$$e_6 = Cem_l - Cem_{lref} \quad (3.89)$$

Augmentons l'ordre de la fonction énergie :

$$V(e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6) = (1/2)e_1^2 + (1/2)e_2^2 + (1/2)e_3^2 + (1/2)e_4^2 + (1/2)e_5^2 + (1/2)e_6^2 \quad (3.90)$$

Sa dérivée est sous la forme :

$$\dot{V}(e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6) = e_1 e_1 + e_2 e_2 + e_3 \dot{e}_3 + e_4 \dot{e}_4 + e_5 \dot{e}_5 + e_6 \dot{e}_6 \quad (3.91)$$

Développement de  $e_6$  :

$$\dot{e}_6 = Cem_l' - Cem_{lref}' \quad (3.92)$$

Avec l'expression du couple

$$Cem_l = P\varphi_f I_{ql} \quad (3.93)$$

Remplaçant l'équation (3.92) dans (3.93)

$$\dot{e}_6 = (P\varphi_f/L_q)[(V_{ql} - R_s I_{ql} - wL_d I_{ql} - w\varphi_f) - Cem_{lref}] \quad (3.94)$$

D'où l'expression de la commande réelle qui assure la dérivée de la fonction énergie négative est :

$$V_{ql} = -C_6 e_6 + R_s I_{ql} + \omega L_d I_{dl} + \omega \varphi_f + (L_q / P \varphi_f) C_{em_{lref}} \quad (3.95)$$

$$\text{Avec } C_{em_{lref}} = (1/y_4 y_1 - y_3 y_2)(y_1 \dot{y}_5 - y_3 \dot{y}_0) \quad (3.96)$$

$$\text{Et : } \dot{y}_5 = [(C_1 + l_4 + C_3 + l_1)l_3]x_2 - [l_4(C_3 + C_4) + l_4^2 + l_3 l_2 + C_4 C_3]x_4 - [(C_4 + l_4 + C_3)y_3 + l_3 y_1] C_{em_r} - [l_3 y_2 + (l_4 + C_3 + C_4)y_4] C_{em_l} - [C_4 + C_3 + l_4 + l_3]T \quad (3.97)$$

$$\dot{V}(e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6) = -C_1 e_1^2 - C_2 e_2^2 - C_3 e_3^2 - C_4 e_4^2 - C_5 e_5^2 - C_6 e_6^2 < 0 \quad (3.98)$$

Nous pouvons dire que les commandes  $V_{qr}$  et  $V_{ql}$  assurent la convergence du couple  $C_{em_{r,l}}$  vers  $C_{em_{r,l ref}}$  et qui conduit à la convergence de  $x_{1,3}$  vers  $x_{1,3 ref}$ , avec la condition :  $\forall C_{1,2,3,4,5,6} > 0$

NB : Le choix des coefficients  $C_{1,2,3,4,5,6}$  améliorent les performances de la commande, à savoir (temps de réponse, dépassement...etc) et doivent être tous positifs.

### 3.6 Commande vectorielle

#### 3.6.1 Principe

D’après l’analyse le système d’équations de modèle de MSAP, nous pouvons relever que ce modèle est non linéaire, multi-variable et il est fortement couple. En effet, le couple électromagnétique d’épand aux courants  $I_d$  et  $I_q$ . [49]

L’objectif de la commande vectorielle de la MSAP est d’aboutir à un modèle équivalent à celui d’une machine à courant continu, c-à-d un modèle linéaire et d’couple, ce qui permet d’améliorer son comportement statique et dynamique [50].

Pour contrôler le couple, il faut contrôler les composantes  $I_d$  et  $I_q$ . Deux cas se présentent :

- ✓ à rotor lisse ( $L_d = L_q$ ) : Le couple ne dépend que de la composante en quadrature.
- ✓ Machines pôles saillants : Peut être fixée à une valeur qui correspond au couple maximal à courant maximal [49].

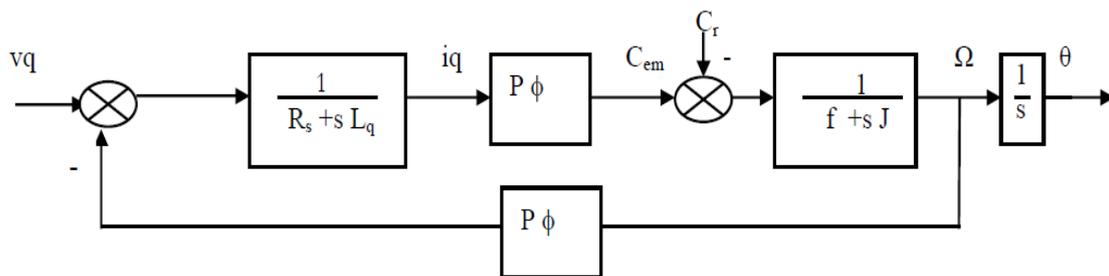


Figure 3.3 : Modèle de la Msap après découplage

### 3.6.2 Calcul de la commande vectorielle

L'objectif de cette partie est de forcer le courant  $I_d$  vers sa référence  $I_{dref}$ . La commande vectorielle impose une référence nulle. A ces calculs, nous définissons l'erreur du courant comme suite :

$$\begin{aligned} e &= I_d - I_{dref} \\ \dot{e} &= \dot{I}_d - \dot{I}_{dref} \end{aligned} \quad (3.99)$$

La fonction énergie candidate de Lyapunov :

$$V(e) = 1/2e^2 \quad (3.100)$$

Sa dérivée est de la forme :

$$\begin{aligned} \dot{V}(e) &= e\dot{e} \\ &= e(\dot{I}_d - \dot{I}_{dref}) \end{aligned} \quad (3.101)$$

Sachant que :

$$\begin{aligned} \dot{I}_d &= \frac{V_d - R_s I_d + \Omega p L_q I_q}{L_d} \\ \dot{e} &= \frac{1}{L_d} V_d + \frac{-R_s I_d + \Omega p L_q I_q}{L_d} - \dot{I}_{dref} \end{aligned} \quad (3.102)$$

D'où :

La commande réelle est choisi de sorte que la dérivée de la fonction énergie soit négative :

$$V_d = -L_d C e + R_s I_d - \Omega p L_q I_q + L_d \dot{I}_{dref} \quad (3.103)$$

### 3.6.2 Résultats de simulation du model global

- Pour une pente de  $\psi = 10^\circ$

Afin de tester la commande backstepping, nous avons simulé le système réglé, pour une référence de position  $x=2m$  :

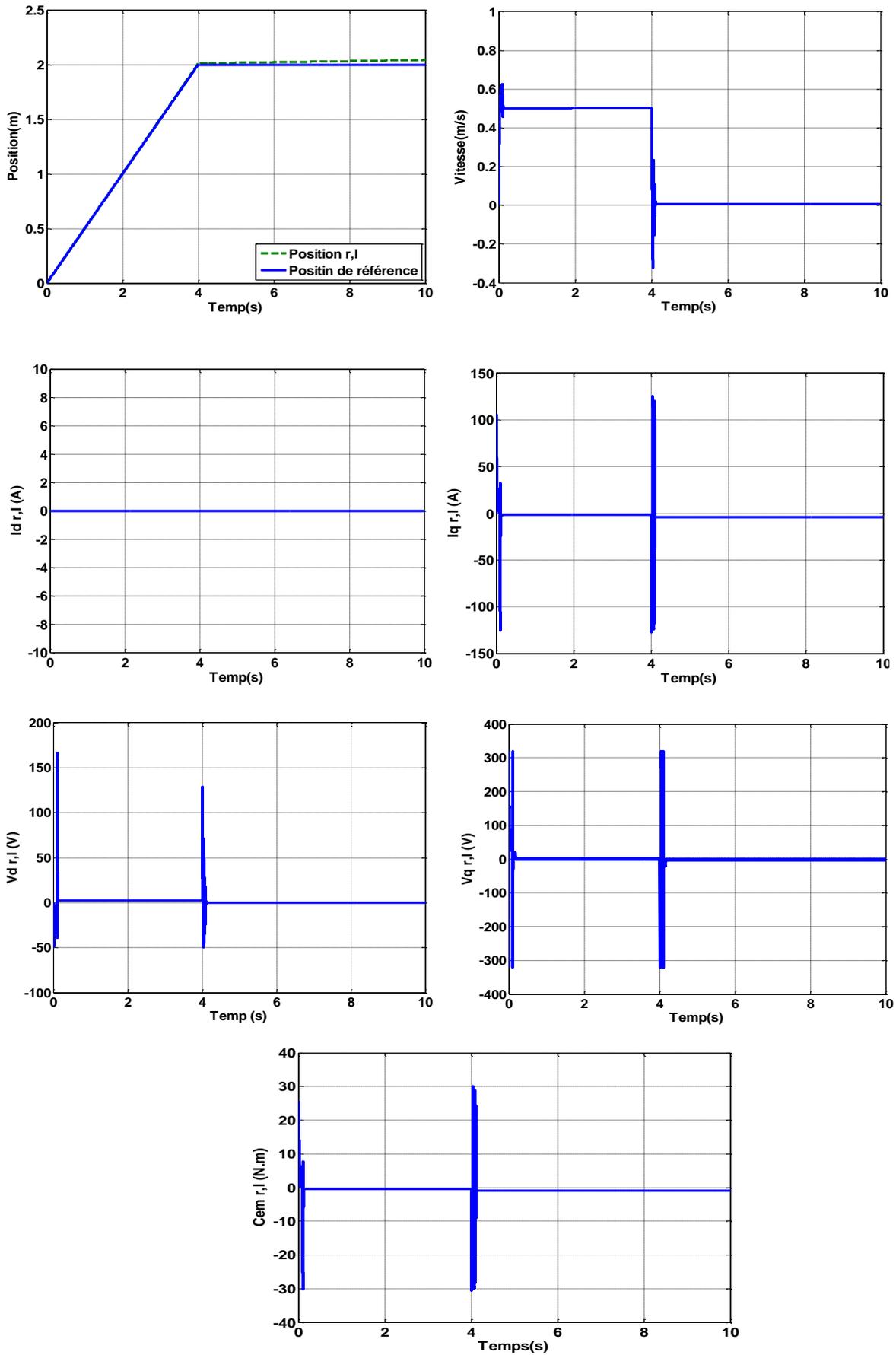


Figure 3.4 : Grandeurs électriques et mécaniques de modelé global (pente  $\psi = 10^\circ$ )

- **Interprétation**

Les figures (3.4) nous donnent les performances de la commande backstepping avec le modèle global de fauteuil roulant électrique pour le réglage de la position avec une entrée à un rampe.

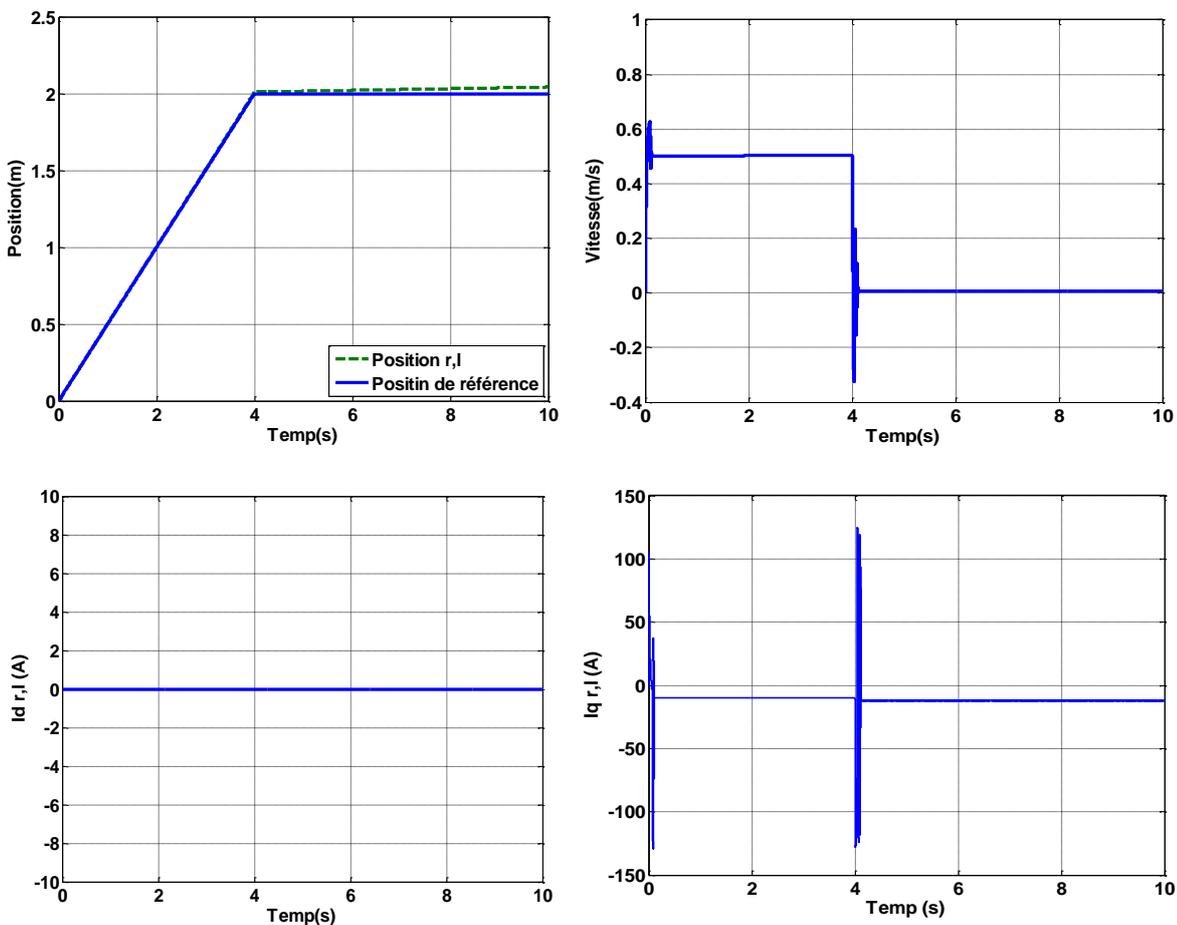
On remarque que :

- ✓ Les courbes de simulation permettent de bonne performance en poursuite la référence entré rampe.
- ✓ Il y a une légère remarque dans la position à cause de difficulté au choix des paramètres, et le courant  $I_d$  est nul.
- ✓ Le courant  $I_q$ , les tensions  $V_q$ ,  $V_d$  et le couple  $C_{em}$  représente un pic lorsque le passage de régime transitoire au régime permanent.

### 3.7 Etude robustesse

- **Pour une pente de  $\psi = 30^\circ$**

Afin de tester la commande backstepping, nous avons simulé le système réglé, pour une référence de position  $x=2m$  :



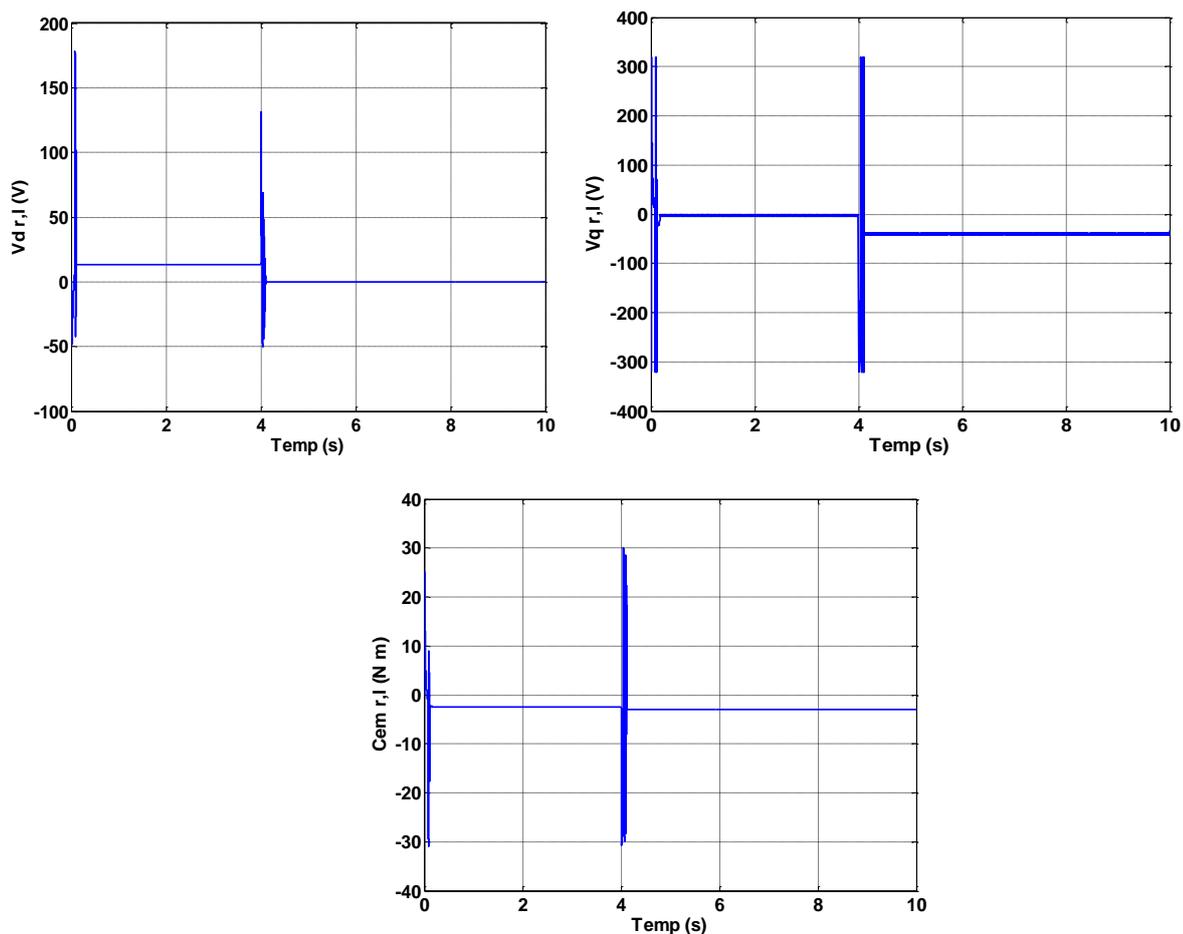
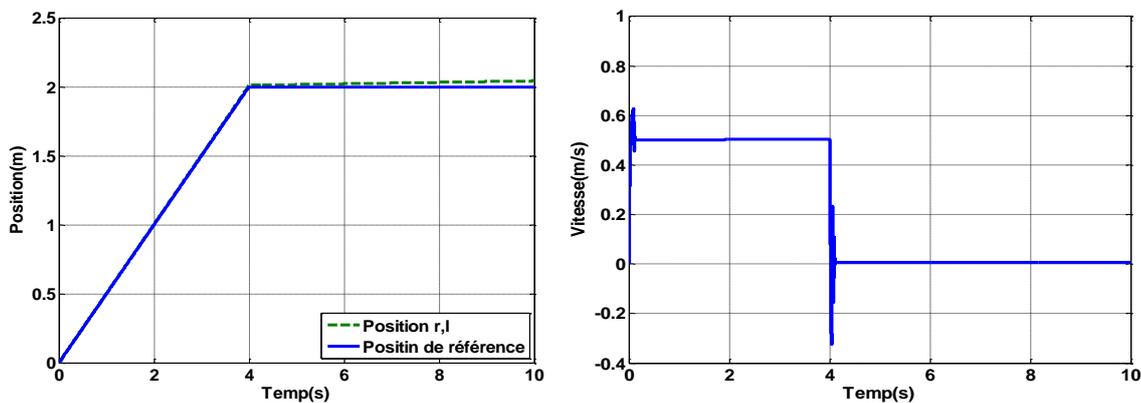


Figure 3.5 : Grandeurs électriques et mécaniques de modelé global (pente  $\psi = 30^\circ$ )

✓ Pour une pente de  $\psi = -10^\circ$



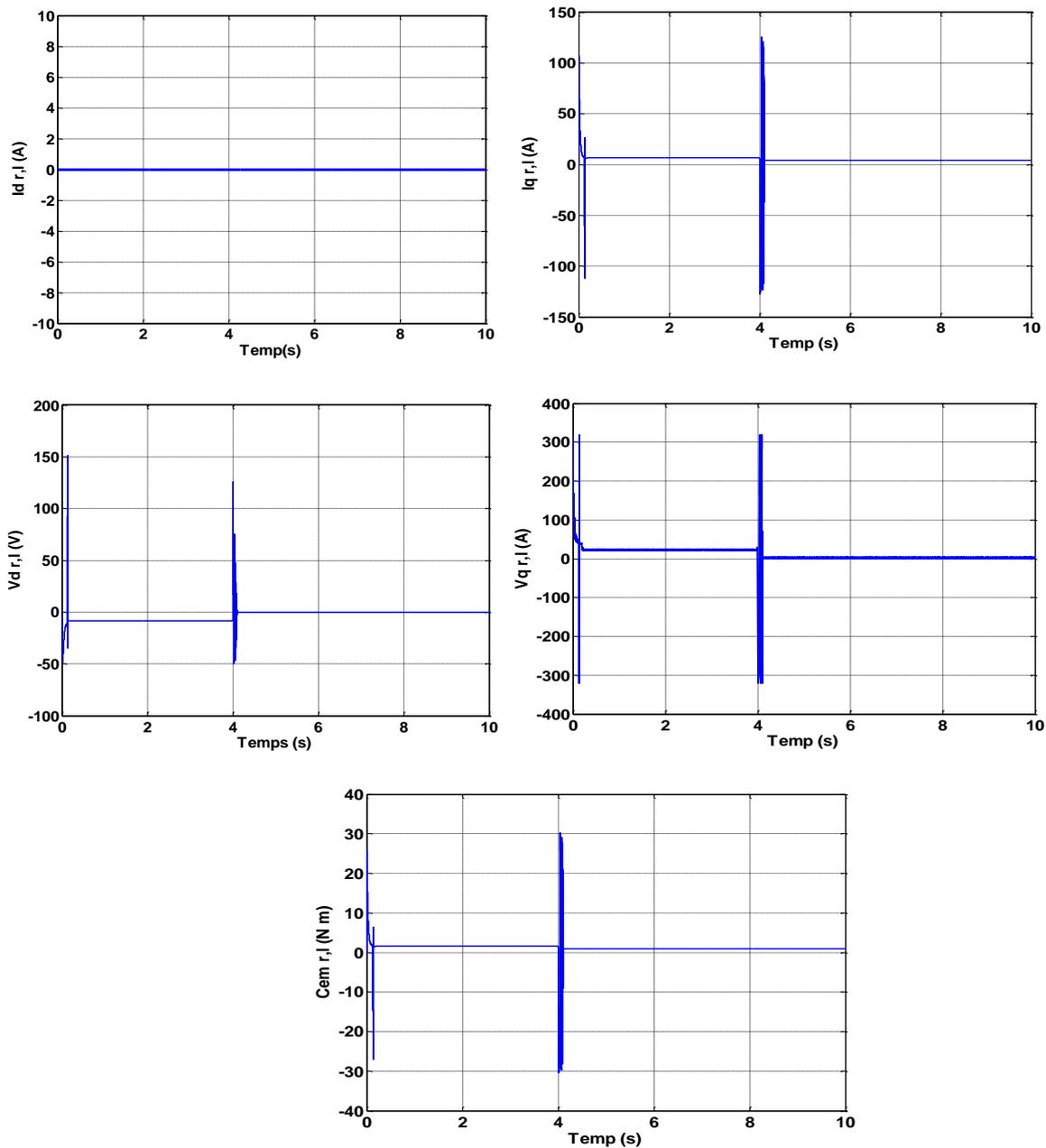


Figure 3.6 : Grandeurs électriques et mécaniques de modelé global (pente  $\psi = 30^\circ$ )

### Interprétation

Les figures (3.5, 3.6) présentent l'étude de la robustesse appliquée au model global du fauteuil roulant électrique correspond à une variation de la pente de chemin parcourue. En remarque que :

- ✓ La vitesse et la position et le courant  $I_d$  sont identique. Mais il y a un changement dans  $I_q$ ,  $V_q$ ,  $V_d$  et  $C_{em}$  à cause de la variation de la valeur de l'angle de la pente,
- ✓  $V_d$  dans le régime permanent et nul.
- ✓ Le couple ( $C_{em}$ ),  $I_{qr}$  et  $V_{qr}$  sont négative si la pente est positive.
- ✓ Les valeurs absolues sont élevées de couple,  $V_d$ ,  $V_q$  et  $I_q$  si la pente est croissante.

### **3.8 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté la définition de la stabilité au sens de Lyapunov, ainsi que la commande par Backstepping, qui est une méthode basée sur la méthode directe de Lyapunov.

Nous avons appliqué cette dernière sur le FRE. Cette commande est établie étape par étape tout en assurant la stabilité du moteur par un choix convenable de la fonction de Lyapunov.

D'après les résultats de simulation, on constate que la commande Backstepping du FRE est robuste vis-à-vis les perturbations externes. Elle donne des bons résultats au niveau du déplacement et le couple ainsi au niveau de vitesse.

## Conclusion générale

Le fauteuil roulant électrique est une technologie d'assistance essentielle à la mobilité pour les personnes souffrant d'une déficience motrice importante. Cependant il est nécessaire d'évaluer la conduite des utilisateurs afin de vérifier leurs aptitudes pour valider l'accès au fauteuil roulant électrique dans le cas d'une première prescription et pris en compte le mode de conduite et les principaux composants en fonction de l'état du patient, notamment le type d'actionneur choisit pour le fauteuil roulant et le mode de contrôle de sa rotation et les conséquences de son mouvement, de sa vitesse et de force électromotrice.

Afin d'élaborer cette étude nous avons commencé en première chapitre par présenter :

- Les définitions des robots mobiles en précisent les robots mobiles à roues.
- Un état de l'art des fauteuils roulants électrique en détaillant ses différents types et leur critère de choix.
- Les types de moteurs qui peuvent être utilisés comme actionneur au fauteuil roulant et les moyens de pilotage.

Le deuxième chapitre concerne la modélisation cinématique et dynamique du fauteuil roulant électrique et de moteur synchrone à aimants permanents et la représentation d'état de système.

Dans le troisième chapitre c'est le réglage du système simplifier et global en utilisant la commande non linéaire par Backstepping pour le contrôle de position qui est répartie en trois essais :

- La première consiste à étudier la poursuite de position de référence, en utilisant la commande classique PID pour le modèle simplifier de fauteuil roulant électrique.
- La deuxième c'est la commande backstepping appliqué au modèle simplifier.
- La dernière consiste à l'amélioration de la commande backstepping avec le modèle global par insertion de l'entrée rampe.

En conclusion, d'après les résultats obtenus on a constaté que :

- ✓ Le temps de réponse pour les différents types de commandes appliqué aux deux modèles simplifié et global, est satisfaisant et s'adapte mieux au FRE pour une entrée rampe.
- ✓ L'allure du courant  $I_d$  qui est nulle indique que la commande vectorielle est assurée.
- ✓ Le rejet de perturbation est efficace pour la variation du paramètre  $T$  via l'angle.

Notre travail, loin d'être achevé, pourra être prolongé dans plusieurs directions en particulier :

- ✓ Pour éviter le tâtonnement dans le choix des paramètres des commandes il est préférable d'utiliser les méthodes d'optimisation par exemple PSO (essaim des particules).
- ✓ Réalisation du FRE avec les nouveaux actionneurs.
- ✓ Réalisation du FRE avec les nouveaux moyens de pilotages.
- ✓ Renforcement des ateliers de maintenance des fauteuils roulants.

**Annexe A** : Paramètres de FRE

$J_a$	0.0024 $kg.m^2$
$C_a$	0.006 $Nm.s/rad$
$m_w$	2 $kg$
$J_r$	0.0289 $kg.m^2$
$C_r$	0.008 $Nm$
$R$	0.17 $m$
$M$	210 $kg$
$J$	16.08 $kg$
$L$	0.57 $m$
$\sigma$	0.033

**Annexe B** : Paramètres de la MSAP

$P_n$	400 $W$
$N_n$	750 $tr/min$
$I_n$	4 $A$
$L_d$	0.0064 $H$
$L_q$	0.0056 $H$
$R_s$	2.56 $\Omega$
$f$	0.00005 $Nm.s/rad$
$J_1$	0.0008 $kgm^2$
$p$	4
$f_n$	200 $Hz$
$\psi_m$	0.06 $Wb$

- [1] Bousif Fares, « Conception, réalisation et implémentation d'un robot mobile dans un environnement de travail », Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master en génie industriel, Université de Tlemcen, 2020.
- [2] Tafsut Tagnithammou « Solution de mobilité personnelle basée sur une stratégie de collaboration conducteur/Véhicule/Environnement » Thèse de doctorat de l'université Paris-Saclay en 2021.
- [3] Morère Yann « Analyse du système Homme-Machine en conduite de fauteuil roulant électrique », Thèse de doctorat, Université de Lorraine en 2021.
- [4] Boubekeur Djamilia « la commande d'un fauteuil roulant électrique », Thèse de doctorat. Université de Tlemcen 2016.
- [5] Ami, Khalil, Djenane, Mohamed Amine, et Megri, Abderrahim Fayçal « Pilotage automatique d'un robot mobile par l'intelligence artificielle » 2020.
- [6] Abdellaoui Zakarya et Benkhelifa Badreddine « Contrôle d'un robot mobile » Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de master en commandes des machines électriques à l'Université de Tlemcen 2016.
- [7] Youcef Mechalikh et Ali Miloudi « Développement d'algorithmes d'évitement d'obstacles statiques et dynamiques » PFE pour l'obtention du diplôme MASTER en automatique, Université Kasdi Merbah-Ouargla, 2012.
- [8] Filliat, David. « Robotique mobile », Thèse de doctorat, 2011.
- [9] <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Fauteuil-roulant.html>.
- [10] Dakhli et Farida « Développement d'une chaise roulante à base de moteurs brushless », Thèse de doctorat, 2011.
- [11] <http://www.wheelchair.ch/fra/info/histoire-handicap.html>.
- [12] Raid Ahmed « étude d'un Fauteuil Roulant Electrique Adapté par Panneau Solaire » Mémoire de master, Spécialité : système solaire photovoltaïque Université Mohamed Khider de Biskra 2020.
- [13] <https://www.ottobock.com/> Juvo Instructions d'utilisation.
- [14] Amazigh Demiche et Juba Djebbab « Planification automatique de trajectoire d'un fauteuil roulant intelligent », Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri 2018.
- [15] Brahim Khaoula « Analyse et modélisation : du pendule inversé sur deux roues au fauteuil roulant automatisé FreeMove » Rapport de Stage de Master, vol. 2.
- [16] Agostini, Yves. « Architecture coopérative pour la commande d'un fauteuil roulant robotisé », de doctorat. Université Paul Verlaine-Metz 1996.
- [17] Brahim Khaoula, Chemori Ahmed, et De Marigny, Christopher Desvaux « FreeMove: un fauteuil roulant automatisé de nouvelle génération ».

- [18] Kherbache Abdelkader & Madi Abdessamie « Modélisation et commande d'un fauteuil roulant électrique par signaux EMG » Master en Systèmes embarqués Ecole Nationale Supérieure de Technologie Alger 2021.
- [19] Bouzidi Mohamed & Wali Mohamed « Conception et réalisation d'une plate-forme de commande d'un fauteuil roulant électrique », projet fin d'étude, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax en 2012.
- [20] Pruski Alain et Guy Bourhis « Le projet VAHM véhicule autonome pour handicapé moteur : mobilité et stratégie, the VAHM Project (autonomous vehicle for the disabled): mobility and strategy ». *Innovation et technologie en biologie et médecine* 12 (6): 694–705 1991.
- [21] Agostini Yves « Architecture coopérative pour la commande d'un fauteuil roulant robotisé » Université Paul Verlaine Metz 1996.
- [22] Leishman Frédéric « Conception de fonctionnalités d'assistance robotisée à la mobilité sous contrainte d'acceptabilité et d'adaptabilité », Thèse de doctorat, Université de Lorraine en 2012.
- [23] Gharsa Oumaima « Fauteuil Roulant à Commande Oculaire pour Handicapés Physique » Spécialité : Automatique et informatique industriels 2020 Université Mohamed Khider Biskra.
- [24] Véronique Peron « Les figures de recours au fauteuil roulant entre normes, réglementations et logique d'usage » Master action sociale et de santé Université de Bretagne Occidentale 2010.
- [25] Todam Nguenpang, Nathalie « État des connaissances sur les fauteuils roulants motorisés intelligents (FRMIs) et recommandations pour la poursuite de leur développement » un examen de la portée 2021.
- [26] Leaman Jesse, Hung Manh La et Luan Van Nguyen « Development of a smart wheelchair for people with disabilities » 2016 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI), 279-284.
- [27] Leaman Jesse et Hung Manh La « A Comprehensive Review of Smart Wheelchairs: Past, Present, and Future » (2017) IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 47(4),
- [28] Schwesinger Dylan, Shariati Armon., Montella Corey & Spletzer John « A smart wheelchair ecosystem for autonomous navigation in urban environments ». *Autonomous Robots*, 41(3), 519-538.
- [29] Miyata Jun et al « Coordinate-Based Power-Assist Control of Electric Wheelchair for a Caregiver » 2017 IEEE Transactions on Industrial Electronics, 55(6), 2517-2524, 2008.
- [30] Chuy Oscar et al « Slip Mitigation Control for an Electric Powered Wheelchair » IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA), Hong Kong Convention and Exhibition Center. May 31 - June 7, 2014.
- [31] Dinale Aiko et al « Parameter design of disturbance observer for a robust control of two-wheeled Wheelchair System », *J Intell Robot*, DOI 10.1007/s10846-014-0142-6, 2015.

- [32] Heo Y et al « Orthopedics & rehabilitation engineering center incheon », Korea. IEEE 978-1-4673-5769-2/13/31.00, 2013
- [33] Leishman, Frédéric « Conception de fonctionnalités d'assistance robotisée à la mobilité sous contrainte d'acceptabilité et d'adaptabilité » Thèse de doctorat. Université de Lorraine 2012.
- [34] Gautam Gunda « Eye movement based electronic wheel chair for physically challenged persons ». Int J Sci Technol Res, 2014, 206–212.
- [35] Mazo Manual et al « Wheelchair for physically disabled People with voice, ultrasonic and infrared sensor control ». Autonomous robots 2, Septembre 1995, pp.203–224.
- [36] Robert Tang « A Semi-autonomous Wheelchair Navigation System » Une thèse soumise en partial fulfilment des exigences du Master of Engineering, Département de génie mécanique Université de Canterbury, (Février 2012).
- [37] Evan Clearesta et al « Adaptive control for velocity control of an electric wheelchair » 2013 third International Conference on Instrumentation Control and Automation (ICA), 2013, pp. 222-226, doi: 10.1109/ICA.2013.6734076.
- [38] Zhihong Tian et Wenhui Xu « Electric Wheelchair Controller Based on Parameter Self-Adjusting Fuzzy PID » 2009 International Conference on Computational Intelligence and Natural Computing, 2009, pp. 358-361, doi: 10.1109/CINC.2009.218.
- [39] Yoshimasa Teruya, Hirokazu Seki and Susumu Tadakuma, « Driving trajectory generation of electric powered wheelchair using spline curve » 2008 10th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, 2008, pp. 516-519, doi: 10.1109/AMC.2008.4516120.
- [40] Hirokazu Seki et al « Novel Step Climbing Control for Power Assisted Wheelchair Based on Driving Mode Switching » Iecon 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, 2006, pp. 3827-3832, doi: 10.1109/IECON.2006.347574.
- [41] Yumi Oonishi et al « New control method for power-assisted wheelchair based on upper extremity movement using surface myoelectric signal », 2008 10th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, 2008, pp. 498-503, doi: 10.1109/AMC.2008.4516117.
- [42] Aditya Goil et al « Using machine learning to blend human and robot controls for assisted wheelchair navigation », 2013 IEEE 13th International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR), 2013, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICORR.2013.6650454.
- [43] Guedira, Youssef, Farcy, René, et Bellik, Yacine. « Interface Tactile pour le Pilotage de Fauteuils Roulants Electriques ». In : actes de la 28ieme conférence francophone sur l'interaction Homme-Machine. 2016. p. 230-236.
- [44] Merabet, Fouad « Commande de la machine synchrone à aimants permanent par les techniques IRFOC et DTC », Thèse de doctorat. Université Mohamed Boudiaf-M'sila 2018.
- [45] Berkoune, Ali Abdessetar et Rabehi, Mohammed Rida. « Modélisation et commande en temps réel d'un pendule inversé rotatif : Approche linéaire », Thèse de doctorat en 2021.

[46] Nidhal Cherrat, Hamid Boubertakh, and Hichem Arioui. « An adaptive fuzzy pid control for a class of uncertain nonlinear underactuated systems ». In 2016 8th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC), pages 677–682. IEEE, 2016.

[47] Senhadji Nawel Chalabi Ammaria. « Commande de moteur synchrone à aimants permanents par backstepping », Mémoire de Master Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen 2015.

[48] Chetam Sara Hariz Bakkar Souad Lhiou Faiza « Commande Backstepping d'un Moteur asynchrone », Mémoire de Master, Université Echahid Hamma Lakhrad El-Oued 2019.

[49] Lahcene Bellahcene Mohamed Djaouani « Commande vectorielle en vitesse du moteur synchrone à aimants permanents dotée d'un observateur MRAS » Mémoire de master, Université de Tlemcen Faculté de Technologie Département de Génie Electrique et Electronique 2016/2017.

[50] Attou Amine « Commande par mode glissant de la machine synchrone à aimants permanents » Université Djillali Liabes de Sidibel-Abbes 2011.