

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF-1-
UFAS (ALGERIE)

MEMOIRE

Présenté à la faculté de Technologie
Département d'Electronique

Pour l'obtention du Diplôme de

MAGISTER

Option : Contrôle

Par

M. BOUTALBI OUSSAMA

Thème

*Commande par mode glissant du second ordre d'un
portique à trois dimensions*

Soutenue le : 17/12/2014

devant la commission d'examen :

M : A. Khellaf

Prof. à l'Université de Sétif-1-

Président

M : M. Harmas

Prof. à l'Université de Sétif-1-

Examineur

M : A. Hassam

MC. à l'Université de Sétif-1-

Examineur

M : K. Benmahammed

Prof. à l'Université de Sétif-1-

Directeur du Mémoire

Dédicaces

Je rends mes profondes gratitude à ALLAH qui m'a aidé à réaliser ce modeste travail.

J'exprime mes profondes gratitude à mes parents pour leurs encouragements, leurs soutiens et pour les sacrifices qu'ils ont enduré.

Je dédie ce modeste travail à mon frère et mes sœurs.

*Je remercie mon encadreur **Pr. K. Benmahammed** pour les efforts qu'il a déployés, pour m'aider, conseiller, encourager et diriger.*

Je remercie aussi tout le corps enseignant et administratif qui a contribué à ma formation universitaire.

Sans oublier toute ma famille et mes amis.

O. BOUTALBI

Remerciements

Je remercie Allah, le tout puissant, le miséricordieux, de m'avoir appris ce que j'ignorais, de m'avoir donné la santé et tout dont je nécessitais pour l'accomplissement de ce mémoire.

Je remercie, en deuxième position, ma chère mère et mon chère père et mes sœurs et frères, sans lesquelles je n'aurai jamais pu arriver à terme dans la rédaction, et qui m'ont toujours entouré d'affection et de soutien dans les moments pénibles comme dans les moments de joie.

Je remercie également, le directeur de mémoire le Prof. KHEIR BENMAHAMMED pour son encadrement, ses directives et sa disponibilité. Aussi, je le remercie pour ses encouragements, son indulgence, et sa sympathie tout au long de la réalisation du présent travail au sein de Laboratoire des systèmes intelligents.

En outre, je remercie le prof A. Khellaf président du jury le, qui a accepté de présider l'honorable jury, malgré ses nombreuses occupations.

Egalement, je remercie les autres membres du jury le Prof M. Harmas et le MC A. Hassam pour la pertinence de leurs remarques avisées, qui vont permettre l'amélioration de la qualité du manuscrit et l'essor vers de nouvelles perspectives.

Je remercie aussi, tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à ma formation du primaire à la poste graduation.

Enfin, je ne peux pas oublier de remercier tous mes amis sans exception.

O. BOUTALBI

Sétif, le 27/05/2014

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	IX
<i>Chapitre I</i>	<i>1</i>
PONT ROULANT : ETAT DE L'ART	1
I.1. Introduction	1
I.2. Généralités	2
I.2.1. Définitions	3
I.2.2. Principaux mouvements.....	3
I.2.3. Classification des ponts roulants	4
I.3. Phénomène de balancement.....	7
I.3.1. Présentation du phénomène.....	7
I.3.2. Anti ballant.....	8
I.4. Autonomie des ponts roulants.....	10
I.4.1. Ponts roulants automatisés.....	10
I.4.2. Défis d'automatisation des ponts roulants	11
I.4.3. Mode de fonctionnement d'un pont roulant	12
I.5. Commande des ponts roulants	14
I.5.1. Introduction à la planification des trajectoires.....	15
I.5.2. Rappel sur la commande en boucle ouverte et fermée.....	16
I.6. Modèle dynamique d'un pont roulant.....	16
I.6.1. Hypothèses de modélisation.....	17
I.6.2. Equation du mouvement.....	17
I.7. Conclusion.....	22
<i>Chapitre II</i>	<i>23</i>
COMMANDE ROBUSTE : MODE GLISSANT	23
II.1. Introduction.....	23
II.2. Synthèse de la commande par mode glissant d'ordre un	24
II.2.1. Formulation du problème	24
II.2.2. Conception de la commande	24
II.2.3. Inconvénient de la commande par modes glissants	29
II.2.4. Quelques solutions pour le problème du chattering	29
II.3. Commande par modes glissants d'ordre supérieur	30
II.3.1. Introduction	30
II.3.2. Principe de fonctionnement.....	30

II.3.3. Précision des commandes à régime glissant.....	31
II.4. Mode glissant d'ordre deux (SOSMC)	32
II.4.1. Formulation du problème.....	32
II.4.2. Algorithme de commande par mode glissant d'ordre deux.....	33
II.5. Commande hybride par mode glissant (Quasi-Homogène discontinue).....	36
II.5.1. Description du problème.....	36
II.5.2. Algorithme de commande.....	37
II.5.3. Exemple illustratif :.....	37
II.6. Différentiateurs exact par mode glissant	40
II.6.1. Principe.....	40
II.6.2. Exemple illustrative.....	41
II.7. Conclusion	43

Chapitre III..... 44

PONT ROULANT : APPROCHE DE COMMANDE 44

III.1. Introduction	44
III.2. Formulation du problème.....	45
III.2.1. Description.....	45
III.2.2. Contraintes.....	46
III.2.3. Problématique.....	46
III.3. Génération des trajectoires de référence	47
III.3.1. Généralités sur les lois de mouvement	47
III.3.2. Choix de la loi de mouvement.....	48
III.4. Suivi des trajectoires	51
III.4.1. Préparation à la commande.....	51
III.4.2. Commande par mode glissant d'ordre deux.....	52
III.5. Simulation.....	55
III.6. Conclusion	64

Chapitre IV..... 65

EVITEMENT D'OBSTACLES 65

IV.1. Introduction	65
IV.2. Formulation du problème.....	66
IV.2.1. Description.....	66
IV.2.2. Rappel sur les contraintes de commande	67
IV.2.3. Ponts roulants et robots	67
IV.2.4. Problématique.....	68

IV.3. Généralité sur la planification des trajectoires pour les robots	68
IV.3.1. Le Chemin	68
IV.3.2. Les splines cubiques.....	69
IV.3.3. La trajectoire	70
IV.3.4. Planification de trajectoire	70
IV.4. Algorithme de planification.....	71
IV.4.1. Planification du chemin	71
IV.4.2. Approximation chordale « chordal paramétrization ».....	71
IV.4.3. Reparamétrisation en fonction de la longueur d'arc	72
IV.5. Spécification temporelle du mouvement.....	74
IV.6. Approximation et lissage.....	77
IV.7. Simulation	77
IV.8. Conclusion.....	81
CONCLUSIONS GENERALES.....	82

Liste des figures

Figure I.1. Quelques applications des ponts roulants.....	1
Figure I.2 Pont roulant : structure générale	3
Figure I.3 Principaux mouvements d'un pont roulant.....	3
Figure I.4 Pont roulant (a) mono poutre (b) bipoutre.....	5
Figure I.5 Différent types des ponts roulants.....	6
Figure I.6 Effet de balancement	8
Figure I.7 Anti ballant actif et passif.....	9
Figure I.8 Effet d'automatisation sur temps de cycle pour le fonctionnement d'un pont roulant	11
Figure I.9 Classification des ponts roulants avec leurs degrés d'automatisation	12
Figure I.10 Commande manuelle d'un pont roulant.....	13
Figure I.11 Exemple d'un mode semi-automatique	13
Figure I.12 Exemple d'un mode automatique	13
Figure I.13 Schéma générique d'un système de commande.....	14
Figure I.14 Planification de trajectoires	15
Figure I.15 Exemple d'un pont roulant.....	17
Figure I.16 Schéma simplifié d'un pont roulant.....	18
Figure II.1 Structure de régulation par commutation au niveau de l'organe de commande d'état	27
Figure II.2 Structure de régulation par commutation au niveau de la contre réaction d'état	27
Figure II.3 Structure de régulation par ajout de la commande équivalente	28
Figure II.4 Fonction relais	28
Figure II.5 Plan de phase du super-twisting	34
Figure II.6 Plan de phase du twisting.....	34
Figure II.7 Les différentes phases d'une commande à régime glissant	36
Figure II.8 Commande par un retour d'état statique « PD ».....	38
Figure II.9 Réponse du système asservi avec différente commande	39
Figure II.10 Figure Plan de phase du système asservi avec une commande discontinue et une commande quasi-homogène.....	39
Figure II.11 Schéma de principe du différentiateur robuste	40
Figure II.12 Comparaison entre un dérivateur linéaire et un dérivateur à base de mode glissant	42
Figure III.1 Transfert d'une charge via un pont roulant.....	45
Figure III.2 Principe de la commande	46
Figure III.3 Manœuvre rectiligne « en ligne droite ».....	47
Figure III.4 Mouvement (gauche) bang-bang en accélération (droite) en accélération continue.....	48
Figure III.5 Linéarisation partielle par bouclage statique	51
Figure III.6 La stratégie de commande.....	55
Figure III.7 Angle de balancement et erreur de suivi pour différentes valeurs de $K\theta$	57

Figure III.8 Evolution de la charge en mode de régulation	58
Figure III.9 Evolution de la charge avec les deux profils de mouvement	59
Figure III.10 Forces générées pour manipuler la charge avec les deux profils de mouvement	60
Figure III.11 Evolution de la charge avec deux lois de contrôle.....	62
Figure III.12 Evolution d'une charge mal définie avec deux lois de contrôle	63
Figure IV.1 Espace de travail jonché d'obstacles.....	66
Figure IV.2 Abscisse curviligne	68
Figure IV.3 Un chemin interpolé (a) et un chemin approximé (b)	69
Figure IV.4 Paramétrisation cordale	71
Figure IV.5 Fonction de lissage	77
Figure IV.6 Projection des chemins planifiés (lissé et non lissé).....	78
Figure IV.7 Evolution dynamique du pont.....	79
Figure IV.8 Forces appliquées (Bleu) Sans fonction de lissage (Rouge) Avec fonction de lissage.....	80

Liste des tableaux

Tableau I.1 Paramètres géométriques et dynamiques du pont	18
Tableau III.1 Comparaison des performances entre différents types de lois de mouvement.....	49
Tableau III.2 Lois des mouvements (a) loi Bang-Bang en accélération (b) loi en accélération continue	50
Tableau III.3 Caractéristiques des lois de mouvement	50
Tableau III.4 Paramètre dynamique du système.....	56
Tableau III.5 Paramètre de commande pour un modèle simplifié	56
Tableau III.6 Paramètres des contrôleurs	61
Tableau IV.1 Points de passage	77
Tableau IV.2 Paramètre de commande	78

INTRODUCTION GENERALE

Nous rencontrons les appareils de manutention, à tous les niveaux des activités économiques, tant industrielles que commerciales. Présents lors des phases transitoires des cycles d'élaboration des matériaux et des produits, ils sont également des compléments incontournables lors des opérations de transport [1].

La manutention des charges exige des équipements de levage de haute performance opérant de manière sûre, précise et sécuritaire. La disponibilité, la fiabilité et la rentabilité de ces équipements représentent des facteurs cruciaux quelle que soit l'application [1].

Les ponts roulants et les grues forment une des solutions les plus largement utilisées dans le domaine de la manutention et de transbordement. Les ponts roulants prennent de nombreuses formes et sont très adaptables à de nombreux environnements [2].

La forte croissance du marché du transport des outils multiplie le volume des charges à manipuler, imposant des exigences de plus en plus strictes en termes de performance des grues et des ponts roulants. Ces performances sont exprimées sous la forme d'un compromis entre les critères de rapidité d'exécution, de précision et de sécurité des opérateurs. Pour ces raisons, le contrôle des portiques (ponts roulants) exige une grande expérience du pontier. D'une manière générale, l'automatisation des systèmes de production a été une des réponses à ce compromis. Cette automatisation visait un double objectif : l'augmentation de l'efficacité du système technique (réduction des coûts, fiabilité, disponibilité, qualité) et l'amélioration de la sécurité directe des opérateurs [3,4].

L'objectif principal de cette étude est la conception d'un système de commande qui permet de contrôler le fonctionnement des ponts roulants. Cette étude fournit des connaissances et des outils qui permettront à long terme d'autonomiser les opérations de levage et de placement des charges et de les transporter en toute sécurité dans un intervalle de temps bien optimisé.

Cette étude est motivée par : l'utilisation croissante des ponts roulants dans plusieurs domaines ; une étude indique que dans ce jour, plus de 125.000 ponts et de grues sont utilisés dans le domaine industriel [3]; les exigences de coût et de sécurité et les difficultés de la planification des projets impliquant des obstacles dans l'espace de travail du pont [3, 5, 6]. Cette étude traite un sujet d'actualité chez les industriels et chercheurs.

Les ponts roulants (Overhead Cranes) et les portiques (gantry cranes) sont des moyens de manutention qu'on rencontre principalement dans l'industrie pour le mouvement des charges, dans

la distribution de matériels manufacturés, et dans l'industrie manufacturière pour l'assemblage des équipements [2, 6, 7].

Dans l'industrie, le moindre retard peut s'avérer très coûteux. L'augmentation de la vitesse de fonctionnement d'un pont roulant est susceptible d'exciter des indésirables ballants de la charge. Si la charge subit des ballants durant le mouvement, il peut s'avérer difficile de suivre la trajectoire désirée ou encore d'éviter un obstacle. De plus, une fois que le système a atteint une position désirée les ballants dégraderont la précision du positionnement et causeront un retard dans la réalisation de l'opération. Pour ces effets, les fonctions de contrôle des ponts roulants doivent actuellement gérer le déplacement utile de la charge d'une part et maîtriser les indésirables balancements de celle-ci d'autre part [8]. De plus, la robustesse des contrôleurs vis-à-vis des changements de la charge et des perturbations extérieurs doit être incluse [7].

Le contrôle de ces systèmes nécessite d'abord le choix d'une trajectoire de référence réalisant l'objectif fixé par l'utilisateur. C'est ce qu'on appelle le problème de planification des trajectoires [7]. Même en absence d'obstacles, la loi du déplacement de la charge (trajectoire de référence) doit répondre à des conditions de continuité et de dérivabilité ; associées aux conditions aux limites de la trajectoire ; qui restreignent les possibilités de choix de cette loi [7]. Les littératures [8, 9] montrent que l'optimisation des trajectoires planifiées permet d'améliorer l'évolution et l'efficacité des ponts roulants ainsi que leurs sécurités.

Un deuxième aspect dans le domaine de commande des ponts roulants consiste à suivre la trajectoire de référence malgré la présence des perturbations et des incertitudes du modèle.

Concernant la commande des portiques de levage, une grande partie de la littérature utilise des approches qui sont basées sur un modèle linéaires du portique [10]. L'approche par correcteur linéaire a vite montré ses limites.

Avec le développement des techniques de commande non linéaires et afin d'augmenter la robustesse et la précision d'un tel contrôleur, les recherches se sont alors orientées vers des techniques non linéaires, telles que les méthodes adaptatives [11] la commande optimal [12], mais également la technique des modes glissants [13] a retenu notre attention par la simplicité de son algorithme de réglage et sa grande robustesse vis à vis les incertitudes paramétriques (modélisation) et les perturbations externes au système [14, 15].

Un intérêt fondamental d'un pont roulant autonome réside dans sa plus grande mobilité, qui lui permet d'intervenir dans un environnement jonché d'obstacles. L'un des aspects de l'automatisation est de générer des trajectoires de déplacement de la charge, en évitant les collisions dans l'environnement.

Plusieurs méthodes de planification, qui sont conçues initialement pour gérer le problème de déplacement des robots, sont plus ou moins adaptées pour gérer le problème de manutention des charges via des ponts roulants [3, 16, 17].

Ce travail est consacré à :

- ✓ L'étude et la modélisation mathématique du comportement dynamique des ponts roulants, étape indispensable pour le développement des techniques de commande.
- ✓ L'étude et la conception d'une commande robuste à base de mode glissant d'ordre deux pour augmenter la robustesse du système asservi.
- ✓ La conception d'un système de commande qui permet d'assurer la manutention d'une charge, via un pont roulant, en évitant les oscillations de celle-ci.
- ✓ La conception d'un planificateur des trajectoires qui permet d'éviter les collisions de la charge dans un milieu de travail partiellement encombré.

Organisation du mémoire :

Les travaux réalisés dans le cadre de ce mémoire s'articulent autour des quatre chapitres suivants :

Chapitre I :

Dans ce chapitre, un état de l'art permet la connaissance des différentes parties du problème de la commande des ponts roulants tel que le problème de la planification du mouvement ainsi que les problèmes reliés au balancement de la charge. A partir de ces connaissances une modélisation qui permet la génération des algorithmes de commande sera détaillée.

Chapitre II :

Le Chapitre II de ce mémoire introduit la technique de commande par mode glissant, la commande par mode glissant d'ordre supérieure et la commande par mode glissant d'ordre deux. A partir de ces concepts, un algorithme de commande par mode glissant d'ordre deux et un dérivateur exact à base de mode glissant d'ordre deux sont présentés et validés par des résultats de simulation.

Chapitre III :

Le Chapitre III présente un algorithme qui permet de fixer le problème de la commande d'un pont roulant dans un espace de travail considéré libre. Des trajectoires lisses ; permettent de minimiser les angles de balancement ; sont planifiées dans un premier temps. Le suivi de ces trajectoires est assuré par un algorithme qui permet de simplifier et de coupler le système commandé. Les commandes appliquées sont basées sur la loi proposée dans le chapitre II qui est bien adaptée à la commande de doubles intégrateurs perturbés. L'efficacité des techniques proposées sera testée et validée sous

l'environnement Matlab/Simulink.

Chapitre IV :

Le problème de la planification des trajectoires dans un espace jonché d'obstacles est considéré dans ce chapitre. Une méthode générale pour la génération du mouvement des robots sera introduite dans la première partie. Un algorithme qui est basé sur cette méthode générale sera détaillé par la suite, le caractère lisse des trajectoires générées doit être respecté. Une série de simulation qui est basée sur les trajectoires planifiées d'une part et la loi de commande développée dans le chapitre III d'autre part sera effectuée afin de tester l'efficacité des algorithmes proposés.

Chapitre I

PONT ROULANT : ETAT DE L'ART

I.1. Introduction

Les ponts roulants et les portiques sont des moyens de manutention indispensables dans bien de secteurs industriels. Les centrales hydrauliques, les constructions navales, l'armement, les cimenteries, la sidérurgie, les usines d'incinération d'ordures ménagères sont autant d'exemples qui témoignent de l'utilité de ces moyens de levage et de transbordement (figure I.1).



A - Pont roulant pour containers
Halle de stockage



B - Pont roulant
Pour manutention de matériaux



C- Pont roulant avec grappin et palan
auxiliaire pour centrale d'incinération



D - Pont roulant Pour les scories provenant
d'incinération des déchets

Figure I.1. Quelques applications des ponts roulants

Les ponts roulants et les portiques sont des machines permettent ; au moyen des mouvements élémentaires ; de déplacer ou de transborder une charge en tout point d'un volume parallélépipédique. Ils sont conçus pour répondre aux besoins de levage industriel de type moyen et lourd. Ces appareils permettent la manutention des charges les plus variées avec l'aide éventuelle de certains accessoires interchangeables tels que palonniers, bennes, rotateurs, fourches, suceurs.

La manipulation pratique des ponts roulants est une activité relativement complexe qui requiert un pontier habile. Dans la plupart des domaines de fonctionnement des ponts roulants, il est très intéressant de réaliser avec précision le déplacement des charges d'un point à un autre, et plus particulièrement d'obtenir un balancement nul de la charge non seulement en fin du trajet, mais aussi au cours du déplacement [8]. La formation pratique des opérateurs des ponts roulants est une activité relativement complexe qui concerne plusieurs personnes et requiert une planification soignée [5]. L'automatisation des ponts roulants est l'un des éléments-clés pour relever ces complexités, mais les hautes exigences ont fait que les défis étaient loin d'être simple [3, 4]. Le phénomène du balancement est l'un des grands défis face à l'augmentation des performances, tels que le temps de transfert, la précision et la sécurité des ponts roulant. Si les charges subissent des oscillations durant le mouvement, il peut s'avérer difficile de suivre la trajectoire désirée ou encore d'éviter les obstacles. De plus, une fois que le système a atteint une position désirée, les vibrations dégraderont la précision du positionnement et causeront un retard dans la réalisation de l'opération.

Dans ce contexte, les recherches qui traitent le problème de commande des ponts roulants et des grues peuvent être classifiées selon le degré d'automatisation en trois catégories, les ponts roulants manuels, automatisés et partiellement automatisés [3,8].

Le reste du présent chapitre s'inscrit dans le but de cerner les contours de la problématique d'automatisation et plus précisément de commande des ponts roulants.

On discutera la présentation mécanique des ponts roulants, leurs principes de fonctionnement, ainsi que leurs différents modes d'utilisation. Des notions de bases pour l'élimination des balancements de la charge sont introduites par la suite.

Après l'introduction de la notion de commande par retour d'état des ponts roulants, on présentera la modélisation mathématique d'un tel système mécanique sous actionné pour l'adapté dans le développement des techniques de commande.

I.2. Généralités

Cette partie sera axée vers la description de la structure et de l'évolution mécanique du système étudié.

I.2.1. Définitions

Les *poutres roulantes*, *ponts roulants*, *portiques* et *semi-portiques* sont des appareils de levage destinés à soulever et à déplacer des charges. Ils se déplacent sur des chemins de roulement parallèles, leur organe de préhension (crochet ou autre accessoire de levage) est suspendu par l'intermédiaire d'un câble et de poulies à un mécanisme de levage (*treuil ou palan*) susceptible de se déplacer perpendiculairement aux chemins de roulement de l'appareil [7].

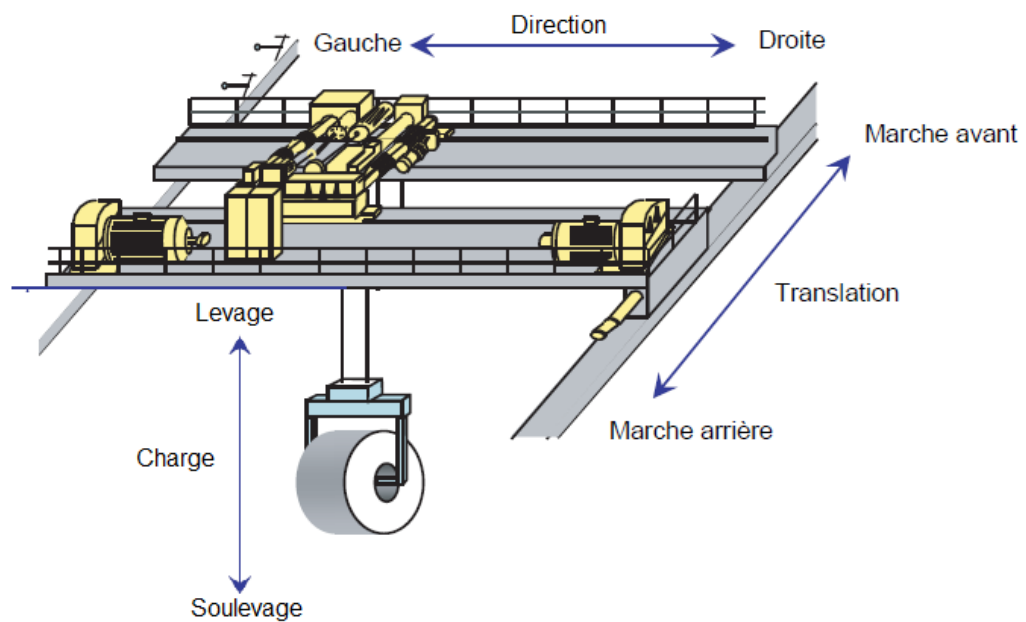


Figure I.2 Pont roulant : structure générale

I.2.2. Principaux mouvements

Tel que le montre le croquis de la figure I.3, Les différents mouvements d'un pont roulant ; levage, direction, translation, orientation ; sont assurés par les mécanismes décrits ci-après [2,7].

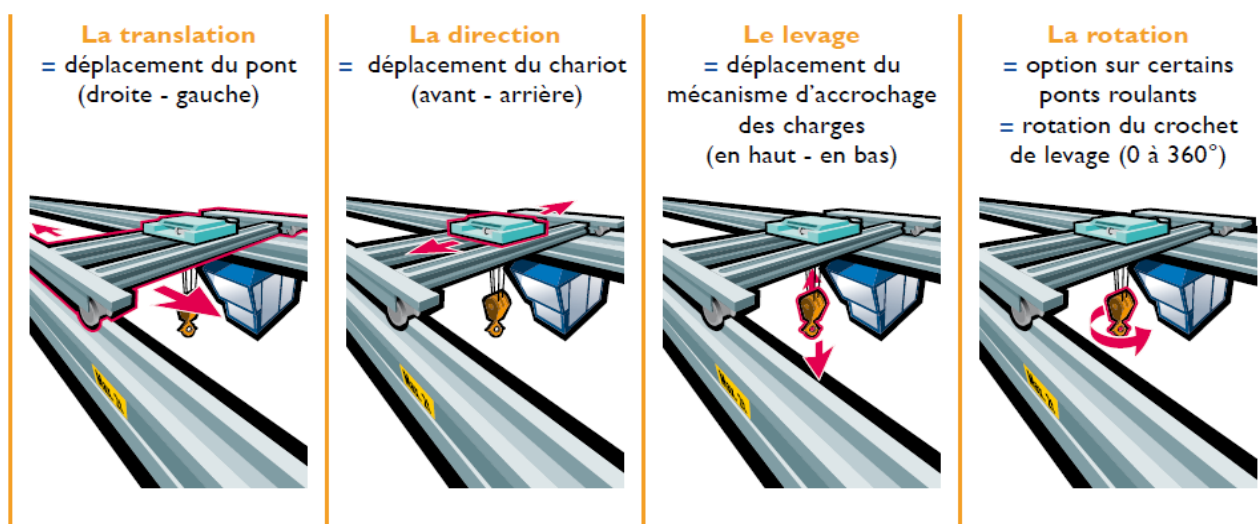


Figure I.3 Principaux mouvements d'un pont roulant

- **Levage :**

Le mécanisme de levage assure la montée et la descente de la charge ; il est essentiellement constitué d'un moteur, d'un frein, éventuellement d'un frein de sécurité, d'un réducteur, d'un tambour pour l'enroulement du câble de levage ou, lorsqu'il s'agit d'un palan à chaîne, d'une noix ou pignon à chaîne pour l'entraînement de celle-ci. Il est désigné par l'un des deux termes suivants :

- « palan », lorsque ses éléments constitutifs forment un ensemble compact. Il est utilisé notamment sur les poutres roulantes, les ponts et les portiques.
- « treuil de levage », lorsque ses éléments constitutifs sont distincts. Il est utilisé principalement sur les appareils bipoutres.

- **Direction :**

Le mécanisme de direction assure le déplacement du/des chariots porte palan, ou du/des chariots porte-treuil perpendiculairement au sens de déplacement du pont.

- **Translation :**

Le mécanisme de translation assure le mouvement du pont roulant sur les chemins de roulement. Ce mouvement est assuré :

- ✓ soit par un moteur commandant un arbre de transmission relié aux galets de roulement.
- ✓ soit par deux ou quatre moteurs synchronisés entraînant chacun un galet de roulement.

- **Nota :**

Ces trois mouvements selon trois axes orthogonaux permettent au crochet ou à l'organe de préhension de desservir n'importe quel point du volume défini par le débattement maximal des différents mouvements. Pour obtenir certaines trajectoires de la charge, on est parfois conduit à ajouter un degré de liberté supplémentaire : l'orientation.

- **Orientation :**

Le mécanisme d'orientation ou de giration assure la rotation de la charge autour d'un axe vertical ; il peut être intégré au chariot porte-treuil, à l'organe de préhension (crochet à rotation motorisée) ou à un accessoire de levage.

I.2.3. Classification des ponts roulants

On distingue 4 familles principales d'appareils dont la construction peut être des deux type suivants : le pont (ou le portique) (figure I.4) est dit mono poutre, lorsque sa charpente est réalisée avec une seule poutre (le chariot de levage est alors monorail), le pont est dit bipoutre lorsque sa charpente est constituée de deux poutres, le chariot de levage est alors du type bi rail [2] :

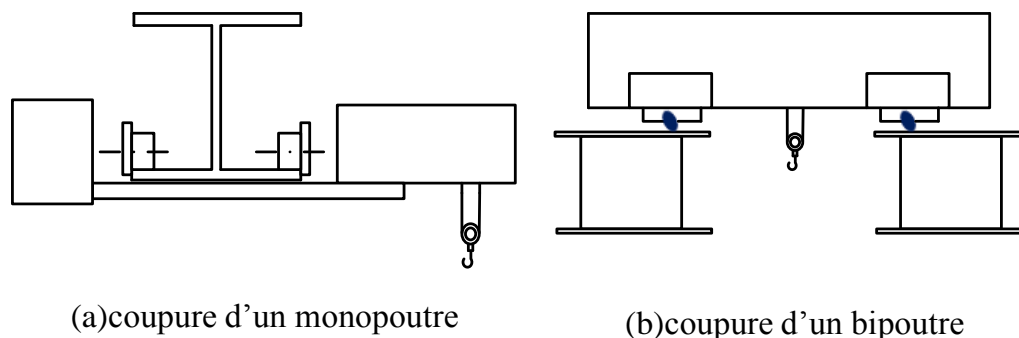


Figure I.4 Pont roulant (a) mono poutre (b) bipoutre

- **Ponts roulants posés (figure I.5a et b) :**

l'appareil roule sur deux voies de roulement constituées par un rail qui repose sur une poutre de roulement reprise sur les poteaux du bâtiment ou de l'aire de travail ou de stockage par l'intermédiaire de corbeaux (pièce en forme de trapèze rectangle métallique ou en béton qui assure la liaison entre le chemin de roulement et le poteau). Pour une portée donnée (inférieure à 30 m) et une hauteur sous ferme donnée, c'est le type de pont qui permet d'obtenir la meilleure hauteur de levage.

- **Ponts roulants suspendus (figure I.5c) :**

L'appareil roule sur l'aile inférieure d'un profilé repris directement sur les fermes du bâtiment. Ces chemins de roulement peuvent comporter plus de deux voies de roulement. Ils peuvent en outre être équipés de plusieurs moyens de levage pour desservir toute la surface du bâtiment. Dans le cas de portée très importante on installera donc plutôt ce type de matériel.

- **Portiques (figure I.5d) :**

L'appareil roule sur deux voies de roulement constituées par un rail fixé directement au sol. Ils sont reliés par deux jambes ou palées. Ces portiques sont installés dans le cas où le bâtiment ne pourrait supporter les réactions qu'entraînerait l'installation d'un pont roulant ou si les transformations nécessaires s'avéraient très onéreuses, il en serait de même s'il n'y avait pas de bâtiment du tout (parc extérieur). Un déport des poutres de roulement permettant d'aller chercher des charges à l'extérieur des rails de roulement est possible, il se nomme, dans ce cas, portique à avant-bec.

- **Semi-portiques (figure I.5e) :**

L'appareil roule sur deux voies de roulement. L'une est constituée par un rail au sol, alors que l'autre s'appuie sur la charpente du bâtiment et roule sur un chemin de roulement aérien. Cette formule est utilisée le plus souvent en complément d'un pont roulant important qui assure la liaison entre les postes équipés chacun d'un semi-portique.

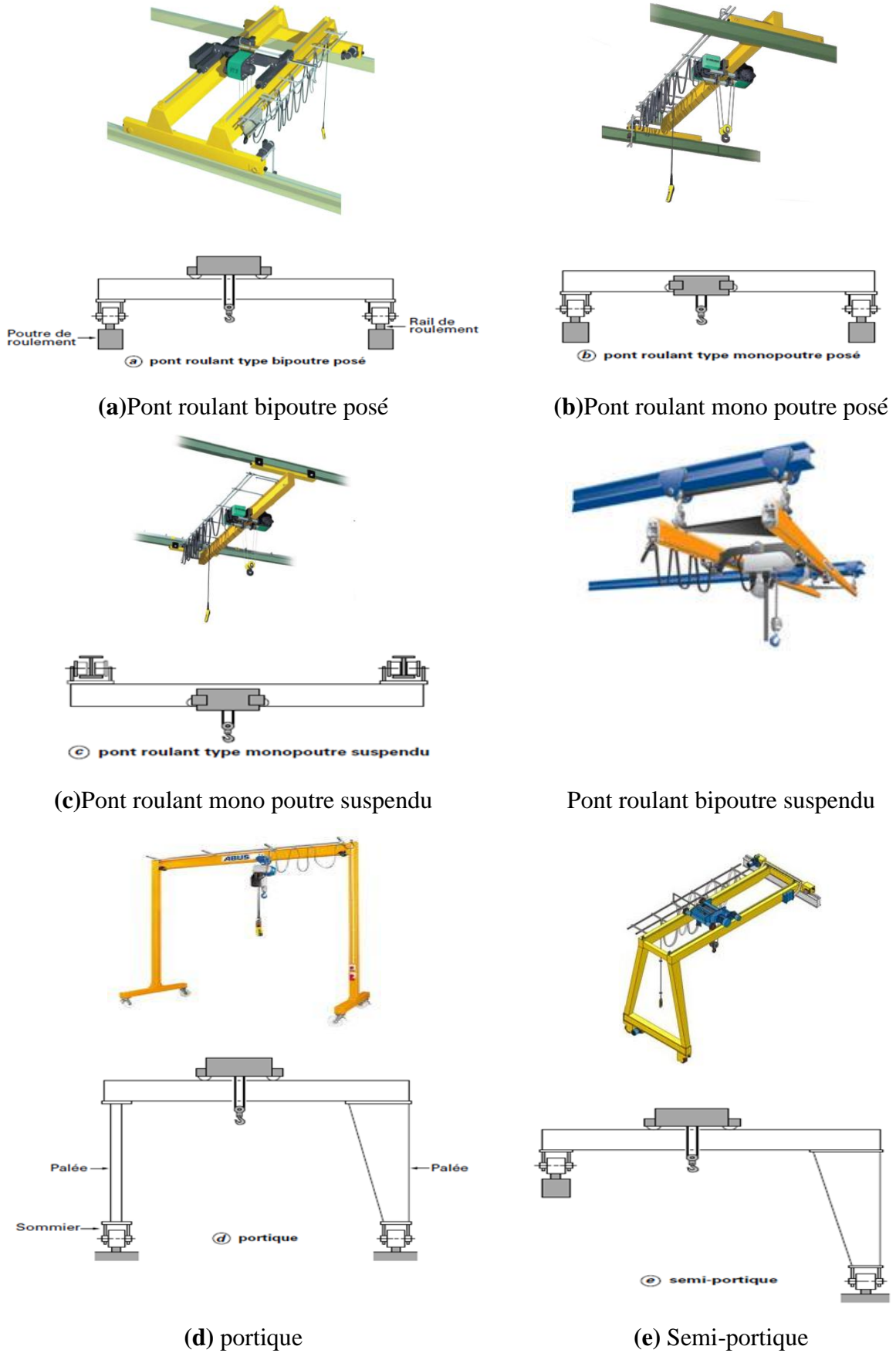


Figure I.5 Différent types des ponts roulants

- **Portiques d'atelier :**

Cette dernière famille est constituée d'appareils légers pouvant rouler directement sur le sol sans chemin de roulement, ayant parfois une possibilité de rotation dans l'axe de translation. Ces portiques sont majoritairement de type mono poutre.

I.3. Phénomène de balancement

Le but de cette partie est d'aborder la problématique du ballant sur un pont roulant. Elle s'agit d'un problème de déplacer un objet d'un point A(X1, Y1, Z1) à un autre point B(X2, Y2, Z2) le plus vite possible, en évitant les oscillations de l'objet. L'objet est suspendu au chariot par un ou plusieurs câble(s). Ce sujet est d'actualité chez les industriels, et les équipementiers de pont roulant cherchent à améliorer leur solution d'anti-ballant [18-20].

I.3.1. Présentation du phénomène

Dans une première étape on est porté sur la modélisation du mouvement pendulaire d'un pont roulant ; étape indispensable pour comprendre le principe de la compensation des ballants.

Pour des raisons de simplification, et sans perte de généralités, on s'intéressera à un déplacement de la charge dans le plan vertical (x, z) . La figure I.6a représente un schéma simplifié qui permet l'étude du mouvement d'un chariot de transfert.

Comme le déplacement de la charge n'est pas actionné directement par un moteur mais par le câble qui y est attaché, subissant l'accélération terrestre d'une part et les accélérations horizontales du chariot d'autre part, la charge est soumise à un mouvement pendulaire. De manière tout à fait connue, la théorie donne comme valeur de la période des oscillations sinusoïdales d'un pendule (comme le montre la figure I.6b) [8, 18] :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (\text{I.1})$$

ou $-T$: est la période de pendulation
 $-l$: est la longueur du pendule
 $-g$: est l'accélération terrestre

Dans la réalité, une structure réelle d'un pont roulant est très loin du modèle mathématique parfait pour lequel la période de l'oscillation ne dépend que de la longueur du pendule (Equation I.1). Il existe un amortissement provoqué par le frottement des câbles sur les poulies, par la déformation élastique des câbles, par le frottement de l'air ambiant.... Le travail des frottements provoque un mouvement pseudo périodique (une diminution de l'énergie mécanique de l'oscillateur libre pendant son mouvement). Toutefois, cela ne suffit pas à amortir totalement le mouvement d'oscillation de la charge et à obtenir en fin de trajectoire un balancement nul de celle-ci [8].

Ces quelques rappels montrent qu'une charge transportée via un pont roulant, suspendue à l'extrémité

d'un câble de levage, se comporte comme un pendule dont les sources de vibrations sont nombreuses et les balancements sont néfastes pour :

- Les organes mécaniques.
- La précision du positionnement de la charge.
- La sécurité des opérateurs travaillant à proximité du pont.

De plus de l'effet de l'accélération et de la décélération du chariot sur le mouvement oscillatoire de la charge, les ballants de cette dernière peuvent provenir à cause des perturbations imprévisibles (coup de vent ...), condition initial non nulle sur les angles de balancement, et aussi à cause des imperfections du modèle considéré (frottements aérodynamiques non négligeables pour les charges légères, imprécision sur la distance entre le crochet et le centre de gravité de la charge...).

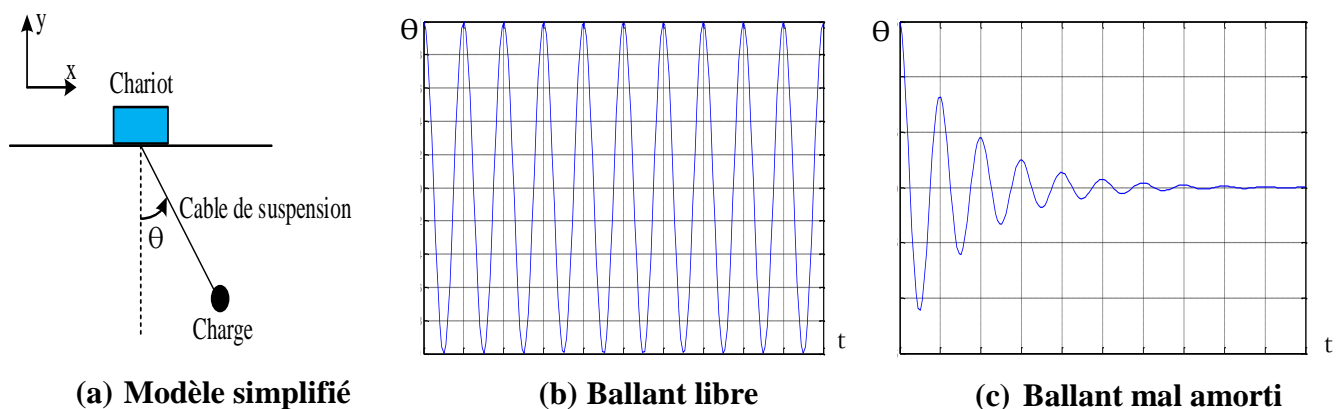


Figure I.6 Effet de balancement

I.3.2. Anti ballant

Pour une plus grande précision du positionnement de la charge et une meilleure rentabilité du pont roulant tout en réduisant les risques, les contrôleurs des portiques (ponts roulants) doivent actuellement gérer le déplacement utile de la charge et maîtriser les indésirables balancements de celle-ci.

A ces effets, des stratégies annulant le balancement ont été conçues. Un opérateur habile est capable d'éliminer le balancement manuellement. C'est toujours de loin la solution la plus commune au problème d'anti-ballant. Cependant, une fonction d'anti-ballant automatique peut souvent réaliser le travail plus rapidement, particulièrement si l'anti-ballant est combiné avec un positionnement automatique.

L'objectif principal de la fonction d'anti ballant est de contrôler le ballant éventuel de la charge. Les systèmes d'anti-ballant existants entrent dans trois catégories principales [18-20] :

- ✓ **Les anti-ballants mécaniques :** Des câbles sont attachés à la charge, ils empêcheront celle-ci d'osciller. Ce système est caractérisé par le fait qu'un ensemble de câbles est disposé de façon à constituer un moyen anti-ballant selon le premier axe horizontal x et un moyen anti-ballant selon le second axe horizontal y .
- ✓ **Les anti-ballants passifs (en boucle ouverte) :** La particularité de cette approche est qu'elle opère sans mesure du balancement. Elle calcule une accélération qui permettra au pont d'atteindre une vitesse de commande donnée sans produire un balancement de sa charge. Une commande passive ne peut pas compenser la totalité du mouvement de balancement. Ceci, à cause des sources externes des oscillations de la charge.
- ✓ **Les anti-ballants actifs (en boucle fermée) :** L'angle de balancement est mesuré à l'aide d'une caméra, reliée à un système de traitement d'images.

La figure I.7 illustre un diagramme d'une commande qui est basée sur ces deux dernières stratégies (passives et actives). Les traits pleins représentent la partie en boucle ouverte (anti-ballant passif) tandis que les traits pointillés représentent la partie en boucle fermée (anti-ballant actif).

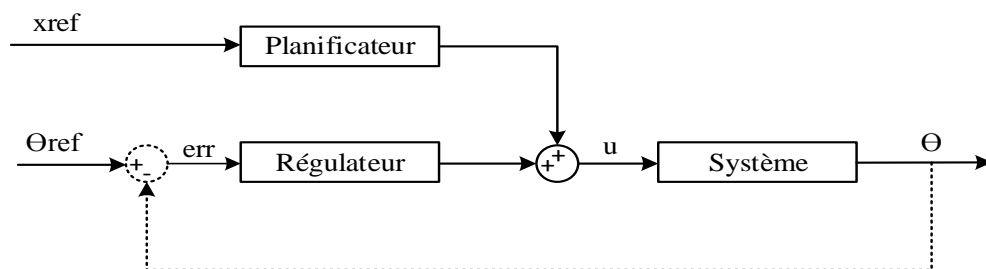


Figure I.7 Anti ballant actif et passif

Le premier système (anti ballant mécanique) implique une complexité, un encombrement mécanique et un entretien permanent.

La plupart des systèmes de commande en boucle ouverte utilise la technique de commande par mise en forme de l'entrée (input shaping). Dans ce type de commande, deux ou plusieurs impulsions successives sont appliquées au système vibratoire de sorte que les réponses impulsionnelles générées s'annulent entre elles après une première phase transitoire, produisant une réponse totale sans vibrations résiduelles. En pratique, les impulsions sont convoluées avec des trajectoires de référence continues pouvant être issues d'un générateur de trajectoires classique. Initialement conçue pour les systèmes linéaires invariants, cette technique est sensible aux variations de la période des oscillations et au facteur d'amortissement.

Le troisième système nécessite l'installation d'équipements supplémentaires ; capteur de position et/ou de vitesse ; pour la mesure des angles de balancement. Il apporte une certaine précision et une certaine robustesse au système commandé.

Une fonction d'anti ballant automatique (quel que soit passif ou actif) permet de gagner les avantages suivants [19] :

- **Réduction du temps de production** : La prévention anti-ballant réduit le temps de cycle de travail de 25% et permet une plus grande précision du positionnement.
- **Allonge la durée de service du pont** : Permet de réduire les chocs mécaniques et les contraintes sur les mécanismes et les structures du pont dus à une correction excessive et à des vibrations durant le positionnement.
- **Réduction des risques** : Préviend les risques de ballant excessifs et dangereux de la charge.

I.4. Autonomie des ponts roulants

L'autonomie, longtemps cantonnée dans le domaine de la robotique s'ouvre ces dernières années vers le champ de transport et le transbordement des charges. Il s'agit de faire évoluer ces systèmes de façon sûre dans des environnements imparfaitement connus en contrôlant les interactions entre le système et son environnement, ces interactions peuvent prendre différents aspects. D'une manière générale, un pont roulant autonome peut être divisé en trois processus :

- La perception de l'environnement : elle consiste à détecter l'environnement, les obstacles, etc. La perception permet de fournir une carte dynamique de l'environnement proche du pont roulant.
- La génération de trajectoire : elle consiste à générer des trajectoires virtuelles et à choisir la trajectoire de référence.
- Le contrôle du pont : il consiste à manœuvrer le pont roulant utilisant les actionneurs.

En effet, les recherches qui traitent le problème de commande ponts roulant autonome peuvent être classifié selon deux axes le degré d'automatisation et le degré de réalité [3]. Cependant c'est surtout le premier axe qui on s'intéressera dans le reste de cette partie et le reste de ce mémoire. Cette partie vise à mettre l'accent sur les ponts roulants automatisés, leurs classifications, ainsi qu'un aperçu sur les défis les plus influents.

I.4.1. Ponts roulants automatisés

Pour montrer l'intérêt d'automatiser un tel système, prenons l'exemple significatif d'un pont roulant utilisé pour répéter le même cycle de charge un nombre suffisant de fois.

Une analyse montre que les durées de cycle se répartissent selon une courbe de Gauss [19]. La plupart des charges seront transférées en un temps moyen, avec de bonnes et de mauvaises exécutions distribuées également des deux côtés de la courbe (figure I.8, courbe C).

En répétant le même essai avec un système d'anti-ballant automatique, la répartition des périodes

pour transférer la charge change. La courbe en cloche s'enfle sur l'avant, ce qui signifie que les mouvements s'exécutent mieux (transfert plus rapide). Si l'on répète l'action durant des centaines de périodes, la commande assistée par l'automate devient meilleure que l'intervention d'un opérateur humain (figure I.8, courbe B).

Quand les déplacements sont automatisés, ils sont toujours répétés exactement de la même manière. La méthode d'anti-ballant est alors optimale - le résultat est une distribution dans laquelle tous les mouvements de transfert de charge sont répétés de façon identique et presque optimale. Nous pouvons constater une différence substantielle comparée à l'opération manuelle (figure I.8, courbe A).

De plus d'augmenter la production et le débit, les ponts roulants automatisés peuvent aider à réduire les coûts de main-d'œuvre, optimiser la précision de fonctionnement, éliminer les dommages, réduire les coûts de production, et améliorer la sécurité des opérateurs et des machines.

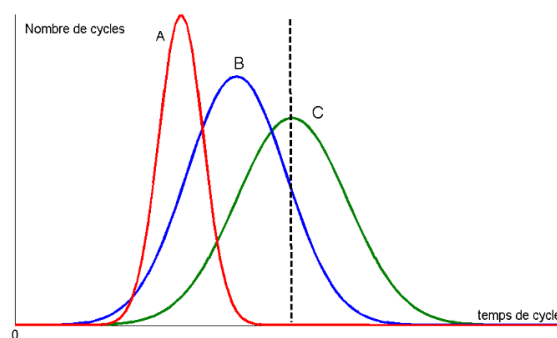


Figure I.8 Effet d'automatisation sur temps de cycle pour le fonctionnement d'un pont roulant

I.4.2. Défis d'automatisation des ponts roulants

L'objectif principale d'automatiser le fonctionnement d'un pont roulant est d'améliorer ses performances qui sont exprimées comme une fonction qui gère un compromis entre les critères de rapidité, de précision et de sécurité. Cependant, cette automatisation est confrontée à de nombreux défis important ayant des origines multiples :

1- Manipulation et interaction avec le monde physique :

Un défi majeure associés aux capacités de manipulation des ponts roulants est posé pour les mouvements de plus en plus rapides qui peuvent provoqués non seulement les balancements de la charge, mais aussi des vibrations résiduelles au niveau de la structure physique du pont.

2- Flexibilités, et les environnements non structurés :

Dans un milieu de travail ou il faut constamment manipuler des pièces de formes et de dimensions variées, l'opérateur est mis au défi d'élaborer des stratégies de levage approprié. Les ponts roulants devront être capables d'adapter leur comportement aux différentes tâches pour la manipulation des différents objets dans des différents environnements. Cela pose des défis scientifiques et techniques immenses.

Comment peut-on construire des ponts qu'on puisse facilement reprogrammer pour réaliser une nouvelle tâche ? Comment un homme peut-il spécifier cette tâche ?

De plus comment une machine peut-elle opérer efficacement et en sécurité quand il est impossible de modéliser totalement son environnement à l'avance ?

3- Interaction avec l'homme : sécurité, coopération et coordinations :

Parmi les imprévus auxquels doivent faire face les ponts roulants (semi)automatisés, le comportement des opérateurs et des autres machines est au premier plan. Pour minimiser les risques d'accidents, l'évitement des obstacles et des opérateurs qui pourraient se trouver sur le même environnement ne peut pas se résumer à une réponse réactive : il est nécessaire d'anticiper.

I.4.3. Mode de fonctionnement d'un pont roulant

Les ponts roulants peuvent être conçus pour un contrôle manuel, contrôle manuel assisté par des fonctionnalités semi-automatiques ou pour un contrôle totalement automatique, en fonction des besoins requis par chaque utilisation spécifique. La figure I.9 illustre un diagramme qui permet de classifié les ponts roulants selon leur degré d'automatisation [3,8] :

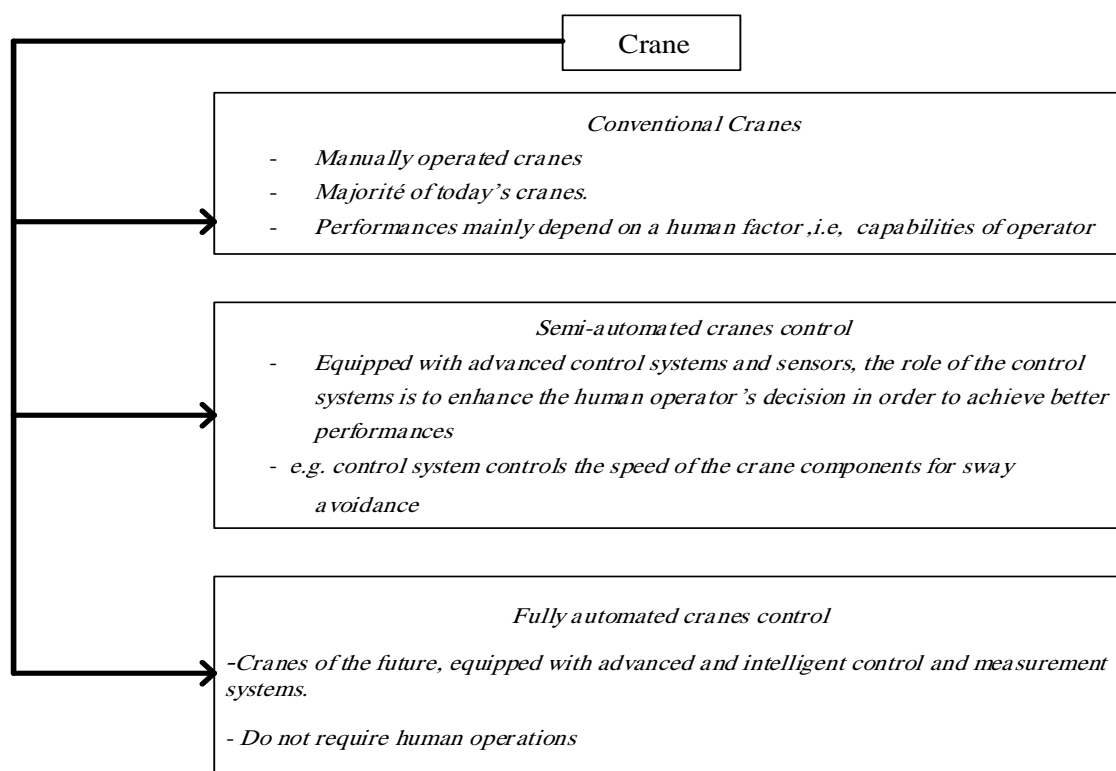


Figure I.9 Classification des ponts roulants avec leurs degrés d'automatisation

- **Mode manuelle :**

Ce mode est utilisé lorsque la tâche nécessite la présence de l'opérateur dans tous le temps. Il est à la responsabilité du pontier d'actionner les commandes en douceur et éviter d'exercer des mouvements

brusques et saccadés sur la charge (afin d'éviter le balancement de la charge). La figure I.10 démontre un exemple d'une commande manuelle basé sur la manipulation des combinateurs.

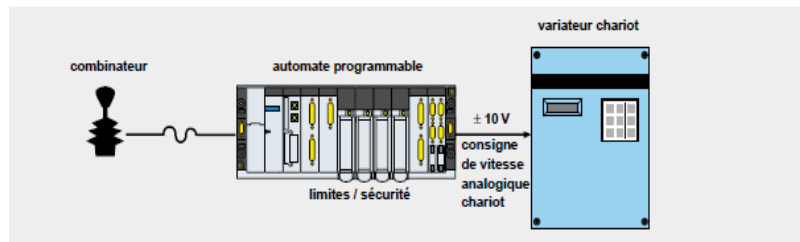


Figure I.10 Commande manuelle d'un pont roulant

- **Mode manuel assisté :**

Le positionnement du chariot est géré par l'opérateur et le contrôle du ballant sera automatisé. Un système d'anti-ballant assiste l'opérateur du pont roulant en modifiant la consigne de vitesse envoyée aux variateurs de chaque mouvement afin que le ballant soit limité en permanence.

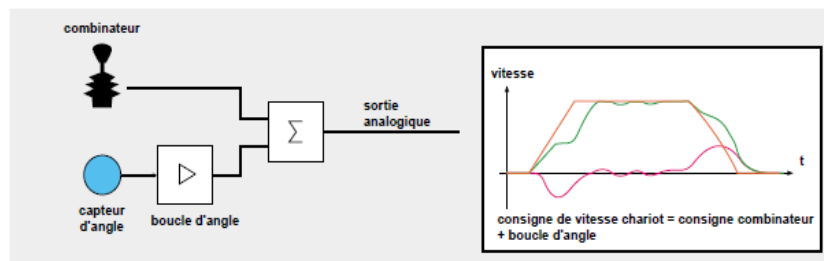


Figure I.11 Exemple d'un mode semi-automatique

- **Mode automatisé :**

Contrairement aux machines manuelles et semi-automatiques qui nécessitent une présence humaine dans leur voisinage, les ponts roulants automatisés, durant leur phase automatique, fonctionnent hors présence de l'opérateur.

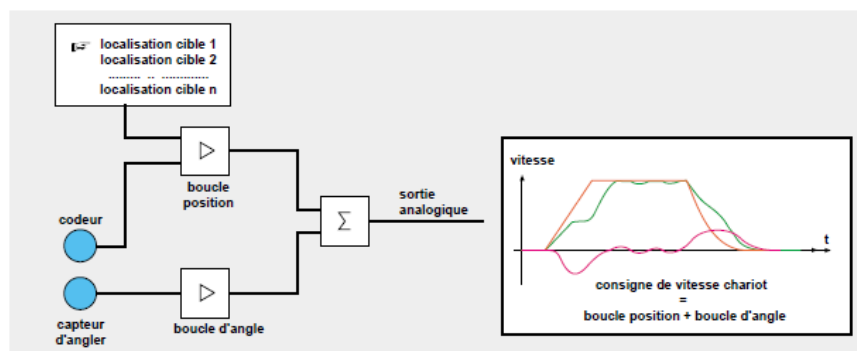


Figure I.12 Exemple d'un mode automatique

Dans ce cas, la fonction d'automatisme contrôle le comportement dynamique (déplacement et balancement) de la charge au cours du transfert, et la positionne sur la cible sans ballant résiduel, et ceci, quelles que soient les perturbations : ballant de départ, variation de hauteur et vent.

Les fonctions de base qui assurent le fonctionnement des ponts roulants automatique et semi-automatique peuvent être classifiées en deux catégories [8]:

✓ **Ponts roulants avec un système d'anti ballant automatique :**

Comme était déjà vu, sans anti-ballant, seuls des opérateurs expérimentés parviennent à contrôler les charges. L'utilisation de la fonction d'anti ballant (passif ou actif) vous fait bénéficier de gains de temps considérables, de précision et de sécurité.

✓ **Ponts roulants avec un système de déplacement et de positionnement automatique :**

Une fonction de positionnement automatique de la charge permet de réduire le stress et la fatigue de l'opérateur qui peuvent le conduire à commettre des erreurs (de transfert, de positionnement) et des retards.

I.5. Commande des ponts roulants

L'objet de cette partie est d'aborder la problématique de commande des ponts roulants. De la planification de trajectoire au contrôle robuste, les recherches continuent dans ce domaine. Noté que les références [6-8] donnent un aperçu de l'ensemble des techniques de commande qui ont été élaborées dans ce but, ainsi qu'une liste fournie de références.

D'une manière générale, la commande d'un tel système doit réaliser des fonctions telles que le positionnement de la charge, le suivi des références, la suppression des oscillations et le rejet de perturbation. Dans la majorité des applications industrielles, la commande d'un système de positionnement est généralement effectuée par une structure possédant deux leviers, la commande en boucle ouverte et la commande en boucle fermée, comme celle présentée dans la figure suivante.

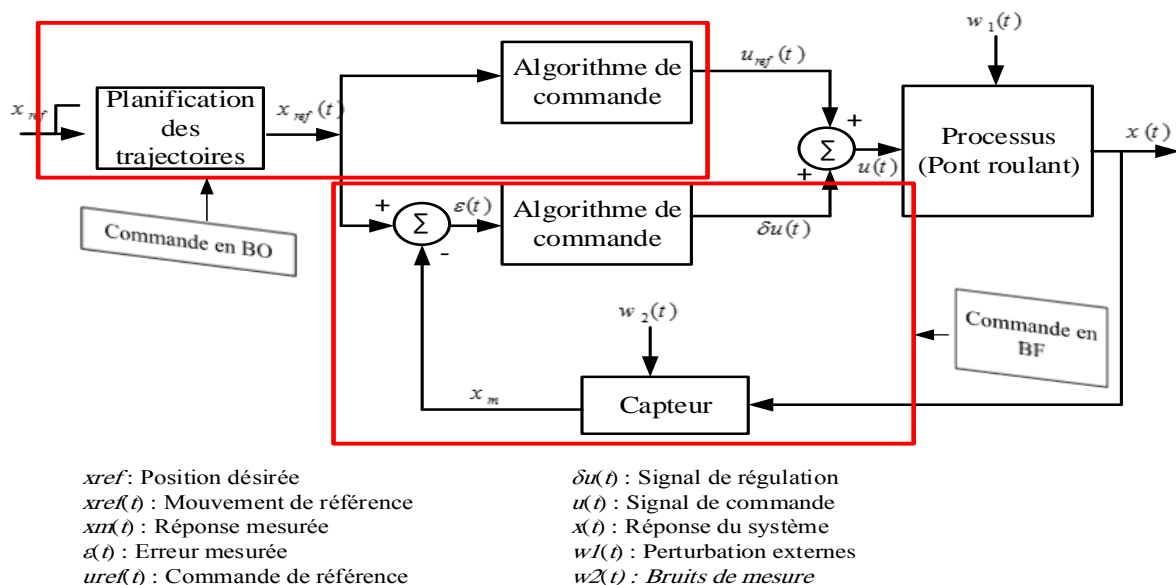


Figure I.13 Schéma générique d'un système de commande

La commande en boucle ouverte permet d'atteindre des objectifs de suivi de trajectoire pour la sortie

$x(t)$. La commande en boucle fermée est conçue de façon à rendre le processus stable et robuste vis-à-vis des incertitudes de modélisation et des perturbations extérieures. Le planificateur de mouvement $x_{ref}(t)$ fournit à la commande en boucle ouverte et à la commande en boucle fermée, la loi de mouvement $x_{ref}(t)$ qui permet à la sortie x de se déplacer du point x_0 au point x_f et de minimiser les ballants de la charge. L'intérêt d'une telle structure réside dans la capacité de découplage entre les performances en termes de suivi de trajectoire et de rejection des perturbations (le découplage entre la commande en boucle ouverte et en boucle fermée).

1.5.1. Introduction à la planification des trajectoires

La planification des trajectoires consiste à déterminer une trajectoire, en général la meilleure, que doit suivre un objet pour aller d'un point à un autre dans un environnement complexe (nombreux obstacles, terrain de nature différente). Comme le montre la figure I.14, il opère on deux phases successives :

- *Planification géométrique* : c'est la phase de détermination du chemin géométrique de la charge en prenant en compte les obstacles fixes de l'univers.
- *Planification temporelle* : c'est la phase qui assure la synchronisation temporelle des mouvements principaux d'un pont roulant.

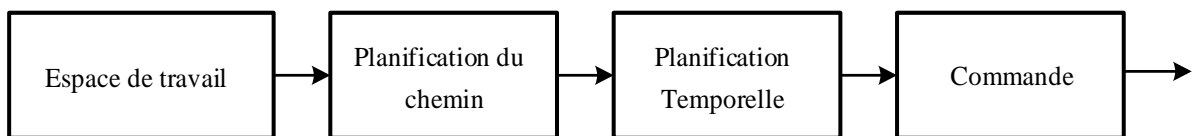


Figure I.14 Planification de trajectoires

En général, et indépendamment du système considéré, le problème de planification des trajectoires peut être traité comme étant un problème de satisfaction des contraintes cinématique, dynamique et géométrique [21-24].

Concernant les ponts roulants, même en absence d'obstacles :

- Les trois phases classiques de manutention des charges (accélération, vitesse constante et décélération) doivent être respectées.
- les trajectoires générées doivent être lisses ; c'est-à-dire continue, dérivable, et ne comporter que des accélérations bornées.
- Le temps d'exécution d'une tâche doit être optimisé.

Lorsque des obstacles sont détectés dans l'univers du fonctionnement du pont, les trajectoires générées doivent être modifiées d'une manière à satisfaire cette nouvelle contrainte. Le traitement et l'évitement des obstacles est un domaine vaste. Avec quelques modifications, des algorithmes qui

sont conçus pour répondre aux défis de la robotique peuvent être appliqués dans le but de la conception d'un planificateur autonome [3].

1.5.2. Rappel sur la commande en boucle ouverte et fermée

Après avoir généré la trajectoire désirée du pont roulant, la question qui se pose est de savoir comment le système physique réalise les mouvements planifiés, via la commande des actionneurs dont il est équipé [25].

Une première approche consisterait à appliquer directement les commandes obtenues durant l'étape de planification. En pratique, si le système présente très peu d'imperfections (erreurs de modélisation, erreurs de mesure, . . .) et s'il est très peu perturbé, la commande en boucle ouverte produira des résultats satisfaisants (balancement minimal, petite erreur de positionnement). Par contre, si ces imperfections (ballant de départ) et ces perturbations (atmosphériques comme exemple) ne peuvent pas être négligées, même si elles sont petites, l'application de la commande en boucle ouverte produira un écart important entre le résultat désiré et la réponse obtenue.

Ce type de comportement peut être évité si la commande en boucle ouverte est corrigée en fonction de la position et le balancement du pont par rapport à la trajectoire planifiée. La commande résultante est appelée commande en boucle fermée. Elle permet de rendre le système moins sensible aux perturbations, aux simplifications et approximations dans la modélisation, aux variations des paramètres du modèle ainsi qu'aux incertitudes sur les variables physiques mesurées. Toutefois, si les perturbations sont trop fortes et si on ne les prend pas en compte dans la conception de la commande, rien ne permet d'assurer que le système aura le comportement désiré.

De manière générale, l'objectif de la théorie de la commande robuste est de déterminer des commandes de manière à :

- Prendre explicitement en compte les incertitudes de modélisation du système ainsi que les perturbations (ballant de départ, variation de hauteur et vent, ...) afin de les compenser ou les atténuer.
- Garantir le bon fonctionnement du système par rapport à un ensemble de critères (contraintes) donnés.
- Réaliser la tâche désirée avec une précision donnée.

1.6. Modèle dynamique d'un pont roulant

Pour développer des stratégies de commande d'un pont roulant, il convenait en premier lieu de le modéliser, c'est le but de cette partie.

1.6.1. Hypothèses de modélisation

Le pont représenté à la figure I.15 (laboratory Crane model « Inteco 3D Crane model ») possède cinq degrés de liberté. Ce sont les coordonnées (x,y) spécifiant la position du pont et du chariot, la longueur du câble l et les deux angles de balancement (θ_x, θ_y) par rapport à un axe vertical. Cependant, il y a seulement trois actionneurs : les moteurs du pont f_x le chariot f_y et le mécanisme levant f_l . Depuis la perspective de commande, ceci signifie que le système est sous-actionné.

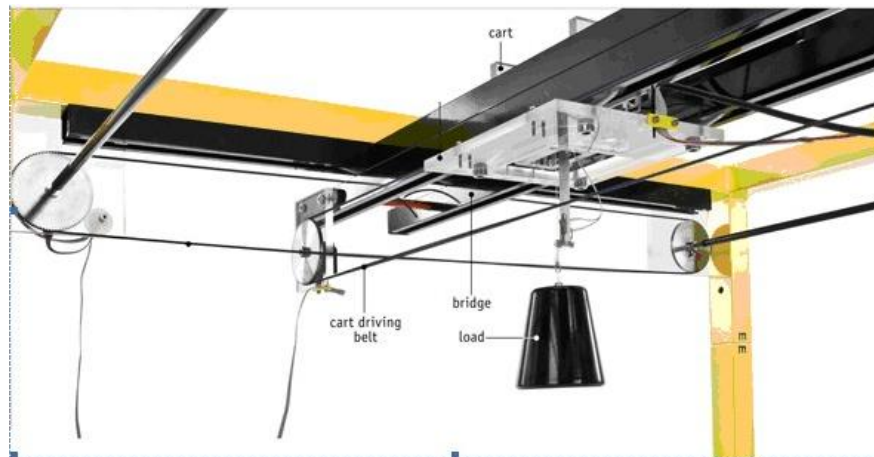


Figure I.15 Exemple d'un pont roulant

Aux restrictions ci-dessus, on ajoute les hypothèses suivantes pour simplifier le modèle :

- ✓ La fonction de rotation d'un pont roulant n'est plus considérée dans ce travail.
- ✓ Aucune déformation plastique ne se produit dans le système.
- ✓ Le câble est un corps rigide léger.
- ✓ La charge est une masse ponctuelle et a un moment d'inertie nul.
- ✓ Sans indication contraire, les frottements sont négligés.

1.6.2. Equation du mouvement

Le modèle dynamique non linéaire du pont roulant est obtenu en appliquant le formalisme de Lagrange. Cette approche nécessite le calcul du Lagrangien en fonction des énergies cinétiques et potentielles des différents composants du système en fonction des *coordonnées généralisées*. Le Formalisme de Lagrange repose sur l'équation de Lagrange :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} = F_i \quad i = 1, \dots, 5 \quad (\text{I.2})$$

Où : $\mathcal{L} = K - U$ est le Lagrangien, avec K l'énergie cinétique, et U l'énergie potentielle. q_i et \dot{q}_i sont les vecteurs de positions et vitesses généralisées. F est le vecteur des forces généralisées.

$$q = [x, y, l, \theta_x, \theta_y]^T \quad F = [\tau^T \ 0 \ 0], \quad \tau = [f_x, f_y, f_l]^T$$

D'ou :

- l : Longueur du câble entre le point d'accroche et le centre de gravité de la charge.
- x : La distance entre le centre et l'ensemble (rail+ chariot).
- y : La distance entre le centre du rail et le chariot.
- θ_x : Angle entre le câble et la projection du câble sur le plan (oxz).
- θ_y : Angle entre le câble et le plan (oxz).

Le tableau suivant récapitule l'ensemble des paramètres géométriques et dynamiques du système :

Symbole	Description
M_X	Masse du chariot
M_y	Masse du (chariot + rail)
M_l	Masse du (charge + câble)
l	Longueur du câble de manutention
m	Masse de la charge
$\tau = [f_x, f_y, f_l]$	Vecteur de forces appliquées

Tableau I.1 Paramètres géométriques et dynamiques du pont

Un schéma simplifié du pont est donné par la figure suivante (figure I.16).

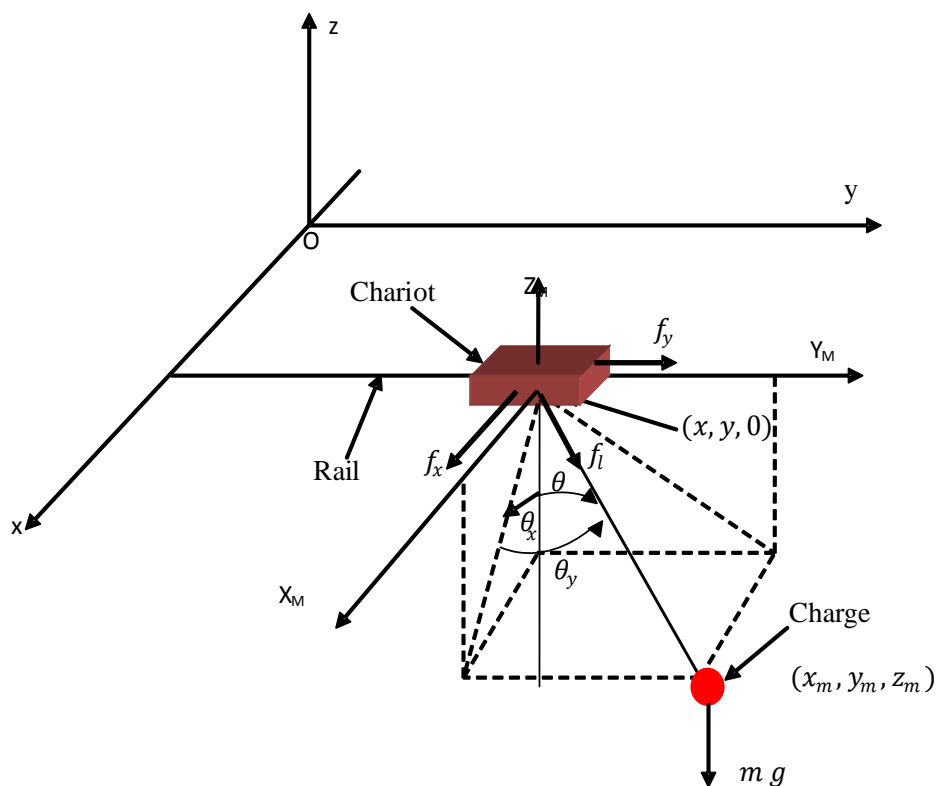


Figure I.16 Schéma simplifié d'un pont roulant

La position de la charge est parfaitement définie si l'on connaît celle du chariot x , du rail y , la

longueur du câble déroulée (l) et les deux angles (θ_x, θ_y) produits par le pendule avec la verticale.

On a:

$$\begin{cases} x_m = x + l \sin \theta_x \cos \theta_y \\ y_m = y + l \sin \theta_y \\ z_m = -l \cos \theta_x \cos \theta_y \end{cases} \quad (I.3)$$

En dérivant ces relations nous obtenons les expressions des vitesses de ce point :

$$\begin{aligned} v_m^2 = \dot{x}_m^2 + \dot{y}_m^2 + \dot{z}_m^2 = \dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2 + l^2 \cos^2 \theta_y \dot{\theta}_x^2 + l^2 \dot{\theta}_y^2 + 2(\sin \theta_x \cos \theta_y \dot{l} + \\ l \cos \theta_x \cos \theta_y \dot{\theta}_x - l \sin \theta_x \sin \theta_y \dot{\theta}_y) \dot{x} + 2(\sin \theta_y \dot{l} + l \cos \theta_y \dot{\theta}_y) \dot{y} \end{aligned} \quad (I.4)$$

Remarque 1

La vitesse de la masse m (V_m) peut être exprimée comme la vitesse de la masse m par rapport à la masse M ($V_{m/M}$) ajoutée à la vitesse de la masse M (V_M) (d'où M représente la masse du chariot)

$$V_m = V_{m/M} + V_M \quad (I.5)$$

Cette remarque nous aidera pour le développement des différentes énergies cinétiques. Définissons maintenant les différentes énergies présentes dans ce système :

- **L'énergie cinétique de charge est donnée par :**

$$K = \frac{1}{2} (M_x \dot{x}^2 + M_y \dot{y}^2 + M_l \dot{l}^2) + \frac{m}{2} v_m^2 \quad (I.6)$$

$$\begin{aligned} K = \frac{1}{2} (M_x \dot{x}^2 + M_y \dot{y}^2 + M_l \dot{l}^2) + \frac{m}{2} v_m^2 + \frac{m}{2} [\dot{x}^2 + \dot{y}^2 + \dot{z}^2 + l^2 \cos^2 \theta_y \dot{\theta}_x^2 + l^2 \dot{\theta}_y^2 + \\ + 2(\sin \theta_x \cos \theta_y \dot{l} + l \cos \theta_x \cos \theta_y \dot{\theta}_x - l \sin \theta_x \sin \theta_y \dot{\theta}_y) \dot{x} + \\ + 2(\sin \theta_y \dot{l} + l \cos \theta_y \dot{\theta}_y) \dot{y}] \end{aligned}$$

- **L'énergie potentielle de la charge est donnée par :**

$$P = m g l (1 - \cos \theta_x \cos \theta_y) \quad (I.7)$$

L'application d'un tel formalisme de Lagrange au cas du pont roulant a conduit au modèle dynamique non linéaire donné sous la forme matricielle suivante [26] :

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = [f_x \quad f_y \quad f_l \quad 0 \quad 0]^T \quad (I.8)$$

D'où :

La matrice d'inertie $M(q)$ est donnée par :

$$M(q) = \begin{bmatrix} M_x + m & 0 & m \sin \theta_x \cos \theta_y & m l \cos \theta_x \cos \theta_y & -m l \sin \theta_x \sin \theta_y \\ 0 & M_y + m & m l \sin \theta_y & 0 & m l \cos \theta_y \\ m \sin \theta_x \cos \theta_y & m \sin \theta_y & M_l + m & 0 & 0 \\ m l \cos \theta_x \cos \theta_y & 0 & 0 & m l^2 \cos^2 \theta_y & 0 \\ -m l \sin \theta_x \sin \theta_y & m l \cos \theta_y & 0 & 0 & m l^2 \end{bmatrix}$$

La matrice des forces centrifuges et de Coriolis est donné par :

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_{13} & c_{14} & c_{15} \\ 0 & 0 & c_{23} & 0 & c_{25} \\ 0 & 0 & 0 & c_{34} & c_{35} \\ 0 & 0 & c_{43} & c_{44} & c_{45} \\ 0 & 0 & c_{53} & c_{54} & c_{55} \end{bmatrix}$$

$$c_{13} = m \dot{\theta}_x \cos \theta_x \cos \theta_y - m \dot{\theta}_y \sin \theta_x \sin \theta_y$$

$$c_{14} = m \dot{l} \cos \theta_x \cos \theta_y - m l \dot{\theta}_x \sin \theta_x \cos \theta_y - m l \dot{\theta}_y \cos \theta_x \sin \theta_y$$

$$c_{15} = -m \dot{l} \sin \theta_x \sin \theta_y - m l \dot{\theta}_x \cos \theta_x \sin \theta_y - m l \dot{\theta}_y \sin \theta_x \cos \theta_y$$

$$c_{23} = m \dot{\theta}_y \cos \theta_y \quad c_{25} = m \dot{l} \cos \theta_y - m l \dot{\theta}_y \sin \theta_y$$

$$c_{34} = -m l \dot{\theta}_x \cos^2 \theta_y \quad c_{35} = -m l \dot{\theta}_y$$

$$c_{43} = m l \dot{\theta}_x \cos^2 \theta_y \quad c_{44} = m l \dot{l} \cos^2 \theta_y - m l^2 \dot{\theta}_y \sin \theta_y \cos \theta_y$$

$$c_{45} = -m l^2 \dot{\theta}_x \sin \theta_y \cos \theta_y \quad c_{53} = m l \dot{\theta}_y$$

$$c_{54} = m l^2 \dot{\theta}_x \sin \theta_y \cos \theta_y \quad c_{55} = m l \dot{l}$$

$$g(q) = [0 \quad 0 \quad -m g \cos \theta_x \cos \theta_y \quad m g l \sin \theta_x \cos \theta_y \quad m g l \cos \theta_x \sin \theta_y]^T$$

Quelques propriétés

- 1- la matrice d'inertie $M(q)$ est une matrice symétrique définie positive pour tous $l > 0$ et $|\theta_y| < \pi/2$.
- 2- La matrice $\dot{M}(q) - 2C(q, \dot{q})$ est semi-symétrique.
- 3- Le système est non linéaire dit sous actionné. Le système possède trois entrées de commande et cinq coordonnées généralisées à contrôler.

Remarque 2

- le modèle dynamique d'un tel processus présente des non-linéarités et d'importants couplages qui doivent être pris en compte par la loi de commande. Une forme générale ; bien préférable ;

des équations dynamiques représentons les systèmes mécaniques sous-actionnés est donnée par [27] :

$$\begin{cases} m_{11}\ddot{q}_1 + m_{12}\ddot{q}_2 + f_1(q, \dot{q}) = 0 \\ m_{21}\ddot{q}_1 + m_{22}\ddot{q}_2 + f_2(q, \dot{q}) = \tau \end{cases} \quad (\text{I.9})$$

$$\text{Avec } q_1 = [\theta_x, \theta_y]^T \quad q_2 = [x, y, l]^T \quad \tau = [f_x, f_y, f_l]^T$$

Les matrices $m_{11}, m_{12}, m_{21}, m_{22}, f_1(q, \dot{q}), f_2(q, \dot{q})$ sont exprimées par [28] :

$$m_{11} = \begin{bmatrix} m l^2 \cos^2 \theta_y & 0 \\ 0 & m l^2 \end{bmatrix}$$

$$m_{12} = \begin{bmatrix} m l \cos \theta_x \cos \theta_y & 0 & 0 \\ -m l \sin \theta_x \sin \theta_y & m l \cos \theta_y & 0 \end{bmatrix}$$

$$m_{21} = \begin{bmatrix} m l \cos \theta_x \cos \theta_y & -m l \sin \theta_x \sin \theta_y \\ 0 & m l \cos \theta_y \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$m_{22} = \begin{bmatrix} M_x + m & 0 & m \sin \theta_x \cos \theta_y \\ 0 & M_y + m & m l \sin \theta_y \\ m \sin \theta_x \cos \theta_y & m \sin \theta_y & M_y + m \end{bmatrix}$$

$$f_1 = h_1 + \phi_1$$

$$h_1 = c_{11}\dot{q}_1 + c_{12}\dot{q}_2 \quad \phi_1 = \begin{bmatrix} m g l \sin \theta_x \cos \theta_y \\ m g l \cos \theta_x \sin \theta_y \end{bmatrix}$$

$$c_{11} = \begin{bmatrix} m \dot{l} \cos \theta_y - m l^2 \dot{\theta}_y \sin \theta_y & -m l^2 \dot{\theta}_x \sin \theta_y \cos \theta_y \\ m l^2 \dot{\theta}_x \cos \theta_y \sin \theta_y & m \dot{l} \end{bmatrix}$$

$$c_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & m l \dot{\theta}_x \cos^2 \theta_y \\ 0 & 0 & m l \dot{\theta}_y \end{bmatrix}$$

$$f_2 = h_2 + \phi_2$$

$$h_2 = c_{21}\dot{q}_1 + c_{22}\dot{q}_2 \quad \phi_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -m g \cos \theta_x \cos \theta_y \end{bmatrix}$$

$$c_{21} =$$

$$= \begin{bmatrix} m \dot{l} \cos \theta_x \cos \theta_y - m l \dot{\theta}_x \sin \theta_x \cos \theta_y - m l \dot{\theta}_y \cos \theta_x \sin \theta_y & -m \dot{l} \sin \theta_x \sin \theta_y - m l \dot{\theta}_x \cos \theta_x \sin \theta_y - m l \dot{\theta}_y \sin \theta_x \cos \theta_y \\ 0 & m \dot{l} \cos \theta_y - m l \dot{\theta}_y \sin \theta_y \\ -m l \dot{\theta}_x \cos^2 \theta_y & -m l \dot{\theta}_y \end{bmatrix}$$

$$c_{22} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & m (\dot{\theta}_x \cos \theta_x \cos \theta_y - \dot{\theta}_y \sin \theta_x \sin \theta_y) \\ 0 & 0 & m \dot{\theta}_y \cos \theta_y \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre, le problème de la synthèse d'une commande qui permet d'automatiser le fonctionnement des ponts roulants a été introduit. Ce problème est un sujet relativement complexe en raison des exigences de hautes performances. Ces performances sont exprimées en termes de temps d'exécution, des oscillations qui caractérisent le mouvement d'un pont roulant, de précision et de sécurités.

Les grands contours de cette problématique ainsi qu'un aperçu des solutions proposées dans la littérature ont été présentés.

D'une manière générale la commande d'un tel système passe nécessairement par **le résout** de deux problèmes fondamentaux : la conception d'une loi de mouvement qui caractérise l'évolution géométrique et temporelle de la charge et la synthèse d'une loi de commande qui assure la stabilité et la robustesse du système.

Ce chapitre a été finalisé avec une modélisation mathématique du système étudié. Ce modèle montre la nature complexe et couplée du processus.

Chapitre II

COMMANDE ROBUSTE : MODE GLISSANT

II.1. Introduction

Chaque fois que l'on conçoit une machine automatique le problème du choix d'une loi de commande se pose. Pour une structure complexe tel qu'un pont roulant, la difficulté de la conception d'une loi de commande sera posée en raison de la complexité et du couplage du système d'une part et la nature incertains des paramètres caractérisant le modèle d'autre part. Dans le but de la commande des systèmes incertains, une solution privilégiée propose d'utiliser une loi de commande dite robuste qui prend en charge le compromis entre la complexité et la certitude du modèle.

Parmi les approches de commande robuste, on trouve la commande par mode glissant. La commande par mode glissant a connu un grand succès ces dernières années, cela est dû à sa simplicité de mise en œuvre et à sa robustesse par rapport aux incertitudes du système et des perturbations externes entachant le processus [14, 15].

L'algorithme de commande par mode de glissement est classifié dans les systèmes de contrôle à structure variable VSS (Variable Structure System dans la littérature anglo-saxonne) ; c'est-à-dire des commandes commutant entre plusieurs lois de commande différentes. Cette technique est basée sur le principe qu'il est plus facile de commander un système de premier ordre que de commander un système d'ordre n , qu'il soit linéaire ou non [15, 29]. Le principe de ce type de système à structure variable consiste à amener, quelles que soient les conditions initiales, le point représentatif de l'évolution du système sur une hyper surface de l'espace de phase (représentant un ensemble de relations, statiques, entre les variables d'état). La surface considérée est alors désignée comme étant la surface de glissement ou de commutation. Le comportement dynamique résultant, appelé régime glissant idéal, est complètement déterminé par les paramètres et les équations définissant la surface. L'avantage d'obtenir un tel comportement est double : d'un côté, on a une réduction de l'ordre du système, et d'autre part, le régime glissant insensible aux perturbations intervenant dans les mêmes directions que les entrées (matching perturbations) [15].

Pratiquement, l'utilisation d'une commande discontinue peut évidemment poser a priori des problèmes, la discontinuité de la commande engendre des oscillations de fréquences élevées [30]. Ce phénomène est connu sous le nom de broutement ou « chattering ». Il est le plus grand défaut des commandes par modes glissants, car en plus de générer un bruit sur des systèmes mécaniques, il peut

causer une perte de précision et une usure prématurée des actionneurs ou du système. Pour y remédier, plusieurs solutions ont été proposées dans la littérature telle que la substitution de la fonction *signe* par une autre à variation plus douce telle que la fonction de saturation et la tangente hyperbolique.

L'apparition, dans les années 80, d'une nouvelle famille de commandes à régime glissant d'ordre supérieur a permis de réduire significativement le broutement, d'augmenter la précision du contrôleur et d'élargir ainsi l'utilisation de la commande à différents domaines. Ce sont des commandes discontinues agissant sur les dérivées d'ordre supérieur de la variable de glissement [31].

Dans ce chapitre, on présentera en général la commande par mode glissant. Les systèmes considérés dans ce chapitre sont non linéaires d'ordre n , continus, mono entrée/ mono-sortie et affines en la commande. Tous les résultats ci après seront généralisés pour les systèmes multi variables (MIMO). Après avoir introduit le concept de base de la commande par modes glissants d'ordre supérieur, on s'intéressera à la commande par modes glissants d'ordre deux (SOSMC) [32-35] et ses propriétés. Puis, on s'intéressera à une technique de commande dite quasi-homogène discontinue [27, 36-39], cette technique permet de réduire le temps de convergence des algorithmes de commande par mode glissant d'ordre deux tous en conservant ses propriétés principales. Un différentiateur robuste et exact basé sur un algorithme de mode glissant d'ordre deux sera étudié dans la dernière partie dans ce chapitre.

II.2. Synthèse de la commande par mode glissant d'ordre un

II.2.1. Formulation du problème

Considérons le système mono-entrée mono-sortie (SISO) décrit par les équations différentielles suivantes :

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = x_{i+1}(t) & i = 1, \dots, n-1 \\ \dot{x}_n(t) = f(x) + b(x)u(t) + d(t) \\ y(t) = x_1(t) \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

Avec : $x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T$ est le vecteur d'état, $f(x)$ et $b(x)$ sont des fonctions non linéaires qui sont partiellement ou totalement inconnues. Avec $b(x) \geq b > 0$ ou b une constante donnée, $u(t)$: est la commande

$$d(t) : \text{ est la perturbation considérée comme étant bornée : } |d(t)| \leq D \quad (\text{II.2})$$

Le but du contrôle de la poursuite est de trouver une loi de commande telle-que, étant donné une trajectoire désirée $x_d(t)$, l'erreur de poursuite $e(t) = x(t) - x_d(t)$ tend vers zéro malgré la présence des perturbations.

II.2.2. Conception de la commande

La synthèse d'une loi de commande par modes glissants consiste à déterminer [15, 40]:

1. Une hyper-surface en fonction des *objectifs de commande* et des *propriétés statiques et dynamiques désirées* pour le système (II.1). La dynamique exigée par l'hyper surface doit être compatible avec l'amplitude de commande utile disponible et la dynamique du système en boucle ouverte. Dans le cas contraire, le système ne pourra pas rester sur l'hyper surface, et la propriété d'insensibilité aux perturbations sera perdue.
2. Une loi de commande discontinue de manière à contraindre les trajectoires d'état du système à atteindre cette hyper surface en temps fini puis à y rester en dépit des incertitudes et des perturbations.

II.2.2.1. Surface de glissement

a. Définition

Soit $s(x, t) : X \times R^+ \rightarrow R$ une fonction suffisamment différentiable est considérée telle que son annulation permettra de satisfaire l'objectif de commande. La fonction $s(x, t)$ est appelée variable de glissement ou de commutation.

L'ensemble : $s(t) = \{x / s(x, t) = 0\}$ représente alors une sous-variété de x de dimension $(n-1)$ appelée surface de glissement ou contrainte de commutation [35].

b. Degré relatif et choix de la surface de glissement

On définit le degré relatif d'un système par rapport à la sortie $s(t)$ comme étant le nombre minimum de fois qu'il faut dériver la sortie $s(t)$ par rapport au temps, pour y avoir apparaître l'entrée (commande) de manière explicite [41].

Un régime glissant d'ordre un existe sur la surface s si et seulement si le système (II.1) est de degré relatif un par rapport à $s(x, t)$ [42].

c. Choix de la surface de glissement

La surface de glissement est définie par : $s(t) = \{x / s(x, t) = 0\}$. La forme de $s(x, t)$ (linéaire ou non-linéaire) est choisie selon l'application. Seule la contrainte d'attractivité de cette surface (c.à.d. au voisinage de la surface de glissement, toutes les trajectoires du système doivent être dirigées vers elle) est nécessaire.

Dans la littérature on retrouve plus souvent des travaux qui considèrent la variable de glissement linéaire suivante :

$$\begin{cases} s(x, t) = e^{n-1} + \dots + c_2 \ddot{e} + c_1 \dot{e} + c_0 e \\ \text{ou} & e = x(t) - x_d(t) \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

Les coefficients $c_i (0 \leq i \leq n-2)$ sont choisis de telle sorte que le polynôme (II.3) soit un polynôme

d'Hurwitz pour que le système réduit soit stable (les racines du polynôme sont à partie réelle négative).

Ainsi, lorsque la variable de glissement $s(x, t)$ est forcée à zéro, l'erreur de poursuite e converge asymptotiquement vers zéro, avec une dynamique imposée par le choix des coefficients c_i .

Afin de simplifier le choix de la surface de glissement ainsi que celui des coefficients c_i , Slotine [15] propose une forme d'équation générale pour déterminer la surface de glissement qui assure la convergence d'une variable vers sa valeur désirée :

$$s(x, t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} \cdot e(t), \lambda > 0 \quad (\text{II.4})$$

Où n est l'ordre du système.

La difficulté du choix des coefficients c_i se ramène à un seul choix celui de λ , qui caractérise la pente de la surface de glissement. Le choix $\lambda > 0$ garantit d'avoir un polynôme d'Hurwitz.

d. Condition d'attractivité

Afin de garantir l'attractivité de la surface $s(x, t) = 0$, on considère une fonction de Lyapunov V définie positive dont sa dérivée par rapport au temps le long des trajectoires du système en boucle fermée sera définie négative.

Si on définit la fonction de Lyapunov $V = \frac{1}{2}s^2$ alors la condition d'attractivité est définie par l'inégalité: $s \cdot \dot{s} < 0$ (II.5)

Cette inégalité est appelée condition d'attractivité qui n'est pas suffisante pour assurer une convergence en temps fini vers la surface de glissement. Pour assurer une convergence de $s(x, t)$ vers zéro en temps fini, une condition plus forte doit être respectée. Dans le cas des modes glissants classiques (d'ordre un), on utilise généralement la condition d'attractivité non-linéaire dite *condition de η -attractivité* [15].

$$\dot{V} = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} (s^2) \leq -\eta |s| \quad \text{avec } \eta > 0 \quad (\text{II.6})$$

II.2.2.2. Glissement réel et glissement idéal

Avant d'introduire les différentes approches de commande par mode glissant, il est nécessaire de définir deux notions importantes, le glissement idéal et réel.

On appelle un régime *glissant idéal* sur une surface toute trajectoire du vecteur d'état x qui se maintient sur la surface de glissement.

Tout mouvement du vecteur d'état x se faisant au voisinage immédiat de la surface glissement est appelé glissement réel. L'existence d'un *glissement réel* est due à une limite technologique imposée par un temps de commutation non nul et à la dynamique négligée au cours de la modélisation du

système. Le glissement idéal est une extension du glissement réel pour un temps de commutation tendant vers zéro (équivalent à une fréquence de commutation infinie).

II.2.2.3. Loi de commande

Dans les systèmes à structure variable utilisant la commande par mode de glissement, trois configurations de base sont possibles. La première correspond à la structure la plus simple où la commutation a lieu au niveau de l'organe de commande lui-même. La deuxième structure fait intervenir la commutation au niveau d'une contre-réaction d'état. Et enfin, la troisième structure est une structure par commutation au niveau de l'organe de commande avec ajout de la "commande équivalente". Dans la suite, on détaillera cette dernière.

Le schéma de la structure par commutation au niveau de l'organe de commande est donné sur la figure II.1. Cette structure de commande est la plus classique et la plus usitée. Elle correspond au fonctionnement tout ou rien des interrupteurs de puissance.

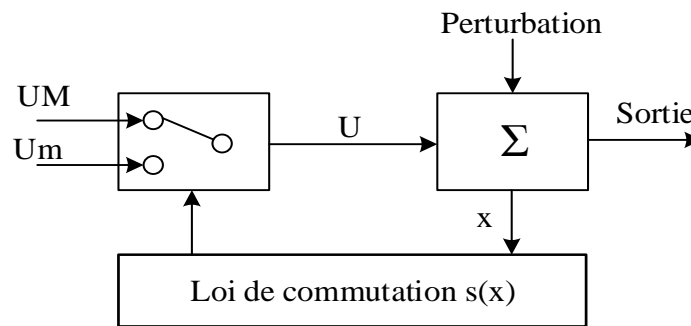


Figure II.1 Structure de régulation par commutation au niveau de l'organe de commande d'état

Le schéma de la structure par commutation au niveau d'une contre réaction d'état est donné par la figure II.2. C'est la structure la moins exigeante au niveau de la sollicitation de la commande. Elle s'appuie sur la commande par contre réaction d'état classique où le réglage de la dynamique du système est réalisé par les gains de réglage.

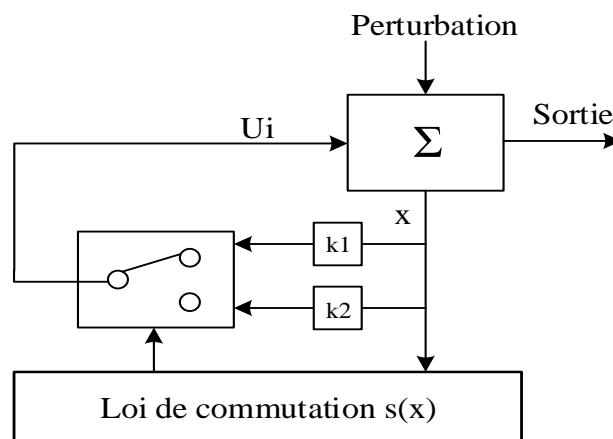


Figure II.2 Structure de régulation par commutation au niveau de la contre réaction d'état

Le schéma de la structure par commutation au niveau de l'organe de commande, avec ajout de la commande équivalente est donné par la figure II.3.

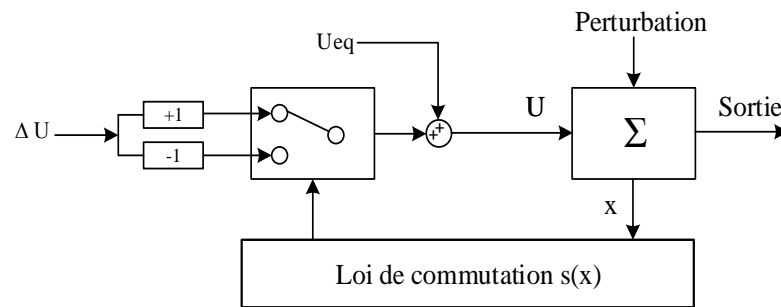


Figure II.3 Structure de régulation par ajout de la commande équivalente

Cette structure permet de pré-positionner l'état futur du système grâce à la commande équivalente. L'organe de commande est beaucoup moins sollicité, mais on est plus dépendant des variations paramétriques du fait de l'expression de cette commande équivalente. En outre, cette structure est très simple d'utilisation.

II.2.2.4. Commande par mode glissant à base de la commande équivalente

Une procédure simple, dénommée méthode de la commande équivalente est présentée pour la première fois en anglais dans [14], permet de calculer facilement et de manière systématique un algorithme de commande par modes glissants d'ordre un.

La commande par modes glissants se décompose généralement ainsi : $U = U_{eq} + U_{sw}$ où u_{eq} représente la commande équivalente, et u_{sw} est l'action discontinue (de commutation).

U_{eq} Est déterminée à partir de la condition de convergence permet de décrire le mouvement de glissement idéal, c'est-à-dire dans le cas d'un système sans incertitudes. Elle est obtenue grâce aux conditions d'invariance de la surface donnée par : $s = \dot{s} = 0$

U_{sw} Est l'action discontinue qui assure la convergence en temps fini vers la surface et le rejet d'une certaine classe de perturbations. La plus simple est la fonction relais donnée par l'équation :

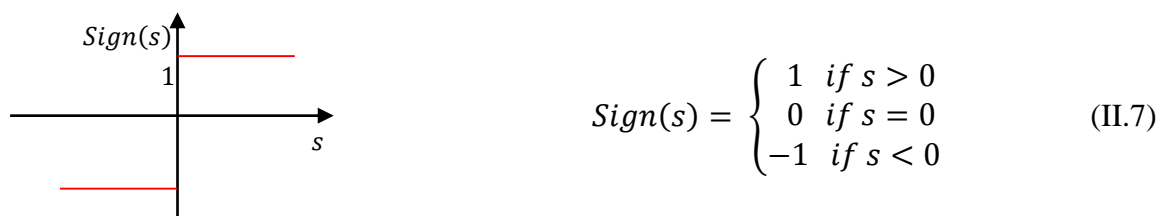


Figure II.4 Fonction relais

A cette fin (perturbations), l'amplitude de la discontinuité doit être supérieure aux bornes dans lesquelles évoluent les incertitudes de modèle et les perturbations.

La commande équivalente U_{eq} peut être perçue comme un moyen, dans le cas d'un système incertain, de minimiser la composante haute fréquence d'une commande à régime glissant classique représentée

par U_{sw} [43].

II.2.3. Inconvénient de la commande par modes glissants

Un régime glissant idéal requiert une commande pouvant commuter à une fréquence infinie. Evidemment, pour une utilisation pratique, seule une commutation à une fréquence finie est possible. Ainsi, durant le régime glissant, les discontinuités appliquées à la commande peuvent entraîner un phénomène de broutement, appelé « chattering ». Celui-ci se caractérise par de fortes oscillations des trajectoires du système autour de la surface de glissement. Les deux principales raisons à l'origine de ce phénomène sont, d'une part, les retards de commutation au niveau de la commande et, d'autre part, la présence de dynamiques « parasites » en série avec les systèmes commandés. Ces dynamiques regroupent les dynamiques des actionneurs et des capteurs présentés dans le système bouclé et sont généralement négligées lors de la synthèse de la loi de commande. Ainsi les commutations trop rapides de la commutation discontinue sont susceptibles d'exciter les modes propres des dynamiques négligées. Ce phénomène peut être si pénalisant que l'utilisation d'une loi de commande par modes glissants peut, dans certaines applications, être à proscrire, vu que son utilisation peut dégrader les performances et même conduire à l'instabilité [15]. De plus le chattering peut provoquer d'importantes sollicitations mécaniques au niveau des actionneurs et, à terme engendrer leur usure rapide.

II.2.4. Quelques solutions pour le problème du chattering

II.2.4.1. Couche limite (*boundary layer*) [15]

Elle consiste à substituer la fonction *signe* par une approximation à gain élevé au voisinage de s , et faire saturer la fonction à l'extérieur. Dans ce cas le régime glissant n'est plus dans s , mais au voisinage de celui-ci. Ce qui entraîne un régime pseudo-glissant. Cependant, cette méthode engendre un compromis entre le niveau de réduction de chattering et la conservation de robustesse. Parmi les fonctions utilisées on cite : la fonction saturation, la fonction (*signe + saturation*) et tangente hyperbolique. Ces fonctions et d'autres ainsi que leurs formalismes mathématiques sont données dans [40].

II.2.4.2. Observateur

Le principe de cette méthode consiste à faire apparaître une seconde boucle dans la grande boucle du système. C'est dans la deuxième boucle que l'observateur est inséré et que le régime glissant sera généré. Dans ce cas, l'observateur ne sera pas atteint par les dynamiques non modélisées. C'est ce qui nous permet d'avoir un mode glissant presque idéal dans la boucle secondaire. Mais il se peut qu'il soit trouble par la fréquence d'échantillonnage finie ou par des négligences sur la dynamique et

les retards liés au système. La commande fait donc tendre l'état estime vers un voisinage proche de l'origine. Mais la convergence de l'état estime vers l'état réel dépend directement de la dynamique de l'observateur, qui peut ne converger qu'asymptotiquement, et ne prendre en compte les perturbations non modélisées que lentement. Cette commande en quelque sorte fait l'autruche, ne tenant pas compte de l'état réel [40].

II.2.4.3. Système adaptatif flou

En utilisant le même principe que celui de la couche limite, Lin et Chen ont introduit une bande de transition floue [44]. Le système flou considéré est de type Mamdani, il a la surface de glissement comme entrée et la commande globale comme sortie. La bande de transition ainsi construite est non linéaire. Les trois règles floues utilisées correspondent à la valeur de la fonction *signe*. Le phénomène de chattering est certes éliminé néanmoins la commande permettant la phase d'approche reste difficile à calculer, car les bornes des incertitudes et des perturbations sont généralement inconnues. Dans [45], l'auteur a proposé de faire varier le gain de glissement à l'aide d'un système flou.

II.3. Commande par modes glissants d'ordre supérieur

II.3.1. Introduction

Les modes glissants d'ordre supérieur ont été introduit par Emelyanov, Korovin, et Levantovsky (1986) [46]. Ils représentent une extension des modes glissants d'ordre 1 à un degré plus élevé. Cette généralisation conserve la principale caractéristique en termes de robustesse que celle des modes glissants classiques. Ils permettent aussi de réduire leur principal inconvénient : l'effet de « chattering » au voisinage de la surface de glissement [35].

L'extension des modes glissants d'ordre un aux modes glissants d'ordre supérieur est caractérisée par le choix d'une commande discontinue agissant non seulement sur la surface de glissement mais également sur ses dérivées supérieures.

L'inconvénient principal de la commande en mode glissant d'ordre supérieur réside dans le besoin de connaître les variables d'état et leurs dérivées. Il en résulte alors que pour la synthèse d'un contrôleur en modes glissants d'ordre r , les fonctions $(s, \dot{s}, \ddot{s}, \dots, s^{(r-1)})$ sont nécessaires.

II.3.2. Principe de fonctionnement

Le régime glissant standard agit sur la surface de glissement. Un régime glissant d'ordre r (noté r – *glissant*) agit sur la surface et ses $(r - 1)$ premières dérivées successives par rapport au temps. L'objectif est de forcer le système à évoluer non seulement sur la surface de glissement mais aussi sur ses $(r - 1)$ premières dérivées successives et à maintenir l'ensemble de glissement à zéro [33]:

$$s = \dot{s} = \ddot{s} = \dots = s^{(r-1)} = 0 \quad (\text{II.8})$$

Ou r désigne le degré relatif du système. Il est calculé en déterminant les dérivées successives de s :

$$\begin{cases} r = 1, i. e., \frac{\partial}{\partial u} \dot{s} \neq 0 \\ r \geq 2, i. e., \frac{\partial}{\partial u} s^i = 0 (i = 0, \dots, r-1), \frac{\partial}{\partial u} s^r \neq 0 \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

II.3.3. Précision des commandes à régime glissant

L'intérêt de l'utilisation d'une commande à mode glissant d'ordre supérieur réside principalement en deux avantages : la réduction du broutement de la commande par l'utilisation d'une commande intégrée et l'amélioration, pour un temps de commutation τ donné, de la précision de convergence vers l'ensemble de glissement S [43].

Dans cette section, les principaux résultats sur la précision d'une commande à régime glissant d'ordre r , dans le cas d'un glissement réel caractérisé par un temps de commutation τ , sont présentés. Soit une loi de commande générant un mode glissant réel d'ordre r par rapport à la variable de glissement S . En supposant que $s^{[r]}$ soit bornée, alors il existe une constante $C > 0$ telle que sur un intervalle de temps fini l'inégalité $|s| \leq C \cdot \tau^r$ est satisfaite. Il en découle les résultats ci-après.

Furuta [47] montre que pour un régime glissant réel d'ordre un la trajectoire du vecteur d'état x , après convergence vers l'ensemble S , reste au voisinage de la surface de glissement avec une précision $|s| = O(\tau)$.

Levant [48] généralise le résultat précédent aux algorithmes d'ordre deux, en montrant que la précision de ce type de commande est de l'ordre $|s| = O(\tau^2)$.

Dans [49], une généralisation du résultat précédent aux commandes à régime glissant d'ordre r peut être trouvée. Une commande à régime glissant d'ordre r possède une précision $|s| = O(\tau^r)$ [49].

Pour le même temps de commutation τ , plus l'ordre de glissement augmente la précision est meilleure. Pour un glissement réel, une commande à régime glissant d'ordre r améliore, par rapport à une commande à régime glissant d'ordre 1, la précision de convergences vers l'ensemble de glissement S .

En conclusion de cette partie, l'utilisation des commandes à régime glissant d'ordre supérieur a un intérêt certain pour réduire le broutement de la commande et améliorer la précision de convergence vers la surface de glissement.

Cependant le problème de dérivation du vecteur d'état x on conduit à considérer pour la suite les commandes à régime glissant d'ordre deux. Cette approche de commande par mode glissant d'ordre deux permet de stabiliser les systèmes d'un degré relatif égale à deux, ou de limiter le phénomène de broutement pour les systèmes d'un degré relatif égale à un.

II.4. Mode glissant d'ordre deux (SOSMC)

II.4.1. Formulation du problème

Le but de ce type de contrôleurs est de générer un régime glissant du second ordre sur une surface s par l'annulation d'elle-même ainsi que de sa dérivée \dot{s} en un temps fini ($s = \dot{s} = 0$).

Considérons un système dynamique décrit par :

$$\dot{x} = a(t, x) + b(t, x)u, \quad s = s(t, x) \in R, \quad u \in R \quad (II.10)$$

Où : $x \in R^n$ est l'état du système $a(t, x), b(t, x)$ deux fonctions continues et incertaines, t est le temps, u est la commande, s est la contrainte. On définit une variable de glissement $s = 0$. Selon le degré relatif du s on peut distinguer les deux cas suivant [33, 35] :

- Le degré relatif du système est un c'est-à-dire : $r = 1 \Rightarrow \frac{\partial}{\partial u} \dot{s} \neq 0$
- Le degré relatif du système est deux c'est-à-dire : $r = 2 \Rightarrow \frac{\partial}{\partial u} \dot{s} = 0$ et $\frac{\partial}{\partial u} \ddot{s} \neq 0$
- 1^{er} cas : Le degré relatif du système est un :

Pour un degré relatif 1, l'approche par mode glissant classique, permet d'atteindre l'objectif de commande. Toutefois, la commande par mode glissant d'ordre deux peut être appliquée afin de réduire le phénomène de réticence.

Pour cela, l'entrée u du système est considérée comme nouvelle variable d'état, tandis que son dérivé $v = \dot{u}$ est considéré comme une commande actuelle.

La commande discontinue $v = \dot{u}$ assure la convergence vers la surface de glissement définie par $s = 0$ puis la maintenir par la suite ($s = \dot{s} = 0$). Finalement lorsque l'on fait le calcul de la commande du système $u = \int v$, elle devient continue limitant ainsi le phénomène de réticence (broutement). La première et la deuxième dérivée de s sont donnée par :

$$\begin{cases} \dot{s} = \frac{\partial}{\partial t} s(t, x) + \frac{\partial}{\partial x} s(t, x) [a(t, x) + b(t, x)u(t)] \end{cases} \quad (II.11)$$

$$\begin{cases} \ddot{s} = \varphi_A(t, x, u) + \gamma_A(t, x)\dot{u}(t) \end{cases} \quad (II.12)$$

$$\text{Ou : } \varphi_A(t, x, u) = \frac{\partial}{\partial t} \dot{s}(t, x, u) + \frac{\partial}{\partial x} \dot{s}(t, x, u) [a(t, x) + b(t, x)u(t)] \quad (II.13)$$

$$\gamma_A(t, x) = \frac{\partial}{\partial x} \dot{s}(t, x) b(t, x) \quad (II.14)$$

- 2^{ème} cas : Le degré relatif du système est deux :

Dans un tel cas $\frac{\partial}{\partial u} \dot{s} = 0$ et $\frac{\partial}{\partial u} \ddot{s} \neq 0$ Avec ces hypothèses, en dérivant s deux fois par rapport au temps :

$$\begin{cases} \dot{s} = \frac{\partial}{\partial t} s(t, x) + \frac{\partial}{\partial x} s(t, x) a(t, x) \end{cases} \quad (II.15)$$

$$\begin{cases} \ddot{s} = \varphi_B(t, x, u) + \gamma_B(t, x)u(t) \end{cases} \quad (II.16)$$

$$\text{Ou : } \varphi_B(t, x) = \frac{\partial}{\partial t} \dot{s}(t, x, u) + \frac{\partial}{\partial x} \dot{s}(t, x, u) a(t, x) \quad (II.17)$$

$$\gamma_B(t, x) = \frac{\partial}{\partial x} \dot{s}(t, x, u) b(t, x) \quad (\text{II.18})$$

L'objectif est la synthèse d'une commande u telle que la contrainte ($s = 0$) soit vérifiée et de maintenir $s = \dot{s} = 0$

D'une manière générale, le problème de commande par mode glissant d'ordre deux peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{cases} y_1(t) = s(t) \\ \dot{y}_1(t) = y_2(t) \\ \dot{y}_2(t) = \varphi(\cdot) + \gamma(\cdot)v(t) \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

Où : $y_1(t)$ et $y_2(t)$ représente la surface de glissement ainsi que leur dérivé respectivement.

Les termes $\varphi(\cdot)$, $\gamma(\cdot)$, $v(t)$ sont exprimés suivant le degré relatif du système, pour chacun des deux cas :

$$\begin{cases} 1^{\text{er}} \text{ cas: } \varphi(\cdot) = \varphi_A(t, x, u), v(t) = \dot{u}(t) \\ 2^{\text{ème}} \text{ cas: } \varphi(\cdot) = \varphi_B(t, x), v(t) = u(t) \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

Des preuves d'existence de solution, ont été établies sous les conditions suivantes :

- La commande u est une fonction bornée $|u| \leq U_m$ pour tout t .
- Supposons qu'il existe u_1 dans $[0,1]$ telle que pour toute fonction continue $u(t)$ avec $|u(t)| \geq u_1$ quel que soit t , alors on a $S(t).u(t) \geq 0$ pour un ensemble fini de t .
- Les termes $\varphi(\cdot)$ et $\gamma(\cdot)$ satisfait :

$$|\varphi(\cdot)| \leq \emptyset \quad (\text{II.21})$$

$$0 \leq G_1 \leq \gamma(\cdot) \leq G_2 \quad (\text{II.22})$$

Il existe alors une loi de commande $v = \varphi(s, \dot{s})$ qui permet de rejoindre, en temps fini, la surface $s = \{x : s = \dot{s} = 0\}$ représentée par l'origine (0,0) dans le plan de phase (s, \dot{s}).

II.4.2. Algorithme de commande par mode glissant d'ordre deux

II.4.2.1. Algorithme Super-Twisting

Cet algorithme a été développé pour l'asservissement des systèmes à degré relatif égal à 1. Il agit donc sur la première dérivée de s . La commande par mode glissant basée sur l'algorithme du super-twisting est donnée par :

$$v(t) = v_1 + v_2; \text{ avec } \begin{cases} v_1 = -\alpha |s|^\tau \text{sgn}(s), & \tau \in]0,0.5] \\ \dot{v}_2 = -\beta \text{sgn}(s) \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

Avec α et β des constantes positives. La convergence en temps fini est garantie par les conditions suivantes :

$$\begin{cases} \alpha^2 \geq \frac{4 \emptyset G_2 (\alpha + \emptyset)}{G_1^2 G_1 (\alpha - \emptyset)} \\ \beta \geq \frac{\emptyset}{G_1} \end{cases} \text{ Pour } \tau = 0.5 \quad (\text{II.24})$$

Pour plus de détails sur la convergence et la robustesse de l'algorithme, voir [33, 35]. La figure II.5 présente le plan de phase de l'algorithme.

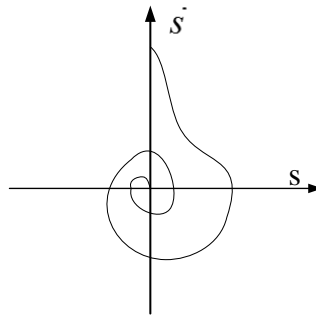


Figure II.5 Plan de phase du super-twisting

II.4.2.2. Algorithme Twisting

Son expression pour un système de degré relatif 2 est :

$$v(t) = -r_1 \text{sing}(s) - r_2 \text{sign}(\dot{s}) = -r_1 \text{sing}(y_1) - r_2 \text{sign}(y_2) \quad (\text{II.25})$$

Avec r_1 et r_2 des constantes positives, La convergence en temps fini est garantie par les conditions suivantes [33, 35] :

$$\begin{cases} r_1 > r_2 > 0 \\ G_1(r_1 + r_2) - \emptyset > G_2(r_1 - r_2) + \emptyset \\ G_1(r_1 - r_2) \emptyset > \emptyset \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

La figure II.6 présente le plan de phase (\dot{s}, s) du « twisting » algorithme :

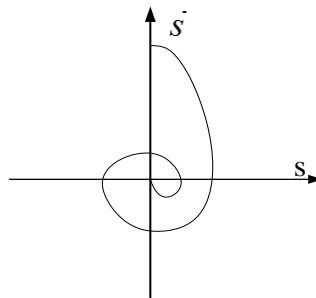


Figure II.6 Plan de phase du twisting

II.4.2.3. Autre algorithmes

Il existe autres algorithmes de commande à régimes glissants d'ordre 2, tels que :

- Le drift algorithme
- Le sous optimale algorithme.

Ces algorithmes sont bien présentés et détaillés dans [40].

Dans la suite de ce mémoire on s'intéressera principalement au Twisting et Super-twisting.

II.4.2.4. Comparaison entre le twisting et le super-twisting algorithmes :

Une commande par twisting algorithmes nécessite à chaque fois de commutation, des informations sur la première dérivée de s , ce qui peut rendre la commande instable par l'effet des bruits de mesure pour chaque dérivation. Par contre, Pour un super-twisting algorithmes, la commande discontinue est appliquée seulement sur s ce qui a l'avantage de ne pas nécessiter de connaître \dot{s} . Autre avantage réside dans la capacité d'obtenir une commande continue issue d'une sortie d'un intégrateur. Cet intégrateur a comme inconvénient de ralentir la commande, ce qui traduit par la réduction des performances du contrôleur, c.à.d. l'augmentation du temps de convergence de la commande. Des travaux proposent des dérivateurs robustes comme par exemple celui d'A. Levant [50, 51]. Ce dernier se base sur l'algorithme Super-Twisting pour estimer la dérivée. Ce dérivateur sera étudié dans la dernière partie du présent chapitre.

II.4.2.5. Limites des Twisting et Super-Twisting algorithmes :

L'intérêt d'utiliser les commandes à régime glissant d'ordre deux est la réduction du broutement et l'amélioration de la précision du système asservi. Cependant, la commande par mode glissant d'ordre deux est entachée de deux inconvénients [43] :

- ✓ Les conditions de stabilité d'un twisting ou d'un super-twisting algorithmes, sont issues des hypothèses (II.21) et (II.22) et sont étroitement liées au modèle d'étude (nécessite la connaissance a priori des bornes sur les incertitudes du système), ce que signifie que la robustesse du twisting ou super-twisting algorithmes dépend du modèle d'étude. Si une robustesse absolue est recherchée, il est nécessaire soit de modéliser le système parfaitement ce qui est coûteux (particulièrement pour des systèmes complexes) ou bien choisir une valeur arbitrairement grande pour G_2 , et dans ce cas on se ramène à une commande à régime glissant classique avec ses inconvénients (broutement, instabilité).
- ✓ La majorité des commandes par mode glissant d'ordre supérieur ont un souci au niveau de la phase de convergence (robustesse et temps de convergence). Quand le glissement sur la surface se produit, le système devient alors invariant, c'est à dire qu'il devient insensible aux perturbations et aux erreurs de modélisation. Cependant, au cours de la phase de convergence cette propriété n'est plus vérifiée. Cela est visible dans les différentes phases d'une commande à régimes glissants dans la figure II.9. Il est donc, nécessaire d'envisager l'utilisation d'un accélérateur de convergence pour améliorer la convergence et la robustesse du système bouclé vers la surface de glissement. C'est le but de la partie suivante.

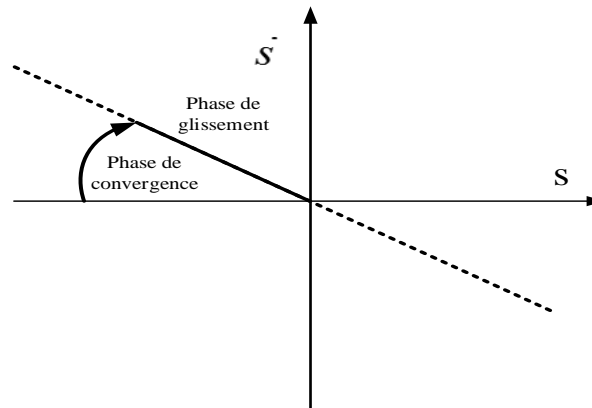


Figure II.7 Les différentes phases d'une commande à régime glissant

II.5. Commande hybride par mode glissant (Quasi-Homogène discontinue)

Le but de cette partie est d'introduire une technique de commande qui permet d'améliorer le temps de convergence des algorithmes classiques de la commande par mode glissant d'ordre deux. Cette technique de commande, dite quasi-homogène discontinue [27], conserve les principales caractéristiques des modes glissants d'ordre deux.

II.5.1. Description du problème

Afin d'illustrer les différentes étapes de la synthèse d'une commande par mode glissant d'ordre deux et ses propriétés, considérons, et sans perte de généralités, l'exemple classique d'un double intégrateur perturbé :

$$\begin{cases} \dot{x} = y \\ \dot{y} = u + d \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

Où d : est une perturbation bornée.

Tout de suite ; dans le cas où $d = 0$; l'implémentation d'un contrôleur PD (Proportionnelle Dérivé) classique permet d'assurer la stabilité du système considéré [52]. Un contrôleur PD est donné sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{x} = y \\ \dot{y} = -k_p x - k_d y \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

D'où k_p et k_d sont des paramètres de réglage qui sont choisis selon des méthodes de réglage conventionnelles. Malheureusement le correcteur PD est très sensible aux bruits, pour cela l'addition d'un terme d'intégrale est nécessaire pour compenser l'effet des bruits (cas où $d \neq 0$). K. Braikia [43] montre les limites de l'utilisation d'un contrôleur PID pour l'asservissement des systèmes incertains. Ces limites conduisent vers l'étude des commandes robustes et plus précisément la commande à régime glissant dont les propriétés de robustesse sont très intéressantes.

En effet, l'approche de commande par mode glissant d'ordre deux, et plus particulièrement le « twisting algorithm » permet d'assurer la stabilité d'un tel système. L'intérêt de l'utilisation d'une

commande à mode glissant d'ordre deux (par rapport au mode glissant classique) réside principalement en deux avantages : l'adaptation de la technique pour un système de degré relatif égale à deux et l'amélioration, pour un temps de commutation donné, de la précision de convergence vers l'ensemble de glissement.

L'algorithme de commande par le « twisting algorithm » est donné sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{x} = y \\ \dot{y} = -r_1 \operatorname{sgn}(x) - r_2 \operatorname{sgn}(y) + d \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

Avec r_1 et r_2 deux constants positifs vérifiant l'inégalité $r_1 > r_2$. La robustesse du twisting algorithm est en relation avec le choix de r_1 et r_2 .

Afin d'améliorer la robustesse d'un tel contrôleur (Twisting ou Super-Twisting), d'augmenter la zone d'attractivité et de minimiser le temps de convergence, les auteurs de [27, 36-39] proposent d'utiliser un contrôleur de type SOSMC-PD qui assure une réponse plus rapide et plus attractive que les formes classiques des contrôleurs SOSMC.

II.5.2. Algorithme de commande

Il s'agit d'une commande SOSMC (twisting, super twisting algorithm) avec un correcteur continu (P ou PD) en aval. La nouvelle version de la commande est donnée sous la forme :

$$v_\alpha = v_0 + v_1 \quad (\text{II.30})$$

Où v_1 est la sortie d'un contrôleur linéaire continue définie par :

$$v_1 = -k_p \sigma - k_d \dot{\sigma} \quad (\text{II.31})$$

v_0 est la sortie d'un contrôleur discontinue « twisting controller » définie par :

$$v_1 = -r_1 \operatorname{sgn}(\sigma) - r_2 \operatorname{sgn}(\dot{\sigma}) \quad (\text{II.32})$$

D'où : $\sigma = x$ et $\dot{\sigma} = y$

$k_p, k_d, r_1, r_2 > 0$ Sont les paramètres de commande. Les deux premiers termes (k_p, k_d) permettent de régler la vitesse de convergence [38].

II.5.3. Exemple illustratif :

Pour mettre en évidence l'efficacité de la commande (II.30-II.32) et évaluer ses performances, des simulations numériques ont été effectuées. Le problème de stabilisation d'un double intégrateur perturbé a été considéré. Le modèle d'état du système est défini par :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \tau \Rightarrow \dot{X} = AX + B \tau \quad (\text{II.33})$$

D'où : $x_1 = x$, $x_2 = \dot{x}$, $\tau = u - f$

Avec $\begin{cases} u : \text{l'entrée de commande} \\ f : \text{Une foction qui regroupe les incertitudes de modélisation et les perturbations} \end{cases}$

Dans un premier temps on considère que le système a subi à une perturbation constante $f = 0.06 N$

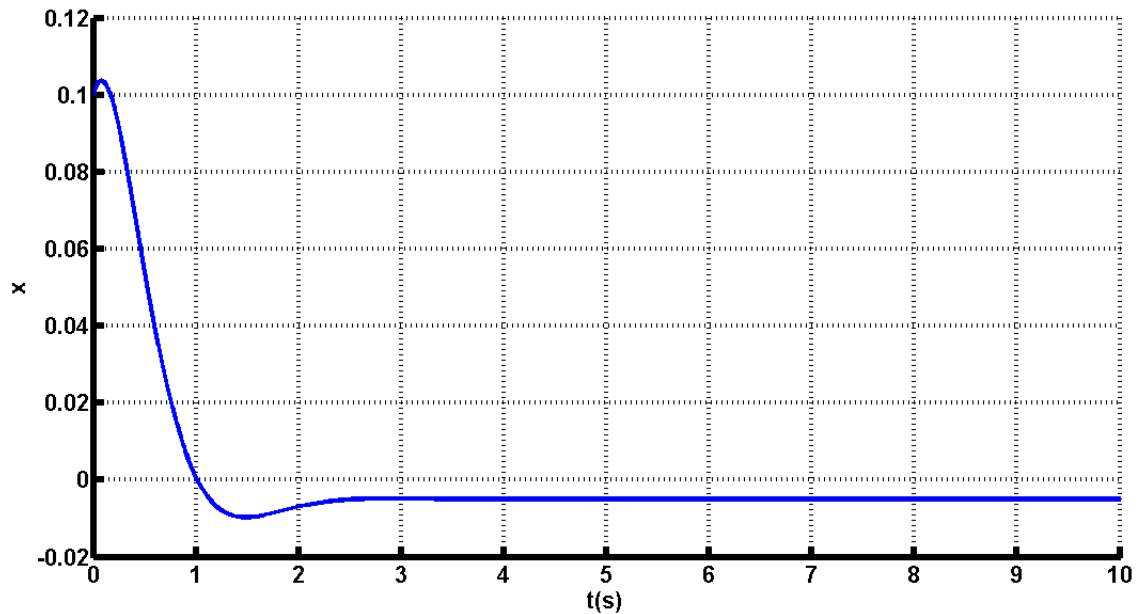


Figure II.8 Commande par un retour d'état statique « PD »

La figure (II.8) représente la réponse du système commandé par un retour d'état statique linéaire de la forme $\tau = -k x$ avec $k = [10.00 \quad 4.4721]$ (pour plus de détail, voir annexe A). Ce système de commande est équivalent à la commande PD de l'équation (II.28).

On constate tout de suite la présence d'une erreur statique. Pour améliorer la réponse du système asservi trois solutions ont été testées :

- ✓ L'ajout d'une action d'intégrale : dans ce cas on introduit la variable x_I telle que $\dot{x}_I = x$

et on obtient le système suivant :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_I \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_I \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \tau$$

puis on calcule la

commande linéaire quadratique $\tau = -k x$.

On obtient le gain de commande $k = [1 \quad 2.4142 \quad 2.4142]$. Ce contrôleur est équivalent à une commande PID.

- ✓ Une commande par retour d'état statique discontinue de la forme (II.32) :

$$\tau = -r_1 \operatorname{sgn}(x_1) - r_2 \operatorname{sgn}(x_2) \quad \text{On a choisi } r_1 = 2 \text{ et } r_2 = 1$$

- ✓ Un retour d'état de la forme (II.30) : $\tau = -k_p x_1 - k_d x_2 - r_1 \operatorname{sgn}(x_1) - r_2 \operatorname{sgn}(x_2)$ d'où

$$k_p = 10 \quad k_d = 4.4721 \quad r_1 = 2 \text{ et } r_2 = 1.$$

Les résultats de simulation sont représentés la figure (II.9).

Après une analyse de la figure ci-dessus on constate que la commande quasi-homogène discontinue est la plus rapide et la plus précise que les deux autres commandes.

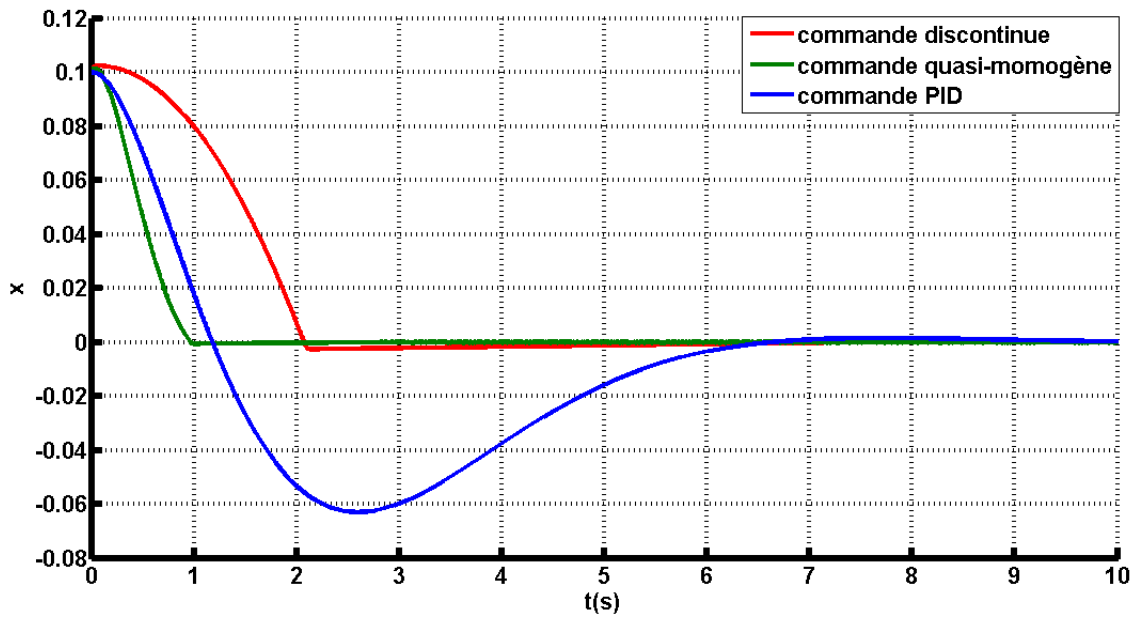


Figure II.9 Réponse du système asservi avec différentes commandes

Pour mettre en évidence l'effet de la commande continue sur la commande discontinue dans l'algorithme (II.30), on suppose que $f = f^{nom} + f^{un}$ ou f^{nom} représente la partie nominale des incertitudes (connue a priori « limites max ») et f^{un} représente une partie mal connue des incertitudes. Des simulations ont été effectuées avec deux types de commandes : la commande twisting et la commande quasi homogène discontinue.

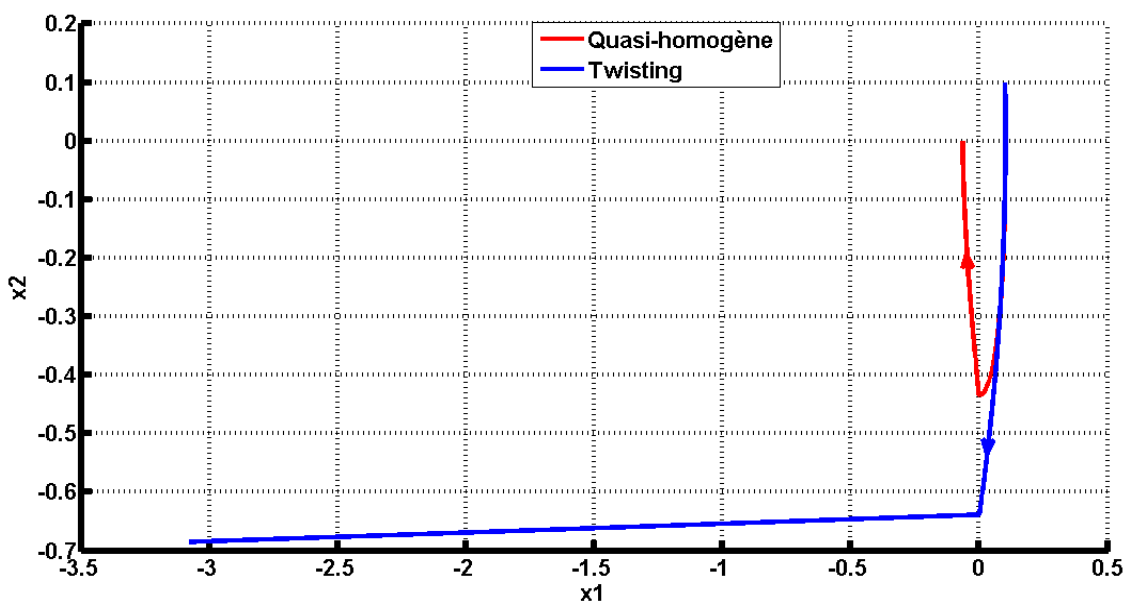


Figure II.10 Plan de phase du système asservi avec une commande discontinue et une commande quasi-homogène

La figure (II.10) représente le plan de phase des deux commandes pour une perturbation $f^{un} > 2$. On constate que la commande quasi-homogène discontinue permet d'augmenter la zone d'attractivité des modes glissants d'ordre deux classiques sans augmenter les gains de la commande discontinue ce qui

permet de minimiser le phénomène de broutement.

II.6. Différentiateurs exact par mode glissant

Dans cette partie, un différentiateur (dérivateur) robuste via modes glissants d'ordre deux sera étudié [50, 51].

II.6.1. Principe

Soit une fonction $f(t)$ définie sur $[0, \infty[$. Supposons que cette fonction possède une dérivée. Soit C la constante de Lipschitz associée.

Pour trouver la dérivée de cette fonction, considérons l'équation suivante : $\dot{x} = u$ (II.34)

On considère maintenant la surface de glissement suivante $s = x - f(t)$ (II.35)

Le but de la commande par mode glissant d'ordre deux est d'obtenir après bouclage $s = \dot{s} = 0$ en un temps fini grâce à la commande discontinue. Généralement, pour générer un régime glissant d'ordre deux sur cette surface choisie, on aura besoin de la connaissance de $s = x - f(t)$ et sa dérivée $\dot{s} = \dot{x} - \dot{f}(t)$.

L'algorithme du super-twisting permet de générer ce régime glissant d'ordre deux à partir des informations sur la surface de glissement seulement et donc aucune information sur la dérivée de la fonction $f(t)$ n'est nécessaire.

En appliquant cet algorithme, la commande est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{u}(t) = u_1(t) - \gamma_0 |s|^{\frac{1}{2}} \text{sgn}(s) \\ \dot{u}_1(t) = -\gamma_1 \text{sgn}(s) \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

L'entrée et la sortie de ce différentiateur sont respectivement $f(t)$ et u . En effet, en un temps fini, on a :

$$s = 0 \Rightarrow \dot{x} - \dot{f}(t) = u - \dot{f}(t) = 0$$

$$\text{Ou encore : } u = \dot{f}(t) \quad (\text{II.37})$$

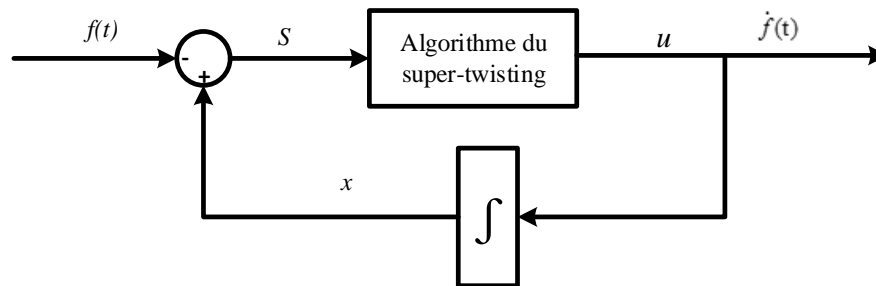


Figure II.11 Schéma de principe du différentiateur robuste

La condition suffisante pour engendrer la convergence en temps fini de vers la surface de glissement est :

$$\begin{cases} \gamma_1 > C \\ \gamma_0^2 > 4C \frac{\gamma_1 + C}{\gamma_1 - C} \end{cases} \quad (\text{II.38})$$

La figure II.11 représente un schéma simplifié d'un différentiateur robuste bas sur le super-twisting algorithme.

II.6.2. Exemple illustrative [50]

Une comparaison entre le différentiateur (II.36) et un différentiateur linéaire caractérisé par la fonction de transfert $\frac{p}{(0.1p + 1)^2}$ est effectuée. Ce dernier représente une combinaison entre un dérivateur idéal et un filtre passe bas.

Posons $\gamma_0 = 8$ et $\gamma_1 = 6$. La figure II.12 représente la réponse des deux dérivateurs pour les entrées :

$$f(t) = \sin t + 5t$$

$$f(t) = \sin t + 5t + 0.01 \cos 10t$$

$$f(t) = \sin t + 5t + 0.001 \cos 30t$$

Un différentiateur linéaire manque de précision. En même temps, il est très sensible au signal de bruit avec une fréquence d'environ de 30 rad/s . Le différentiateur proposé gère correctement tous les signaux d'entres f avec $\dot{f} < 7$ quel que soit le spectre du signal.

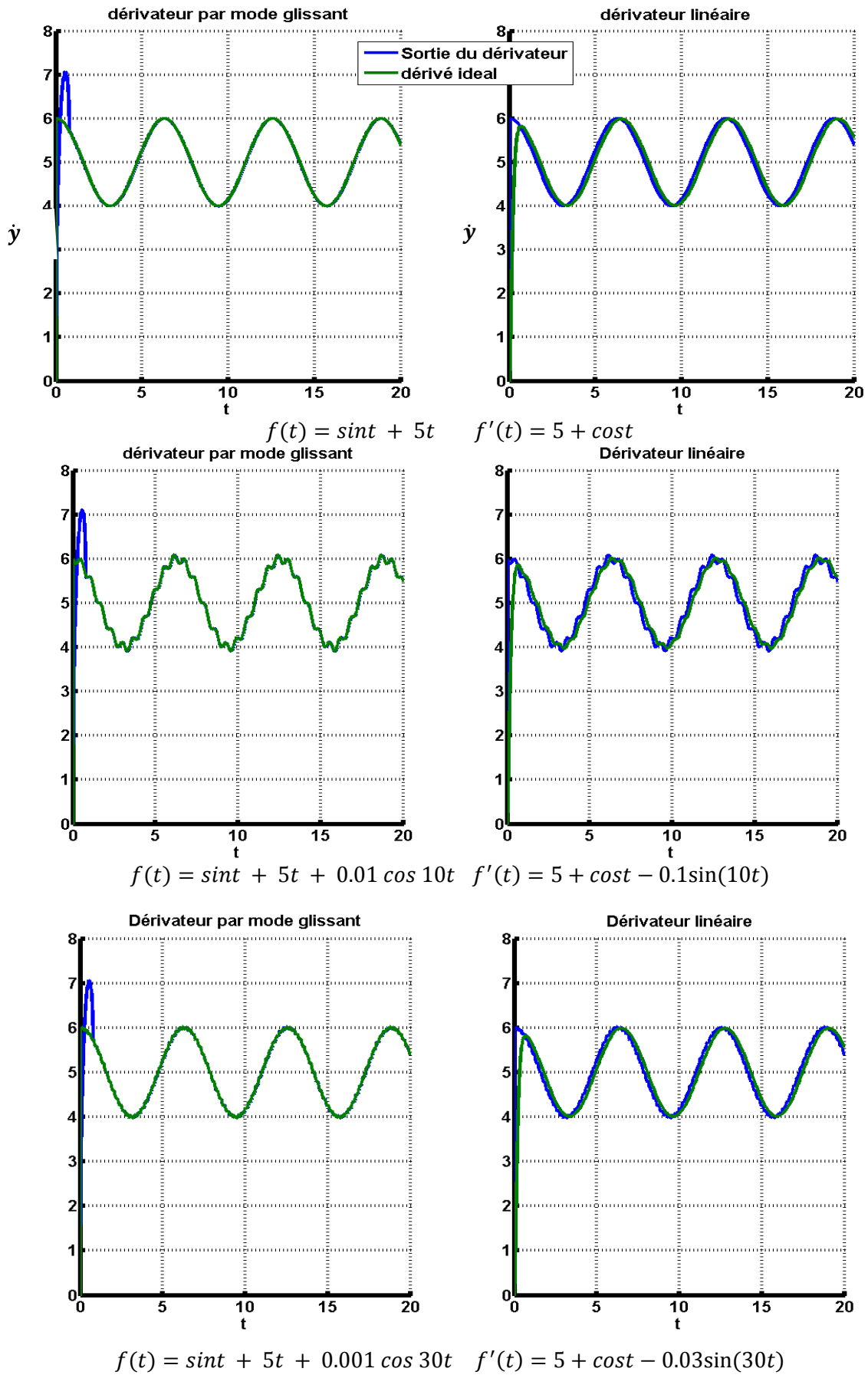


Figure II.12 Comparaison entre un dérivateur linéaire et un dérivateur à base de mode glissant

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les différents algorithmes de la commande par mode glissant. L'intérêt majeur de ces algorithmes se situe dans la simplicité de mise en œuvre. Les points suivants résument les principaux résultats dans ce chapitre :

- La propriété d'invariance de la commande à régime glissant permet d'asservir des systèmes incertains, la commande est robuste aux variations paramétriques, aux erreurs de modélisation et aux perturbations. La discontinuité de la commande à régime glissant peut être un inconvénient mais sa généralisation aux ordres supérieurs permet de contourner ce problème tout en améliorant la précision de la commande.
- Malgré ses avantages, le mode glissant d'ordre deux est entaché de deux inconvénients, le problème de la robustesse de la commande au niveau de sa phase de convergence et la nécessité d'une loi de dérivation. Deux solutions ont été proposées pour remédier ces problèmes :
 - L'utilisation d'un algorithme de commande mode glissant de type SOSMC-PD permet d'améliorer la vitesse de convergence du vecteur d'état vers la surface de glissement. Une conséquence indirecte est l'amélioration de la robustesse du système face aux erreurs de modélisation et aux perturbations extérieures. Cependant, il est indéniable que l'accélérateur de convergence (partie continue de la loi de commande) rajoute deux variables supplémentaires dans le réglage de la commande, qu'il faut prendre en considérations dans la synthèse de la loi de commande pour ne pas obtenir une commande instable.
 - L'utilisation d'un algorithme de commande mode glissant de type super twisting permet d'assurer la dérivation robuste et exact d'une fonction donnée.

Chapitre III

PONT ROULANT : APPROCHE DE COMMANDE

III.1. Introduction

En se basant sur les notions exprimées dans les chapitres I et II, on présentera dans ce chapitre une approche de commande d'un pont roulant. Ce pont exécute la tâche de déplacement d'une charge bien définie dans un environnement considéré libre (sans collisions). Déplacer une charge d'un point à un autre le plus rapidement possible et sans oscillations est une des principales fonctions d'un tel système de commande.

L'expérience quotidienne on montre qu'il existe différentes manières d'imposer un mouvement à un système de levage de façon à éviter les oscillations. C'est ce qu'on appelle le problème de la planification des trajectoires (choix du profil de mouvement).

Prenons l'exemple significatif du travail d'un grutier ou d'un pontier qui doit déplacer une charge d'un point à un autre tout en évitant de faire osciller sa charge. Un grutier "inexpérimenté" aura tendance à suivre son intuition et à déplacer très lentement la charge afin de limiter les oscillations. Le grutier "expert" réalisera quant à lui un mouvement beaucoup plus rapide, composé de plusieurs phases dictées par l'expérience, exempt de toute oscillation à l'arrivée de la charge. Derrière cet exemple se dissimulent plusieurs familles et types de loi de mouvement qui, correctement gérées, permettent de limiter et de voire supprimer les vibrations lors du mouvement d'un système.

Faire en sorte qu'un processus suive le profil généré avec un minimum d'erreurs est un deuxième problème typique de la commande des systèmes de positionnement.

Dans ce but, la commande à structure variable par mode glissant d'ordre deux sera utilisée pour assurer le suivi des trajectoires ainsi générées. Ces trajectoires doivent respectées les différentes caractéristiques du modèle d'étude. Le choix de la commande par mode glissant est justifié par la simplicité et la robustesse de la technique de commande à structure variable.

Dans le reste du présent chapitre, on discutera du problème de la planification des trajectoires sous des contraintes cinématiques et dynamiques puis on propose une méthode pour les planifier. Ensuite, un algorithme de commande qui assure le suivi de ces trajectoires sera détaillé. Cet algorithme est développé autour d'un modèle complexe, non linéaire et fortement couplé, exprimé par le système d'équation I.9. Une analyse de l'évolution des principales variables décrivant le comportement dynamique du système global (position de charge, angle de balancement) est mise en valeur par plusieurs essais de simulation numérique en dernière étape.

III.2. Formulation du problème

III.2.1. Description

Le problème le plus fréquemment rencontré lors de la conception d'une commande est la transition entre deux points de fonctionnement d'un système en un temps fini, qui correspond pratiquement au déplacement d'une charge d'un point à un autre (comme le montre le schéma de la figure III.1).

Deux types de mouvement sont envisageables : un mouvement de type suivi de trajectoire et un mouvement de type point à point.

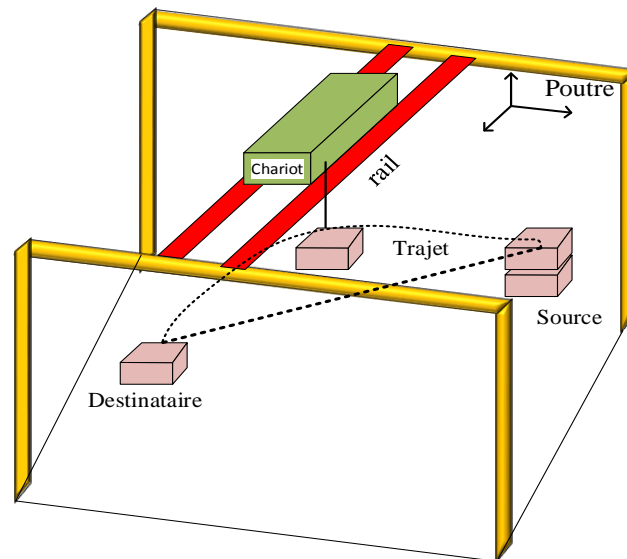


Figure III.1 Transfert d'une charge via un pont roulant

- ✓ Un mouvement de type suivi de trajectoire permet à une charge de suivre la trajectoire désirée $r_d(t)$ tout au long d'un déplacement. Selon le type d'opération à réaliser, les exigences sur le suivi de profil seront différentes. Pour une grande partie des applications, l'erreur de suivi de profil se doit être minimale essentiellement à l'arrivée. Pour autres types d'application, la qualité du suivi de profil est un critère à privilégier tout au long du mouvement. Cette catégorie de mouvement est par exemple utilisée dans le domaine d'assemblage des pièces, telles que celle réalisées dans le domaine d'automobile.
- ✓ Un mouvement de type point à point permet, quand à lui, de déplacer une charge d'un point à un autre le plus rapidement possible avec des contraintes au niveau des points de départ et d'arrivée, le comportement entre ces deux points n'étant pas nécessairement pris en compte. Dans un tel cas, l'erreur de suivi de profil se doit être minimale essentiellement à l'arrivée. Ce type de mouvement est souvent utilisé pour des applications de chargement ou déchargement de pièces ou l'objectif est de se déplacer le plus rapidement possible avec généralement des contraintes sur le comportement oscillatoire au départ et à l'arrivée du mouvement.

III.2.2. Contraintes

Pour le déplacement d'une charge via un pont roulant, ces deux types de mouvement (suivi de trajectoire et point à point) correspondent à des contraintes différentes :

- ✓ Dans le cas d'un mouvement du type suivi de trajectoire, le comportement oscillatoire de la charge est maîtrisé tout au long du déplacement. Pour une meilleure séquence de fonctionnement, les trajectoires correspondants au déplacement de la charge doivent être générées de manière à respecter les contraintes suivantes [10] :
 - Respectant le caractère lisse des trajectoires ($r_d \in C^4$ au minimum «classe du fonction»).
 - Des limitations dynamiques du modèle de mouvement doivent être respectées afin de minimiser le balancement de la charge : $\|\dot{r}_d\|_\infty \leq v_m$ et $\|\ddot{r}_d\|_\infty \leq a_m$
 - Précision de mouvement : si une précision souhaitable de l'erreur du suivi est donnée, les inégalités suivantes doivent être respectées. $\|r_d - r\| \leq \varepsilon$ $\|\dot{r}_d - \dot{r}\| \leq \varepsilon_v$
 - Contrainte temporelle : le temps écoulé pour la manutention de la charge doit être minimisé le plus possible.
- ✓ Dans le cas d'un mouvement du type point à point, le comportement oscillatoire de la charge est maîtrisé au début et à la fin de chaque déplacement. De par sa nature moins contraignante, un mouvement de type point à point sera toujours plus rapide qu'un mouvement de type suivi de trajectoire.

III.2.3. Problématique

Etant donnée une configuration de départ A et une configuration cible B, une valeur acceptable des ballants de la charge et un temps maximale d'exécution T_M .

Dans ce chapitre, on s'intéressera beaucoup plus à un mouvement de type suivi de trajectoire. La solution à ce problème peut être séparée en deux étapes:

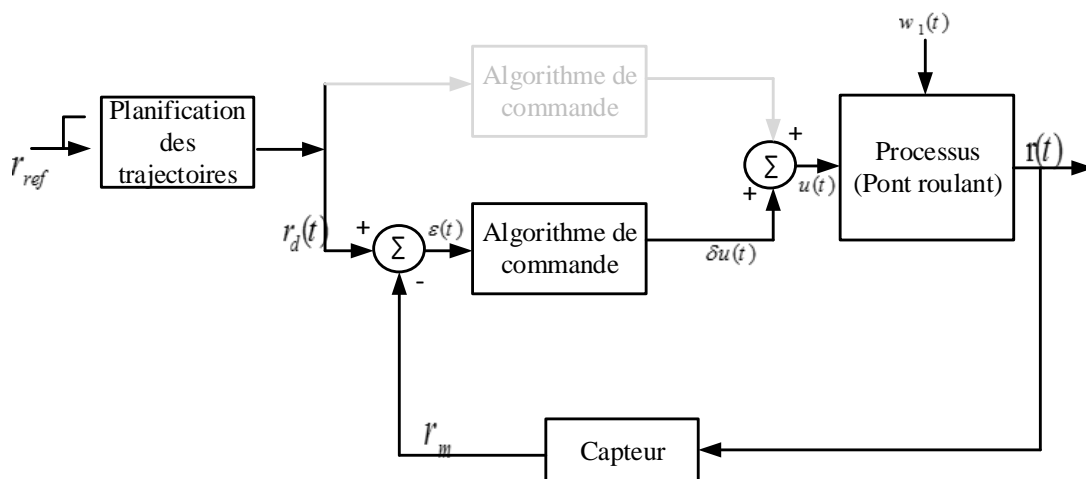


Figure III.2 Principe de la commande

1. La conception d'un générateur de la loi de mouvement (planificateur de trajectoire) $r_d(t)$ qui fournit une loi de mouvement $r_d(t)$ qui raccorde le point de départ au point d'arrivée. Cette loi de mouvement est utilisée comme référence pour l'asservissement. Elle permet de prendre en compte les limites énergétiques (contraintes cités dans le paragraphe précédent) du système de commande et de définir l'évolution temporelle de la charge (temps de cycle).
2. La conception de la commande qui fournit le signal de commande au système asservi pour que sa sortie $r(t)$ suive la trajectoire $r_d(t)$.

III.3. Génération des trajectoires de référence

III.3.1. Généralités sur les lois de mouvement

Avant toute chose, une fonction temporelle candidate au titre de la loi de mouvement d'une charge transportée se doit de vérifier plusieurs propriétés [53,54]:

- ✓ Puisque la variable de commande correspond à un effort, elle doit disposer au moins d'une phase d'accélération et d'une phase de décélération, correspondant à des phases à effort positif et négatif. Une phase de mouvement à une vitesse constante peut être apparître entre ces deux phases de mouvement.
- ✓ Elle doit être capable de s'adapter aux variations d'échelle du mouvement, c'est-à-dire être "suffisamment paramétrable" pour décrire toutes les longueurs de déplacement possibles sans dégénérescence excessive de sa forme (donc de ses propriétés).
- ✓ Elle doit avoir la capacité de limiter les oscillations du système. (répondre aux différentes contraintes citées au paragraphe précédent).

D'une manière générale, une manipulation pratiquée à l'aide des manœuvres rectilignes « chemins en ligne droite » est largement utilisée pour la manutention des charges à l'aide des ponts roulants (figure III.3) [17]. Si c'est le cas, l'équation de mouvement sera définie par :

$$r_d(t) = r_A + (r_B - r_A) s(t) = r_A + D \cdot s(t) \quad \text{Avec } 0 < s(t) < 1 \quad (\text{III.1})$$

D'où : $r_A = [x_A \ y_A \ z_A]$ $r_B = [x_B \ y_B \ z_B]$ Représentent respectivement les positions initiale et finale de la charge.

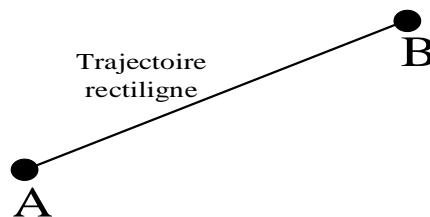


Figure III.3 Manœuvre rectiligne « en ligne droite »

$s(t)$: C'est une fonction lisse qui va permettre non seulement de définir l'évolution temporelle de la

charge, mais aussi la synchronisation des mouvements de celle-ci.

Comme $\dot{r}_d(t) = D \cdot \dot{s}(t)$ et $\ddot{r}_d(t) = D \cdot \ddot{s}(t)$, un choix approprié pour $s(t)$ permet d'assurer les conditions de départ et d'arrêt : $\dot{r}_d(t_0) = \dot{r}_d(t_f) = 0$ et $\ddot{r}_d(t_0) = \ddot{r}_d(t_f) = 0$.

III.3.2. Choix de la loi de mouvement

Il est à la responsabilité de la loi de mouvement de déterminer l'évolution dynamique de la charge. On distinguera dans la suite deux types de lois de mouvement qui sont appelées respectivement lois à accélération continue et lois bang-bang en accélération constante (accélération constante par morceau).

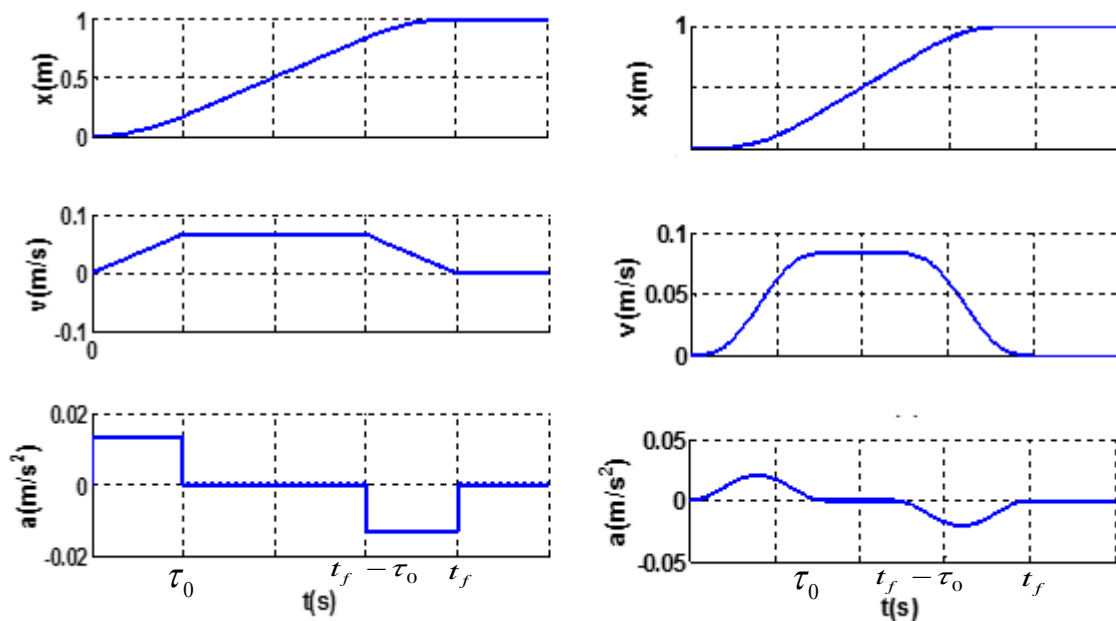


Figure III.4 Mouvement (gauche) bang-bang en accélération (droite) en accélération continue

Ces deux types de loi de mouvement (en accélération continue ou discontinue) sont entièrement caractérisés par le degré des polynômes utilisés, le nombre de ces polynômes, ainsi que par les valeurs des instants de commutation entre chacun des polynômes. Le choix du degré et d'ordre des polynômes ainsi que les instants de commutation, offre des degrés de liberté permettant d'optimiser la loi de mouvement par rapport à certains critères.

Les lois bang-bang doivent leur appellation à leur principe d'élaboration qui consiste à saturer la variable de commande du système, ou une de ses dérivées, en commutant un certain nombre de fois du niveau maximal au niveau minimal autorisé. La loi de mouvement résultante en position est donc composée d'une succession de courbes que l'on peut exprimer sous la forme d'une fonction polynomiale par morceaux (spline) [53].

En effet, les lois de mouvements Bang-Bang classiques à accélération constante par morceaux présentent des discontinuités que les asservissements ne peuvent suivre quelles que soient les

performances des actionneurs. Ces discontinuités contraignent la structure lors des phases transitoires et sont responsables, pour une grande part, de la dégradation du comportement dynamique et de la détérioration par fatigue des composants mécaniques.

Dans les commandes numériques de dernière génération, une solution de diminution de l'amplitude des oscillations passe par une action sur la valeur maximale du jerk (lissage de l'accélération du système). La valeur de jerk représente le taux de variation de l'accélération et, à ce titre, elle permet d'agir sur le « degré de douceur » du mouvement [55].

Le tableau ci-après montre une comparaison préliminaire entre 3 types de loi de mouvement. On constate que le lissage de l'accélération de la loi de mouvement permet d'améliorer l'évolution dynamique du système mais, il augmente le temps de fonctionnement du processus. Ce compromis doit être pris en compte lors de la conception d'une loi de mouvement.

Loi ou profil de commande	Avantages	Inconvénient
Loi tout ou rien en vitesse (accélération nulle)	<ul style="list-style-type: none"> - Vitesse maximale pour un déplacement donnée en un temps donnée - Simplicité maximale 	<ul style="list-style-type: none"> - Accélération théoriquement infinie. En pratique, l'évolution en vitesse n'est pas contrôlée dans les phases transitoires. - Précision d'arrêt difficile à obtenir
Loi trapèze ou triangle en vitesse (Bang-bang en accélération)	<ul style="list-style-type: none"> - Vitesse maximale et accélération maximale contrôlées par le profil - Simplicité 	<ul style="list-style-type: none"> - Jerk théoriquement infini : chocs mécanique
Lois à accélération continue	<ul style="list-style-type: none"> - Le jerk est contrôlé : pas de chocs et moins de vibration - Meilleur suivi des trajectoires 	<ul style="list-style-type: none"> - Lois plus complexes à élaborer - Accélération maximale supérieur requise par les autres lois. - Augmentation du temps de transfert.

Tableau III.1 Comparaison des performances entre différents types de lois de mouvement

Les tableaux III.2 et III.3 résument les différents paramètres caractérisant une loi de mouvement à vitesse trapézoïdale (accélération bang-bang) et une loi de mouvement à accélération continue. Ce sont les deux lois qui seront utilisées dans la suite de ce chapitre.

Type de loi	Expression	Continuité
Mouvement à vitesse trapézoïdale (accélération discontinue)	$\begin{cases} s(t) = S \frac{1}{2} \frac{1}{\tau_0(\tau - \tau_0)} t^2 & 0 < t < \tau_0 \\ s(t) = S \frac{1}{(\tau - \tau_0)} (t - \frac{\tau_0}{2}) & \tau_0 < t < \tau - \tau_0 \\ s(t) = S - S \frac{1}{2} \frac{1}{\tau_0(\tau - \tau_0)} (t - \tau)^2 & \tau - \tau_0 < t < \tau \end{cases}$	Classe C²
Mouvement à accélération continue	$\begin{cases} S_I = \frac{S}{\tau - \tau_0} \left(-\frac{5t^8}{2\tau_0^7} + \frac{10t^7}{\tau_0^6} - \frac{15t^6}{\tau_0^5} + \frac{7t^5}{\tau_0^4} \right) & 0 < t < \tau_0 \\ S_{II} = \frac{S}{\tau - \tau_0} \left(t - \frac{\tau_0}{2} \right) & \tau_0 < t < \tau - \tau_0 \\ S_{III} = S + \frac{S}{\tau - \tau_0} \left(\frac{5(\tau - t)^8}{2\tau_0^7} - \frac{10(\tau - t)^7}{\tau_0^6} + \frac{15(\tau - t)^6}{\tau_0^5} - \frac{7(\tau - t)^5}{\tau_0^4} \right) & \tau - \tau_0 < t < \tau \end{cases}$	Classe C⁴

Tableau III.2 Lois des mouvements (a) loi Bang-Bang en accélération (b) loi en accélération continue

	Loi de mouvement Bang-Bang	Loi de mouvement polynomiale
Phase d'accélération $t \in [0, \tau_0]$	<p>Accélération : Constante positif</p> $a = a_{\max} = \frac{1}{\tau_0(\tau - \tau_0)}$ <p>Vitesse : ligne droite de pente positive</p> $v_{\max} = \frac{1}{(\tau - \tau_0)} \quad \text{pour } t_{v_{\max}} = \tau$	<p>Accélération : forme de sinusoïde</p> $a_{\max} = \frac{1}{\tau_0(\tau - \tau_0)} \quad \text{pour } t_{a_{\max}} = \frac{\tau_0}{2}$ <p>Vitesse : Parabolique</p> $v_{\max} = \frac{1}{(\tau - \tau_0)} \quad \text{pour } t_{v_{\max}} = \tau_0$
mouvement à vitesse constante $t \in [\tau_0, \tau - \tau_0]$	<p>Accélération : Nul</p> <p>Vitesse : Constante</p> $v = \frac{1}{(\tau - \tau_0)} (m/s)$	<p>Accélération : Nul</p> <p>Vitesse : Constante</p> $v = \frac{1}{(\tau - \tau_0)} (m/s)$
Phase décélération $t \in [\tau - \tau_0, \tau]$	<p>Accélération : Constante négative</p> $a = -a_{\max} = -\frac{1}{\tau_0(\tau - \tau_0)}$ <p>Vitesse : ligne droite de pente positive</p> $v_{\max} = -\frac{1}{(\tau - \tau_0)} \quad \text{pour } t_{v_{\max}} = \tau$	<p>Accélération : forme de sinusoïde</p> $a_{\max} = -\frac{1}{(\tau - \tau_0)} \quad \text{pour } t_{a_{\max}} = \frac{\tau - \tau_0}{2}$ <p>Vitesse : Parabolique</p> <p>La vitesse s'annule pour $t_{v_{\max}} = \tau$</p>

Tableau III.3 Caractéristiques des lois de mouvement

D'où : $\tau = t_0 - t_f$ Représente le temps totale pour l'exécution d'une manœuvre.

τ_0 Représente le temps d'accélération (ou de décélération) de la charge.

$|s_{\min}|$ Représente la distance minimale pour voir les trois phases de mouvement.

III.4. Suivi des trajectoires

Dans cette section, la synthèse d'une commande par mode glissant d'ordre deux est développée pour assurer le suivi des trajectoires générées dont le modèle dynamique est de la forme :

$$\begin{cases} m_{11} \ddot{q}_1 + m_{12} \ddot{q}_2 + f_1(q, \dot{q}) = 0 \\ m_{21} \ddot{q}_1 + m_{22} \ddot{q}_2 + f_2(q, \dot{q}) = \tau \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Rappelons que q_1 représente la partie non actionnée du système commandé et q_2 représente la partie actionnée. Ainsi que $m_{11}, m_{12}, m_{21}, m_{22}, f_1(q, \dot{q}), f_2(q, \dot{q})$ et τ sont celles qui caractérisent l'équation (I.9) (chapitre I partie V) .

III.4.1. Préparation à la commande

Afin de présenter une stratégie de contrôle qui permet d'accomplir les contraintes présentées ci-dessus, on commence par faire une linéarisation partielle sur les équations du système (III.2) dans le but de réduire les dynamiques du système.

Dans [56], les auteurs ont montrés que la partie actionnée d'un système mécanique sous actionné peut être linéarisée. Cette procédure, appelée linéarisation partielle par bouclage statique (*Partial feedback linearisation*), simplifie les dynamiques, facilite la manipulation des équations et la synthèse des lois de commande [27].

Considérons la première équation de (III.2), comme la matrice m_{11} est réversible, on peut conclure que:

$$\ddot{q}_1 = -m_{11}^{-1} [m_{12} \ddot{q}_2 + f_1(q, \dot{q})] \quad (\text{III.3})$$

Par substitution de \ddot{q}_1 dans la deuxième équation de (III.2), on trouve que :

$$\overline{m}_{22} \ddot{q}_2 + \overline{f}_2 = \tau \quad (\text{III.4})$$

D'où $\overline{m}_{22} = m_{22} - m_{21} m_{11}^{-1} m_{12}$ et $\overline{f}_2 = f_2 - m_{21} m_{11}^{-1} f_1$

Finalement, comme représenté le schéma synoptique de la figure (III.5), en appliquant la commande $\tau = \overline{m}_{22} u + \overline{f}_2$ (ou u est la nouvelle entrée de commande), on obtient :

$$\begin{cases} m_{11} \ddot{q}_1 + f_1 = -m_{12} u \\ \ddot{q}_2 = u \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

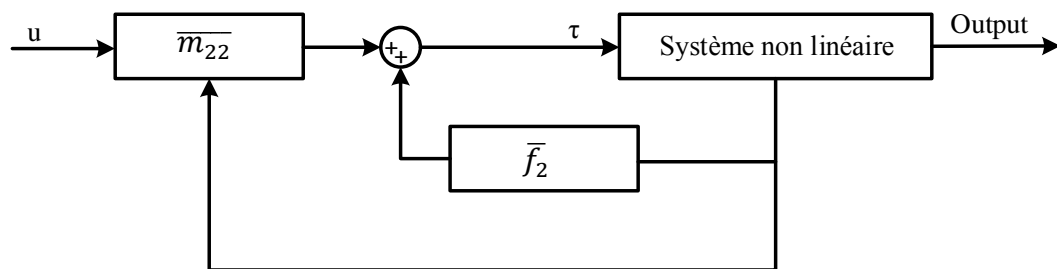


Figure III.5 Linéarisation partielle par bouclage statique

Dans ce nouveau système une partie est linéarisable du point de vue entrée-sortie (deuxième partie

de l'équation III.5), tandis que l'autre partie est non observable.

Le problème de *poursuite de trajectoire* consiste à déterminer une commande permettant de stabiliser asymptotiquement le vecteur d'erreur : $[e_1, \eta_1]$.

Avec : $\eta_1 = q_1$, $\eta_2 = \dot{q}_1$, $e_1 = q_2 - q_{ref}$, $e_2 = \dot{q}_2 - \dot{q}_{ref}$

Ou $q_{ref} = \begin{bmatrix} x_{ref} \\ y_{ref} \\ l_{ref} \end{bmatrix}$ désigne les trajectoires désirées par le pont roulant. Ainsi, le système (III.5) peut

être réécrit dans l'espace d'état sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 \\ \dot{e}_2 = u + d_0 \\ \dot{\eta}_1 = \eta_2 \\ \dot{\eta}_2 = -m_{11}^{-1} (f_1 + m_{12} u) \end{cases} \quad (III.6)$$

Avec $d_0 = -\ddot{q}_{ref}$

Dans le cadre de cette étude, l'hypothèse suivante doit être vérifiée : $|d_0| < a$ (a : constant positif).

A partir de ce point, notre but est la conception d'une loi de commande qui assure la stabilité et la robustesse du système décrit par l'ensemble d'équations (III.6).

En effet, la robustesse d'une commande à base d'un processus de linéarisation partielle par bouclage statique est limitée par la certitude du modèle qui représente la dynamique du système étudié. Ce problème peut être réglé par l'introduction d'une commande robuste telle que la commande par mode glissant.

III.4.2. Commande par mode glissant d'ordre deux

Généralement, la commande par mode glissant d'ordre supérieur est constituée de trois étapes principales [58] :

Etape1 : le choix de la surface de glissement.

Etape2 : la conception de la loi de commande.

Etape3 : la conception d'une loi de dérivation (differentiator design).

Etape1 : Surface de glissement

Afin de contraindre les contraintes fixées précédemment, on propose d'utiliser la surface de commutation de la forme générale suivante [57] :

$$\sigma = s_{ac} + k s_{unac} = e_1 - k \left[\eta_1 + h \int_0^t \eta_1 d\tau \right] \quad (III.7)$$

Ou : $\sigma \in \mathfrak{R}^m$ Représente le vecteur de la surface de glissement

s_{ac} : Est la partie de la surface de glissement qui permet de commander les degrés actionnés du pont roulant (commande de la position de la charge).

s_{unac} : Est la partie de la surface de glissement qui permet de commander les degrés non

actionnées du pont roulant (commande des balancements).

$[e_1, \eta_1, e_2, \eta_2]^T$: représentent le champ de vecteur d'erreur.

En utilisant $k = \begin{bmatrix} k_\theta & 0 \\ 0 & k_\beta \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, la surface de glissement (III.7) revient :

$$\begin{cases} \sigma_x = e_{1x} - k_\theta \left[\eta_{1\theta} + h_\theta \int_0^t \eta_{1\theta} d\tau \right] \\ \sigma_y = e_{1y} - k_\beta \left[\eta_{1\beta} + h_\beta \int_0^t \eta_{1\beta} d\tau \right] \\ \sigma_R = e_{1R} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

D'où k_θ et k_β sont des facteurs de couplages permettant de réaliser et de contrôler le système d'anti ballant.

Les auteurs dans [57] montrent qu'un bon choix de k_θ (k_β) permet d'introduire un effet d'amortissement artificiel pour les balancements qui sont apparus lors de la translation du portique.

Remarque

- La surface de glissement (III.7 / III.8) permet d'accorder une commande interactive simultanée entre le sous-système de positionnement défini par s_{ac} et le sous-système d'anti balancement défini par s_{unac} .
- Afin d'éviter des situations telles que l'abaissement dans la phase de levage ou le levage dans la phase d'abaissement, le système d'anti-balancement ne doit pas être commandé par l'entrée de levage τ_R .
- Pour assurer la stabilité du zéro dynamique du système représenté par la première (deuxième) équation de (III.8), la constante k_θ (et par conséquent k_β) doit être choisie positive [57-60].

Etape2 : Conception de la loi de commande

Puisque le système (III.8) admet un degré relatif égale à 2 par rapport à σ , en dérivant deux fois σ , on obtient :

$$\ddot{\sigma} = (I + k m_{11}^{-1} m_{12}) u + k m_{11}^{-1} (f_1 + m_{12} \eta_2) + d_0 \quad (\text{III.9})$$

Avec I est la matrice d'identité définie par $I = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$. Comme la matrice $(I + k m_{11}^{-1} m_{12})$ est

réversible, définissons également le retour d'état :

$$u = (I + k m_{11}^{-1} m_{12})^{-1} [v + k m_{11}^{-1} (f_1 + m_{12} \eta_2)] \quad (\text{III.10})$$

Où v est une nouvelle entrée de commande.

Avec l'utilisation de la commande (III.10), la dynamique de l'erreur de suivi (III.8) prend la forme d'un double intégrateur perturbé : $\ddot{\sigma} = v + d_0$ (III.11)

$$\text{Avec } d_0 = -\ddot{q}_{ref}$$

Le vecteur correspondant aux surfaces de glissements $\ddot{\sigma} = [\ddot{\sigma}_x \quad \ddot{\sigma}_y \quad \ddot{\sigma}_l]^T$ est donné donc par :

$$\begin{bmatrix} \ddot{\sigma}_x \\ \ddot{\sigma}_y \\ \ddot{\sigma}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \ddot{x}_{ref} \\ \ddot{y}_{ref} \\ \ddot{l}_{ref} \end{bmatrix} \quad (\text{III.12})$$

Avec \ddot{x}_{ref} : est l'accélération selon l'axe "x"
 \ddot{y}_{ref} : est l'accélération selon l'axe "y"
 \ddot{l}_{ref} : est l'accélération selon l'axe "z"

Par conséquent, le problème de commande devient à la stabilisation d'un système simple, qui est formé de trois doubles intégrateurs qui sont indépendant l'un de l'autre.

L'objectif de la commande sera atteint en utilisant des contrôleurs de type SOSMC-PD. En effet, comme on la déjà vu dans le chapitre II, la commande SOSMC-PD a une structure particulièrement bien adaptée à la stabilisation du « double intégrateurs ».

Pour chacune des directions de mouvement (direction, translation et levage), l'algorithme de réglage sera donné par :

$$\begin{cases} \dot{\sigma}_1 = \sigma_2 \\ \dot{\sigma}_2 = -k_{p\alpha} \sigma_1 - k_{d\alpha} \sigma_2 - r_{1\alpha} \text{sgn}(\sigma_1) - r_{2\alpha} \text{sgn}(\sigma_2) + d_{0\alpha} \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

Avec $\sigma_1 = \sigma_\alpha$, $\sigma_2 = \dot{\sigma}_\alpha$ Pour chacun des cas de α avec $\alpha = [x, y, l]^T$

D' où : $d_{0\alpha}$ Représente la deuxième dérivée de la trajectoire désirée.

$k_{p\alpha}$, $k_{d\alpha}$, $r_{1\alpha}$, $r_{2\alpha}$: sont les paramètres de commande.

Etape3 : Conception d'un dérivateur artificiel

Sachant que l'implémentation d'un tel contrôleur (SOSMC-PD controller) nécessite seulement le premier dérivé de la surface de glissement, un dérivateur basé sur le « super twisting algorithme » sera utilisé.

Considérons que $y(t)$ représente une fonction à dériver, le dérivateur de $y(t)$ est considéré comme étant la sortie du système discontinue défini par le couple d'équation :

$$\begin{cases} \dot{z}_0(t) = z_1(t) - \gamma_0 |z_0(t) - y(t)|^{\frac{1}{2}} \text{sgn}(z_0(t) - y(t)) \\ \dot{z}_1(t) = -\gamma_1 \text{sgn}(z_0(t) - y(t)) \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

Avec $\dot{y}(t) = \dot{z}_0(t)$

$$\begin{cases} \gamma_1 > C_2 \\ \gamma_1^2 > 4 C_2 \frac{\gamma_1 + C_2}{\gamma_1 - C_2} \end{cases} \quad (C_2 \text{ est la constante Lipschitz pour } y(t)) \quad (\text{III.15})$$

$$\gamma_0 = 1.5 C_2^{1/2}, \quad \gamma_1 = 1.1 C_2 \quad (\text{III.16})$$

La figure III.6 représente le schéma fonctionnel de l'approche de commande proposée. La procédure de commande est composée de trois blocs : le planificateur des trajectoires, le bloc de linéarisation partielle par bouclage statique « partial feedback linéarization » et la commande par mode glissant d'ordre deux.

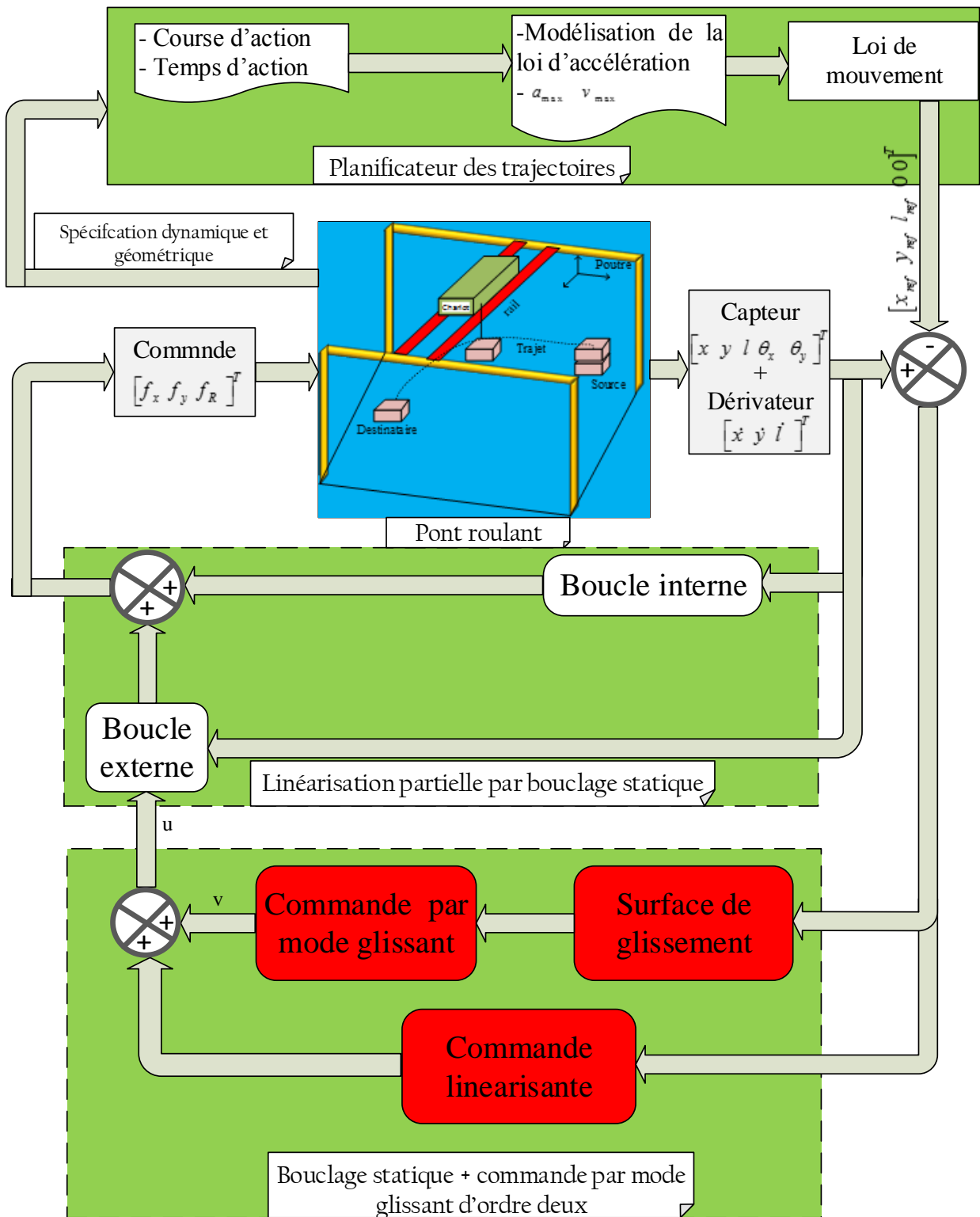


Figure III.6 Schéma simplifié de la stratégie de commande

III.5. Simulation

Pour illustrer les performances de l'approche proposée, des résultats simulés sous l'environnement Matlab/Simulink seront présentés par la suite.

Le modèle de simulation est développé autour d'une présentation non linéaire du pont roulant. Cette

présentation a été proposée par « INTECO » (ANNEXE B «INTECO 3D crane »).

Les tests seront effectués avec les paramètres suivants (s'il n'y a pas d'exceptions) :

Masse du chariot	Masse du rail	Masse de la charge transportée	Longueur initial du cable	Gravité
20 kg	20 kg	10 kg	6 meters	10 m/s ²

Tableau III.4 Paramètres dynamique du système

Trois dérivateurs artificiels par mode glissant ; comme le montre les équations III.15- III.16 ; sont implémentés pour estimer les vitesses de la charge selon les trois axes de mouvement. Ces trois dérivateurs seront caractérisés par les mêmes paramètres : $\gamma_0 = 12$, $\gamma_1 = 6$

a. Réglage du système de commande :

Cette partie a pour but de mettre en évidence les différents algorithmes qui caractérisent l'approche de commande proposée. Pour des raisons de simplification, le modèle de système étudié dans cette partie correspond au modèle simplifié qui assure les fonctions de translation et de levage d'un pont roulant avec les paramètres de commande suivants :

Type de commande	Axe-y	Axe-z
Commande continue	$k_{py} = 22.32$	$k_{pR} = 20$
	$k_{dy} = 5.15$	$k_{dR} = 10$
Commande discontinue	$r_{1y} = 2$	$r_{1R} = 2$
	$r_{2y} = 1$	$r_{2R} = 1$

Tableau III.5 Paramètre de commande pour un modèle simplifié

Pour minimiser le phénomène du broutement la fonction $sign(s)$ a été remplacée par la fonction $sat(\frac{s}{\phi})$, d'où ϕ est constant positif.

1. réglage d'anti-ballant :

Pour évaluer l'effet des facteurs de couplage (K_θ et K_β), on considère que le système est en état stationnaire, mais avec des angles de balancements non nuls $\beta_0 \neq 0$. Puis, on effectuera des tests avec différentes valeurs pour K_β . Les résultats de simulation sont donnés par la figure III.7. Après une analyse de cette figure, on peut conclure :

- Que l'implémentation de K_β permet d'annuler les oscillations de la charge après un temps de régime transitoire.
- Que l'augmentation de K_β permet de minimiser le temps du régime transitoire, mais avec un risque d'augmentation de l'erreur de suivi en régime permanent.

Pour cela dans ce qui suit, on a fixé : $K_\theta = K_\beta = 3$

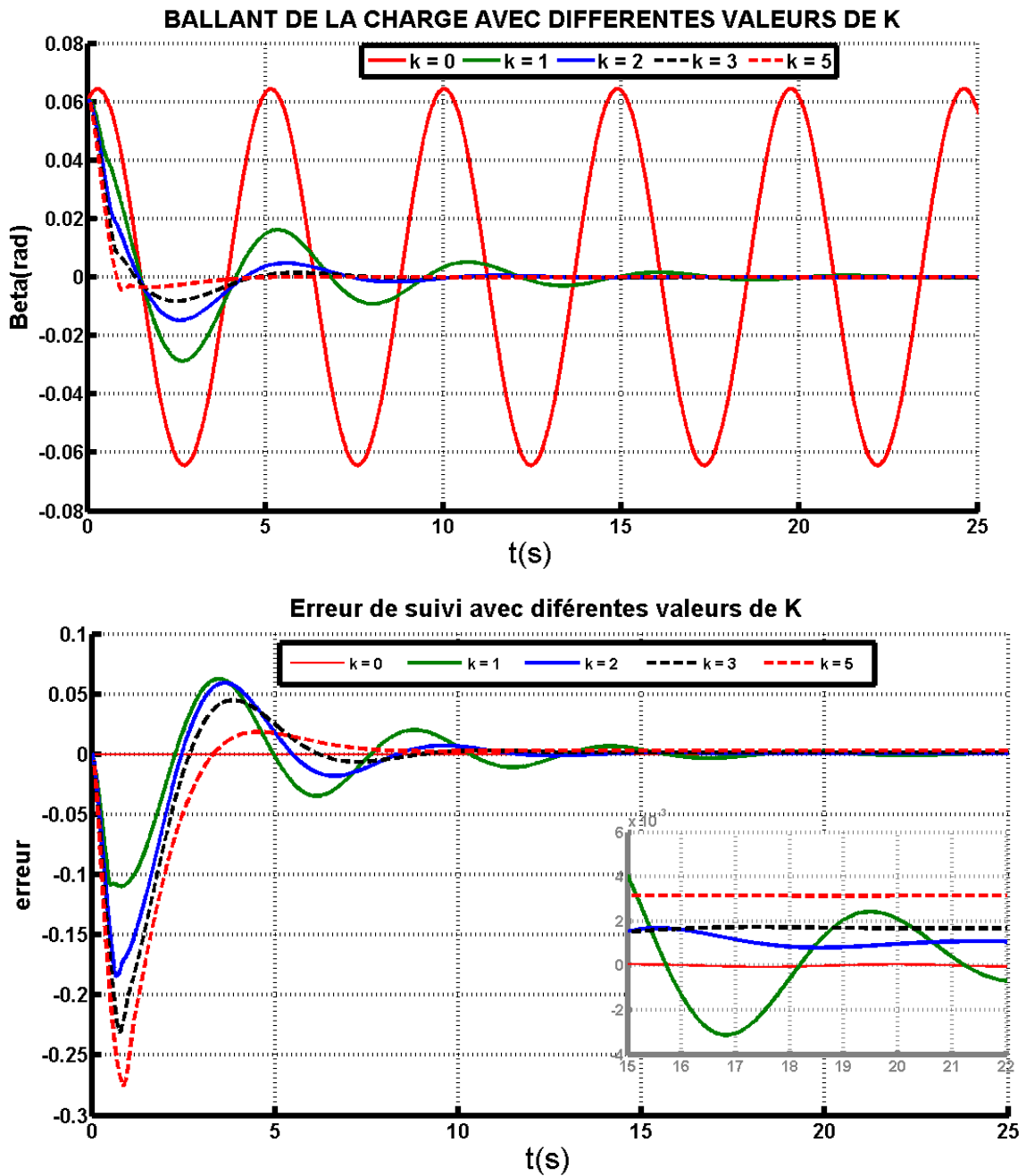


Figure III.7 Angle de balancement et erreur de suivi pour différentes valeurs de K_{θ}

2. Choix du profil du mouvement :

Les simulations réalisées dans cette partie ont pour objectif de comparer l'influence des deux types de loi de mouvement sur le comportement dynamique du pont. Pour cela, trois stratégies de mouvements seront testées :

- ✓ fonctionnement en mode de régulation.
- ✓ Commande avec une loi de mouvement bang-bang en accélération.
- ✓ Commande avec une loi de mouvement à accélération continue.

Dans les deux derniers cas, le temps d'exécution d'une tâche complète sera fixé égale à $T=20$ s. Le temps d'accélération (ou de décélération) est fixé à 5s pour le profil à vitesse trapézoïdale et à 8s

pour le profil défini par la fonction $s(t)$. Une valeur maximale acceptable de l'angle de balancement a été fixée égale à 0.06 rad.

Le but de la commande est le transfert d'une charge d'un point de départ $A(0, 0, 6)$ à un point cible $B(0, 24, 3)$.

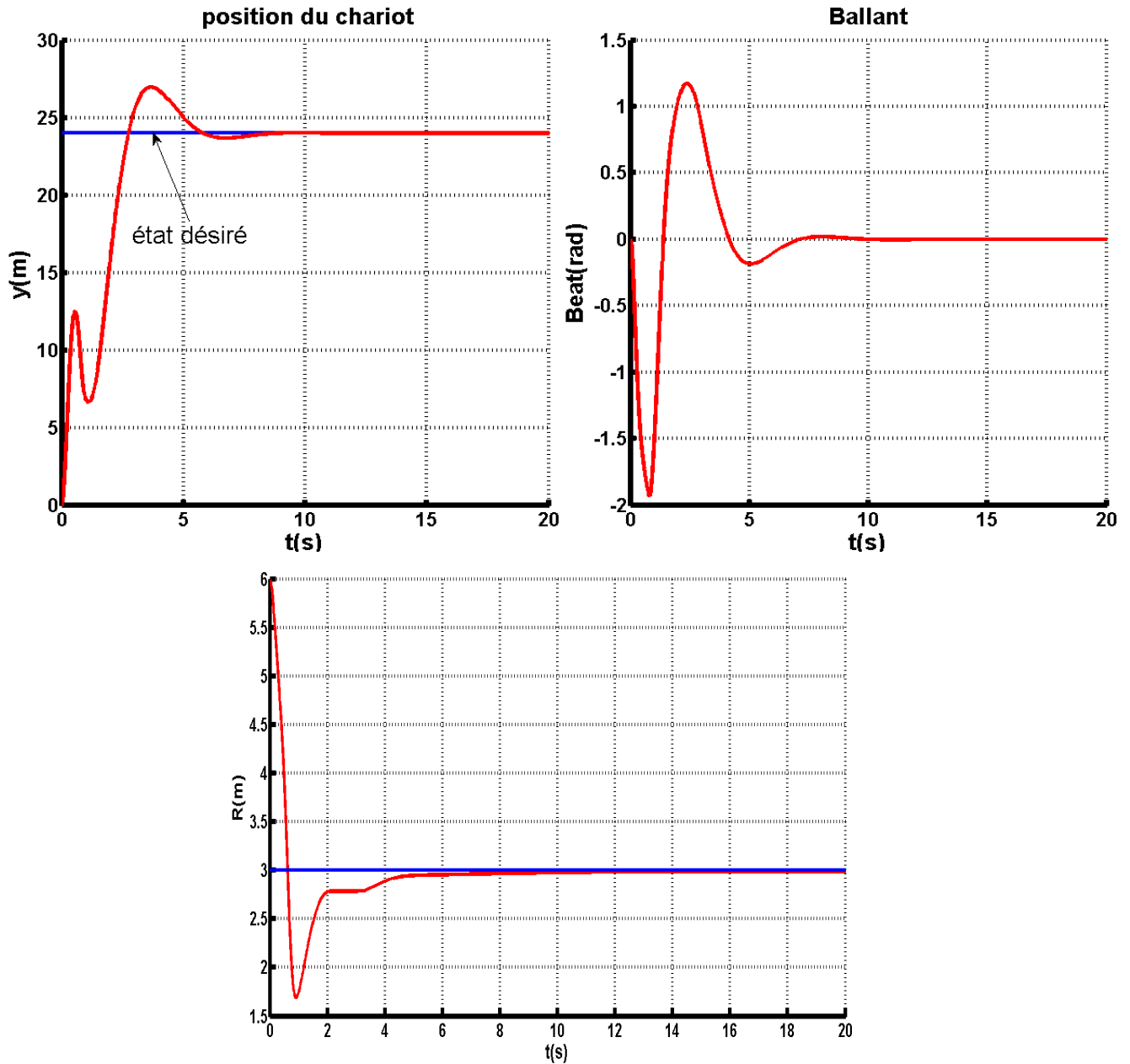


Figure III.8 Evolution de la charge en mode de régulation

La figure III.8 représente l'évolution de la charge pour un déplacement libre. Pour des déplacements avec des trajectoires pré-calculées, des résultats de simulation sont représentés la figure III.9.

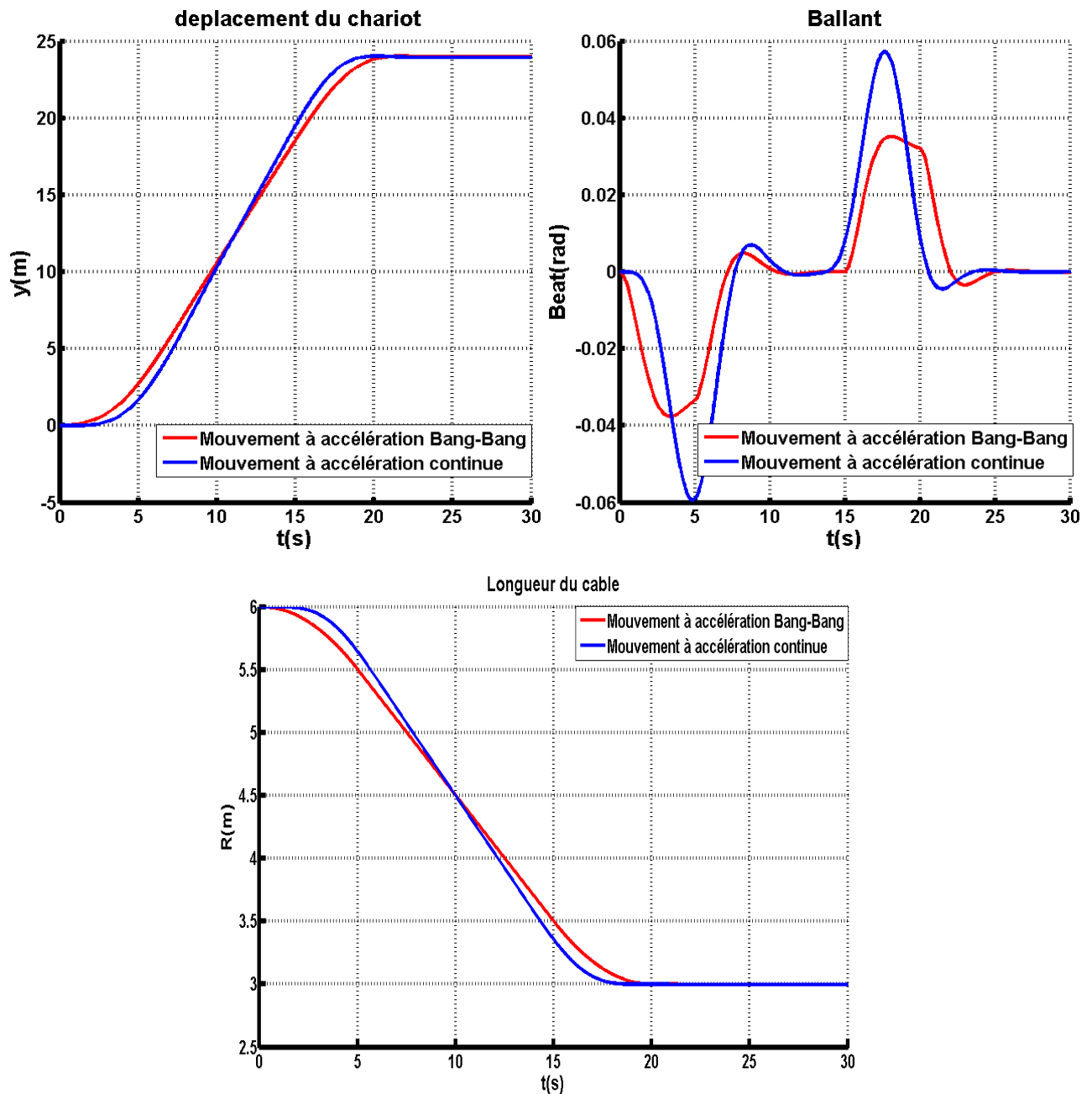


Figure III.9 Evolution de la charge avec les deux profils de mouvement

Après une analyse de ces résultats, on constate tout de suite que :

- ✓ Le cas le plus défavorable correspond (avec cette technique de commande) à une régulation libre. Ce mode est dit alors agressif puisque, il provoque :
 - De grandes ondulations (plus de 0.4 rad) au démarrage de la séquence de la manutention.
 - D'indésirables dépassements à la fin de la manipulation de la charge.
- ✓ Un déplacement par une loi de mouvement pré-calculée permet d'annuler le dépassement et d'atténuer considérablement les ballants de la charge.
- ✓ Le compromis temps de cycle/comportement oscillatoire est facilement géré par le choix des différents paramètres qui caractérisent la loi de mouvement.

- ✓ Le mouvement effectuée avec un profil bang-bang en accélération est le moins oscillatoire (angle de balancement minimale), ce qui permet de minimiser le temps d'exécution. Concernant l'atténuation des ballants, Le deuxième profil de mouvement est plus rapide que le profil bang-bang en accélération.

Toujours dans le but de sélectionner le meilleur profil de mouvement. Cette fois, la qualité des signaux de commande est la grandeur retenue pour représenter l'influence de chacun des profils sur le comportement dynamique de la structure mécanique. Les résultats obtenues en simulation sont représentées figure III.10.

Pour un profil de mouvement de type vitesse trapézoïdale, les signaux de la commande générée sont caractérisés par des variations brusques (au instant de commutation), contrairement au profil de mouvement à accélération continue qui génère des signaux de commande très lisses (si le phénomène de broutement « chattering » est éliminé).

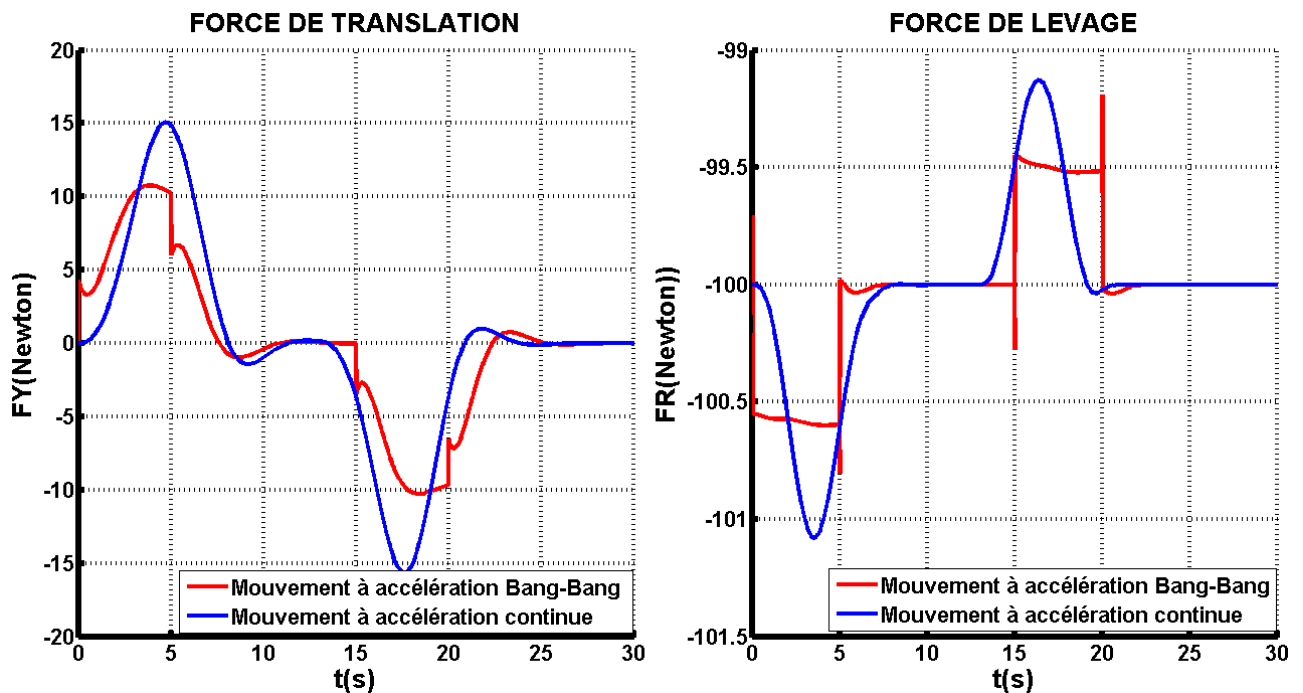


Figure III.10 Forces générées pour manipuler la charge avec les deux profils de mouvement

L'utilisation d'un profil de mouvement continue (d'ordre élevée) permet comme on s'y attendait un suivi de trajectoire quasiment parfait lors du déplacement. Une bonne qualité des signaux de commande est en lien direct avec la continuité des trajectoires de référence et ses dérivées.

b. Robustesse de la loi de commande :

Cette partie a pour but de mettre en évidence la stabilité et la robustesse des approches de commande proposées (commande SOSMC + trajectoire prédéfinie) face aux variations paramétriques du pont et de la charge. Pour cela, trois tests ont été effectués. Ils correspondent à :

- ✓ Une commande quasi homogène discontinue :

Les différentes valeurs des paramètres qui caractérisent les lois de commande appliquées sont exprimées dans le tableau III.6.

Type de commande	Axe x	Axe y	Axe z
Commande continue	$k_{px} = 10$	$k_{py} = 10$	$k_{pR} = 9$
	$k_{dx} = 6.9$	$k_{dy} = 6.0$	$k_{dR} = 7$
Commande discontinue	$r_{1x} = 2$	$r_{1y} = 2$	$r_{1R} = 2$
	$r_{2x} = 1$	$r_{2y} = 1$	$r_{2R} = 1$

Tableau III.6 Paramètres des contrôleurs

- ✓ Une commande purement continue : dans ce cas, la partie discontinue de loi de commande sera annulée, c.à.d. que $r_{1\alpha} = r_{2\alpha} = 0$.

Les trajectoires de référence correspondent à un déplacement de la charge d'un point de départ $A(0, 0, 6)$ à un point cible $B(18, 24, 3)$ sont obtenues en appliquant la relation générale (III.1). Le compromis temps de cycle/comportement oscillatoire est géré par la sélection des paramètres du profil de mouvement $s(t)$. Le temps de transfert sera fixé à 20s, le temps d'accélération à 8s.

La figure III.11 représente des résultats simulés pour un pont roulant influencé par une dynamique externe de la forme :

$$T_f = \alpha \cdot \begin{bmatrix} 0.5 + \text{sign } \dot{x} + 0.7 \sin^2 \dot{x} \\ 0.5 + \text{sign } \dot{y} + 0.7 \sin^2 \dot{y} \\ 0.5 + \text{sign } \dot{R} + 0.7 \sin^2 \dot{R} \end{bmatrix} \text{ Avec } m \text{ sera choisi } \alpha = 5$$

- ✓ Pour compléter avec les tests de la robustesse, on suppose que la charge est mal identifiée, c.à.d. que $m = m_r \mp \Delta m$ d'où m_r représente la valeur réelle de la charge transportée et Δm est qui exprime la variation de cette charge.

Des résultats de simulation avec les deux types de commande (continue et discontinue) sont présentés la figure III.12.

Ces résultats permettent de mettre en évidence l'efficacité de l'approche proposée sur la stabilité et la robustesse du pont. L'implémentation d'un contrôleur de type Twisting-PD améliore ; comme on s'y attendait ; considérablement la robustesse du système commandé.

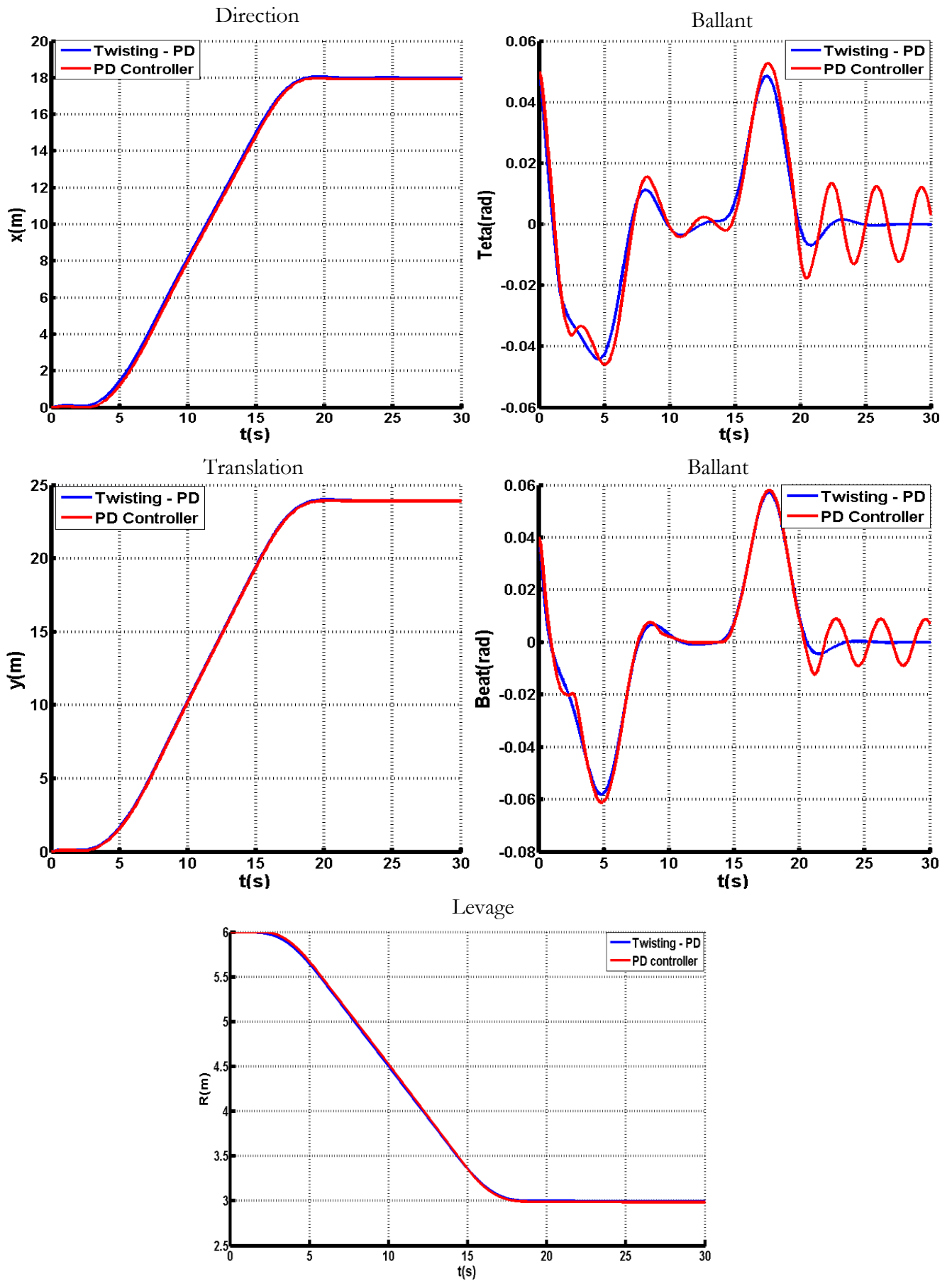


Figure III.11 Evolution de la charge avec deux lois de contrôle

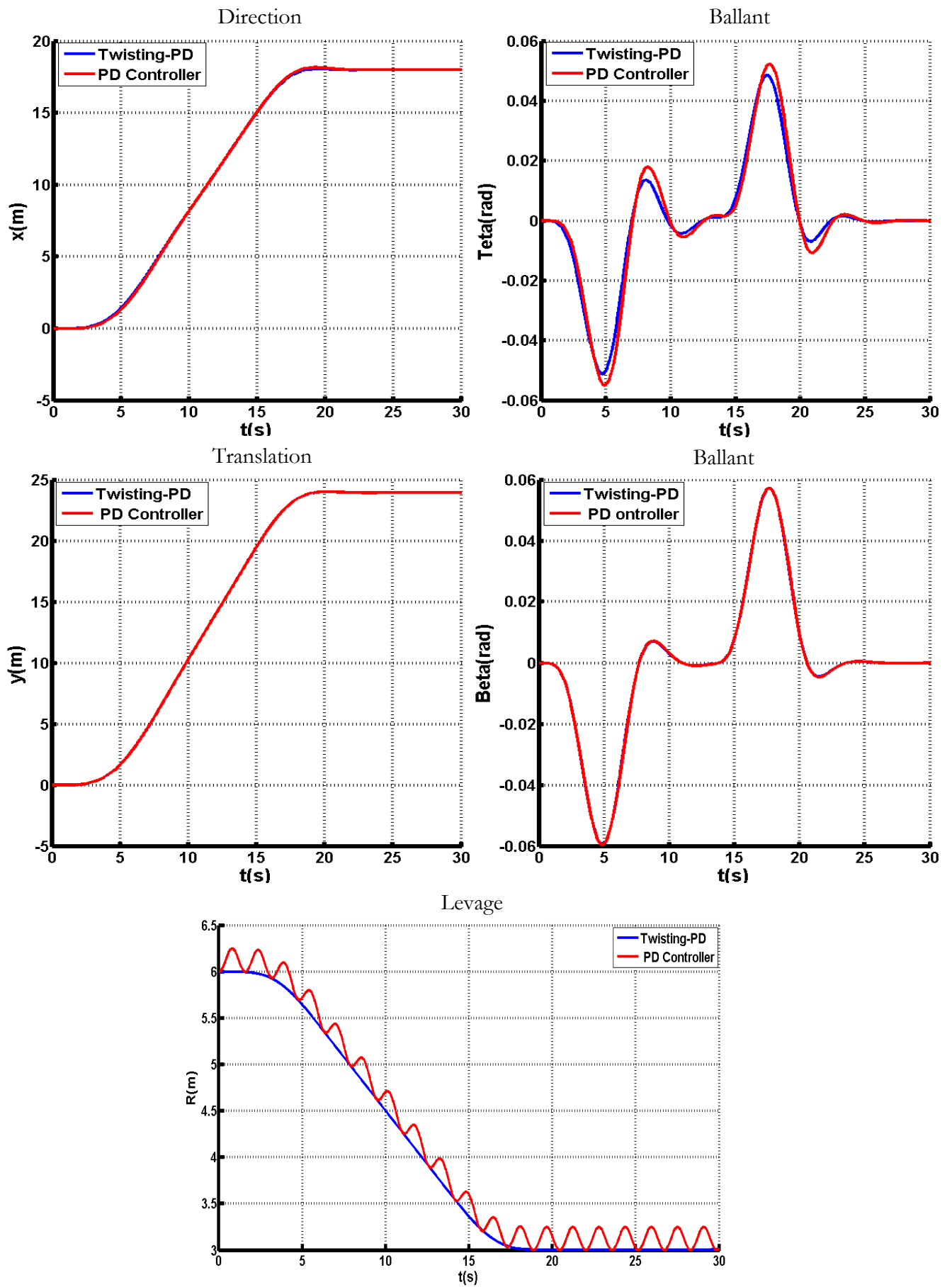


Figure III.12 Evolution d'une charge mal définie avec deux lois de contrôle

III.6. Conclusion

On a pu voir dans ce chapitre qu'un bon choix des trajectoires assurant la manutention des objets via un pont roulant qui opère dans des milieux libres (sans obstacles) permet d'aider la charge pour rejoindre un but bien défini avec une atténuation considérable des balancements et des dépassements. La méthode proposée dans ce chapitre permet de régler le compromis (temps de cycle/ comportement oscillatoire).

Un algorithme de commande qui est basé sur la combinaison de deux types de commande est proposé. Comme la technique de commande dite linéarisation partielle par bouclage statique (PARTIAL FEEDBACK LINEARISATION) permet de réduire la complexité du système considéré, la commande par mode glissant ; SOSMC-PD Controller ; permet de garantir l'attractivité, la stabilité ainsi que la robustesse du système asservi.

Des simulations numériques permettent de voir l'effet de la méthode proposée sur l'efficacité et les performances du pont.

L'application d'une telle méthode de commande (planification + suivi) est limitée par le fait que l'espace de travail doit être libre de tous obstacles. Dans le cas contraire, des efforts supplémentaires ; surtout dans le domaine de coordination du mouvement ; sont exigés.

Chapitre IV

EVITEMENT D'OBSTACLES

IV.1. Introduction

Une partie essentielle de l'autonomie des ponts roulants réside en la capacité à planifier des trajectoires admissibles assurant des déplacements sans collision dans un environnement particulier. Cet environnement contient généralement des zones dans lesquelles le robot ne peut pas se déplacer. Ces zones peuvent être stationnaires (connues a priori) ou dynamique (détectées lorsque le robot se déplace). Deux cas de figure se présentent alors :

Planification avec des connaissances a priori (hors ligne) : dans ce cas l'environnement doit être représenté par un modèle géométrique qui contient des informations tels que le nombre, la forme et la position des obstacles.

Planification sans connaissance a priori (en ligne) : Dans ce cas la détection et l'évitement d'obstacles se fait au cours du déplacement de la charge. Ce type de système exige une modification de la trajectoire le plus vite que possible.

D'une manière générale, le calcul des trajectoires doit assurer à tout moment la stabilité du système et prendre en compte les diverses contraintes du problème telles que les contraintes dynamiques et géométriques du modèle.

L'objectif de ce chapitre est de proposer une méthode de planification des mouvements d'un pont roulant. Ce pont exécute la tâche de déplacement des objets bien définis dans un environnement encombré bien déterminé. Cette méthode est orientée de manière à régler le problème de compromis entre le problème d'optimisation des trajectoires planifiées et le problème d'optimisation du temps d'exécution d'une telle tâche. Elle permet d'aider la charge pour rejoindre un but bien défini avec la faculté d'évitement d'obstacles et de limiter les oscillations de celle-ci.

Pour l'évitement d'obstacles, la définition de la trajectoire de référence est obtenue par l'ajout de points de passages entre la configuration de départ et la configuration cible. Les algorithmes proposés par la suite permettent d'assurer le passage par ces points ainsi que le contrôle de l'évolution dynamique et temporelle de la charge. Une grande partie de ces algorithmes vient de la robotique où la génération des points de passage, l'évitement d'obstacles et la génération des trajectoires de références sont des caractéristiques prioritaires.

Le contrôleur étudié dans le chapitre précédent sera considéré comme une solution pour assurer le

suit des trajectoires générées.

Le reste du chapitre VI est structuré comme suit : dans une première étape, on discutera le problème de la planification des trajectoires sous des contraintes dynamique et géométrique. Dans la deuxième section, des notions de base dans le domaine de la planification des mouvements des robots sont exposées. Les différents algorithmes utilisés lors du développement de la méthode de planification seront détaillés dans la troisième section.

Une analyse de l'évolution des principales variables décrivant le comportement du système global (position de charge, angle de balancement) et la robustesse de la technique de commande est mise en valeur par plusieurs essais de simulation numérique en dernière étape.

IV.2. Formulation du problème

IV.2.1. Description

Quand la manutention des charges dans des milieux encombrés fait partie du travail des ponts roulants, il est de la responsabilité d'opérateur de s'assurer que ce travail se passe en toute sécurité. Pour un pont roulant autonome, la charge doit être capable de se déplacer d'un point à l'autre en trouvant des chemins efficaces et sécuritaires afin d'éviter les collisions avec les obstacles.

La figure IV.1.a montre la séquence ; une projection dans le plan (x, y) ; de fonctionnement d'un pont roulant dans un environnement jonché d'obstacle. La charge suspendue suit un chemin spécifique entre une configuration de départ (A) et une configuration cible (B), c'est la solution la plus simple.

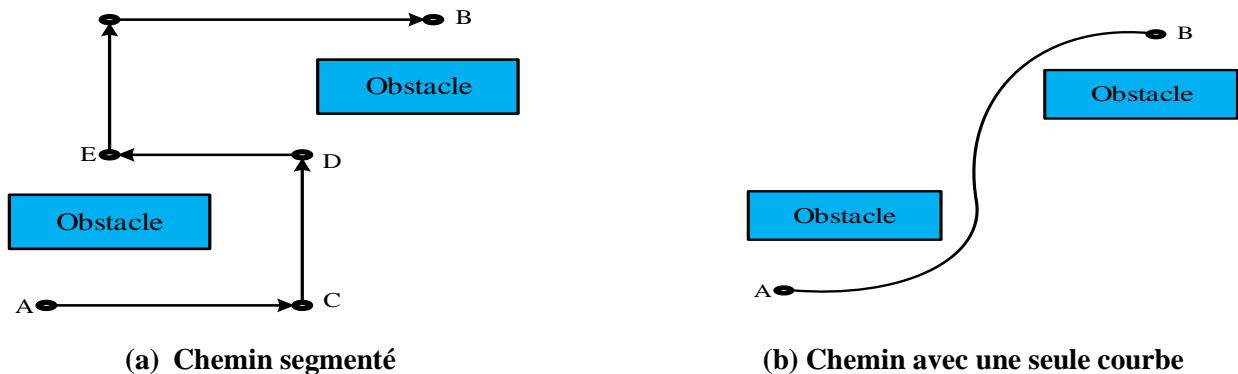


Figure IV.1 Espace de travail jonché d'obstacles

Le chemin généré entre A et B est composé d'une suite de segments linéaires. Chacun des segments est exécuté selon l'algorithme décrit dans le chapitre précédent avec des mouvements rectilignes. Ces chemins ne peuvent être suivis précisément qu'à condition que cette charge stoppe à chaque discontinuité de la courbure (point C, D, E, \dots), ces arrêts constituent une perte considérable du temps du cycle en plus des balancements engendrés au démarrage de chaque séquence. Pour l'asservissement des ponts roulants, il serait donc nettement préférable de proposer un chemin offrant une courbure continue, une imagination d'une telle courbure est montrée à la figure IV.1.b.

Cependant, la définition d'un chemin ne suffit pas à spécifier un mouvement. Un mouvement peut apparaître géométriquement correct mais inapproprié dynamiquement. Un autre paramètre important à maîtriser lors de la création d'un mouvement est la dynamique de celle-ci.

IV.2.2. Rappel sur les contraintes de commande

Le guidage des charges transportées via un pont roulant le long des trajectoires ; même en absence d'obstacle, nécessite la génération des courbes très lisses. La solution du plus court chemin n'étant plus privilégiée, de nouveaux critères de qualité représentant la régularité des chemins sont introduits [17, 21].

En effet, comme le montre les chapitres I et III, le problème de génération des trajectoires peut être formulé comme étant un problème de satisfaire des contraintes suivantes :

- Le caractère lisse des trajectoires générées doit être respecté par tous les modèles de mouvement.
- Les limites des vitesses et accélérations doivent être respectées pour des raisons de sécurité et de conformité (contraintes cinématiques).
- Tous en minimisant le plus possible le temps de transfert.

En présence d'obstacles, la recherche d'une trajectoire admissible entre deux configurations est plus ardue puisque l'espace libre entre les points de passage est limité. Une courbe admissible, qui établit la liaison entre deux points, doit alors intégrer cette contrainte spatiale supplémentaire afin d'éviter les collisions.

IV.2.3. Ponts roulants et robots

Comme le montrent les auteurs de [7,61, 62], le problème de la planification des trajectoires assurant le fonctionnement d'un pont roulant est plus similaire à celle de planification pour les robots. Quand le pont roulant joue le rôle d'un bras manipulateur d'un robot, la charge est considérée comme étant l'objet du même bras.

Dans ce chapitre, l'approche de la robotique sera proposée pour résoudre le problème de la planification des trajectoires pour les portiques.

En effet un pont roulant autonome consiste de 3 processus principaux : un processus de visualisation, un processus de planification et finalement un système de commande.

Le processus de visualisation consiste à pré compiler l'espace de travail du pont « pour la conception d'une road-map » afin d'aider le pont à bien identifier son environnement.

Le système de la planification consiste à déterminer ; à partir des données du processus de visualisation ; la meilleure trajectoire prenant en compte les différentes contraintes du système.

Le processus de commande a pour rôle d'assurer le suivi des trajectoires générées.

IV.2.4. Problématique

Dans un milieu encombré bien déterminé, étant donnée une configuration de départ q_0 et une configuration finale q_f , un temps d'exécution T , on recherche une trajectoire qui est admissible pour le pont roulant, qui relie ces configurations et qui évite les obstacles. La trajectoire r_d est donc une trajectoire solution si, et seulement si :

- r_d est sans collision avec les obstacles.
- r_d relie les points de départ et d'arrivée avec un seul courbe (un seul chemin), et donc vérifie

$$q(t_0) = q_0, q(t_f) = q_f. \quad (IV.1)$$

D'où $t_f - t_0 \leq T$

- r_d respecte les contraintes cites dans le paragraphe IV.2.2.

IV.3. Généralité sur la planification des trajectoires pour les robots [23]

Dans cette partie, on introduit quelques outils pour représenter la situation et le mouvement d'un corps dans espace \mathbb{R}^3 .

IV.3.1. Le Chemin [23]

Un chemin entre une situation initiale X_I et une situation finale X_F est une représentation géométrique du déplacement du corps qui ne considère pas le temps. Soit u un paramètre tel que ($u \in [u_{min}, u_{max}]$) ; le chemin est défini par une fonction continue $P(u)$ de $[u_{min}, u_{max}]$ dans \mathbb{R}^n telle que $P(u_{min}) = X_I$, $P(u_{max}) = X_F$ et n la dimension de l'espace considéré.

L'abscisse curviligne d'un chemin de classe C^1 et régulier (vecteur dérivé non nul en chaque point) permet de paramétrer un chemin par sa longueur. L'abscisse curviligne s d'un chemin P est la fonction strictement croissante de $[u_{min}, u_{max}]$ dans \mathbb{R} telle que si u_1 et u_0 sont deux éléments de $[u_{min}, u_{max}]$ vérifiant $u_0 < u_1$, alors $s(u_1) - s(u_0)$ est la longueur du chemin P de u_0 à u_1 (figure IV.2) :

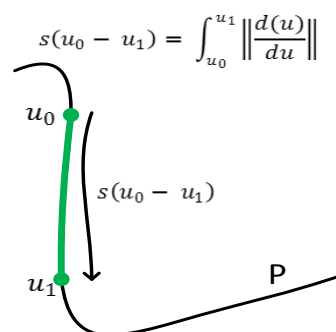


Figure IV.2Abscisse curviligne

Un chemin de X_I à X_F peut être également représenté par une suite de sous chemins définis entre des points du chemin (points de passages). Par exemple si X_1 et X_2 sont des points du chemin $(X_I ; X_F)$, ils permettent de définir trois sous chemins : $(X_I ; X_1)$, $(X_1 ; X_2)$ et $(X_2 ; X_F)$.

Deux classes de chemins définis par une série de points sont très souvent rencontrés : l'interpolation et l'approximation (figure IV.3). L'interpolation consiste à générer un chemin passant par l'ensemble des points intermédiaires tandis que l'approximation consiste à calculer un chemin passant proche des points intermédiaires.

Pour interpoler les points du chemin, les Splines cubiques (suite de courbes polynomiales cubiques) ont été la première méthode mise au point pour le domaine de la conception mécanique. Les courbes de Béziérs sont très utilisées pour l'approximation.

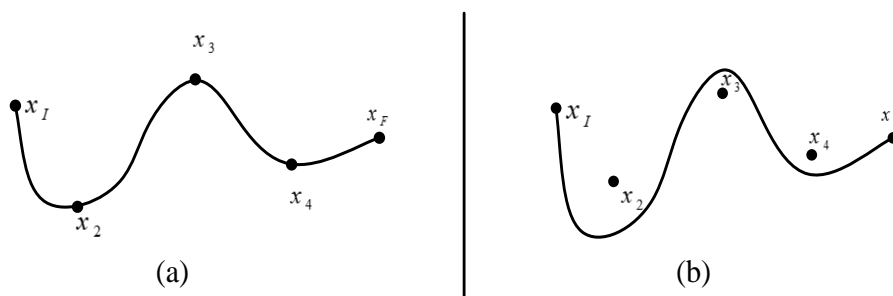


Figure IV.3 Un chemin interpolé (a) et un chemin approximé (b)

IV.3.2. Les splines cubiques

Dans les problèmes d'interpolation, la méthode des Splines est souvent préférée à l'interpolation polynomiale [62]. Des détails mathématiques d'algorithmes d'interpolations sont exprimés par la suite.

Soient $x_1 < \dots < x_n$ n points d'un intervalle $[a, b]$. Une fonction g définie sur $[a, b]$ est une Spline cubique si les deux conditions suivantes sont satisfaites :

1. Sur chaque intervalle $(a, x_1), (x_1, x_2), \dots, (x_n, b)$ g est un polynôme cubique.
2. La fonction g est deux fois continument différentiables sur $[a, b]$ (et donc g et ses dérivées d'ordre 1 et 2 sont continués aux points x_i). Les points x_i sont appelés des nœuds.

Il y a de nombreuses façons essentiellement équivalentes de définir des Splines cubiques. La façon la plus naturelle est d'exprimé :

$$g(x) = a_i(x - x_i)^3 + b_i(x - x_i)^2 + c_i(x - x_i) + d_i \quad x_i < x < x_{i+1} \quad (IV.2)$$

$$a_i, b_i, c_i, d_i \quad (i \in [0, \dots, n])$$

Ou $a_i, b_i, c_i, d_i \quad (i \in [0, \dots, n])$ sont des constantes ; on définit dans la suite

$$x_0 = a \quad x_{n+1} = b \quad h_i = x_{i+1} - x_i$$

La continuité de g et de ses deux dérivées implique différentes relations entre les coefficients. Par exemple, la continuité de g au point x_{i+1} implique que, pour $i \in [0; \dots; n-1]$:

$$x_i a_i (x - x_i)^3 + b_i (x - x_i)^3 + c_i (x - x_i) + d_i = d_{i+1} \quad (\text{IV.3})$$

Une spline cubique sur l'intervalle $[a, b]$ sera dite *naturelle* si les dérivées d'ordre 2 et 3 au point a et b sont nulles. Dans un tel cas, les paramètres d'interpolation sont donnés par [62] :

$$\begin{aligned} a_i &= (S_{i+1} - S_i) / 6h_i \\ b_i &= S_i / 2 \\ c_i &= \frac{y_{i+1} - y_i}{h_i} - \frac{2h_i S_i + h_i S_{i+1}}{6} \\ d_i &= y_i \end{aligned} \quad (\text{IV.4})$$

Où S_i représente la solution de l'équation :

$$\begin{bmatrix} 2(h_1 + h_2) & h_2 & & & \\ h_2 & 2(h_2 + h_3) & \ddots & & \\ & \ddots & \ddots & h_{n-2} & \\ & & h_{n-2} & 2(h_{n-2} + h_{n-1}) & \\ & & & & S_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_2 \\ S_i \\ \vdots \\ S_{n-1} \end{bmatrix} = 6 \begin{bmatrix} \frac{y_3 - y_2}{h_2} - \frac{y_2 - y_1}{h_1} \\ \vdots \\ \frac{y_n - y_{n-1}}{h_{n-1}} - \frac{y_{n-1} - y_{n-2}}{h_{n-2}} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.5})$$

IV.3.3. La trajectoire [23]

Un mouvement (ou trajectoire) caractérise le déplacement d'un repère au cours du temps est défini par *un chemin P* et *une loi d'évolution continue s(t)*. Une trajectoire $T_R(t)$ représentant un déplacement de X_I à X_F sur le chemin P est une fonction continue du temps t tel que :

$$t \in [t_I; t_F]: T_R(t) = P(s(t)) \text{ Avec } s(t) \text{ fonction continue de } R \rightarrow R, T_R(t_I) = X_I \text{ et } T_R(t_f) = X_f.$$

Une planification multidimensionnelle peut nécessiter de synchroniser temporellement l'ensemble des axes du mouvement.

IV.3.4. Planification de trajectoire

On appelle planification de trajectoire, le calcul d'une trajectoire admissible et sans collision pour un robot entre une configuration de départ et une configuration d'arrivée données [25]. Une trajectoire est dite admissible si elle est solution du système d'équations différentielles correspondant au modèle du robot, incluant les contraintes sur les commandes, pour des conditions initiales et finales données.

IV.4. Algorithme de planification

IV.4.1. Planification du chemin

Le chemin du mouvement de la charge est caractérisé par un ensemble de points de passage, ce qui permet de découper la route en plusieurs segments. Des points de passage successifs sont sélectionnés de manière qu'ils soient loin de tous les obstacles.

Pour la planification du chemin et la sélection des points de passage, il existe plusieurs techniques de planification, tel que la méthode de décomposition cellulaire et la méthode du champ potentiel. Dans le cadre de cette étude, on ne portera aucune attention à cette étape de création d'une *roadmap*.

On note que le chemin r_d peut-être défini par l'ensemble des points de passage suivants :

$$r_d = (P_i | P_i = [x_i \ y_i \ z_i], i = 0, 1, \dots, N) \quad (\text{IV.6})$$

D'où :

- N : représente le nombre des sections du chemin.
- P_1 et P_N doivent être coïncidants avec les états initial et final respectivement.
- $\forall i \in \{1, 2, \dots, N-1\} P_i \in C_{free}$: sont des points de passage, avec C_{free} représente la partie admissible dans l'espace de travail.

On s'intéressera par la suite à la recherche des trajectoires assurant le passage par ces points de passage dans des instants prédéfinies. C'est ce qu'on appelle le problème de génération des trajectoires avec des points intermédiaire « Trajectory generation with via points » [63].

IV.4.2. Approximation chordale « chordal paramétrization »

Dans le but d'établir une interpolation du chemin planifié dans le plan (x, y, z) , une représentation paramétré proportionnellement à la distance h ; comme le montre la figure IV.4 h représente la distance euclidienne entre deux points successif de passage dans l'espace (x, y, z) ; est initialement utilisée.

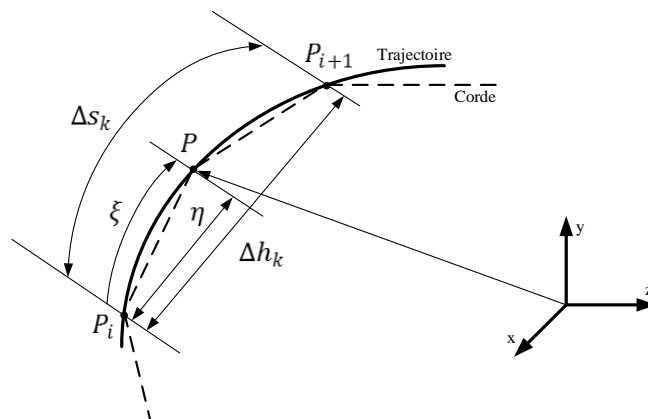


Figure IV.4 Paramétrisation cordale

Ce choix s'appelle paramétrisation cordale « chordal paramétrization ». Cette paramétrisation est caractérisée par une courbure minimale.

La distance h au point de passage $P_i (x_i, y_i, z_i)$ pour « $x_i = x_i(h), y_i = y_i(h), z_i = z_i(h)$ » est calculée comme :

$$\forall i \in \{0, \dots, N\} \begin{cases} h_{i+1} = h_i + \Delta h_k \\ \Delta h_k = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2} \end{cases} \quad (\text{IV.7})$$

Initialement on prend : $h_0 = 0$

Dans ce cas, on peut paramétrer le chemin r_d à l'aide de h et noter $(r_x(h), r_y(h), r_z(h))$ les coordonnées du chemin en fonction de h .

$$\text{On a donc :} \quad r_d(h) = \begin{bmatrix} r_x(h) \\ r_y(h) \\ r_z(h) \end{bmatrix} \quad (\text{IV.8})$$

Ou : $r_x(h) = r_x^i(h), r_y(h) = r_y^i(h), r_z(h) = r_z^i(h)$ pour $h \in [h_i, h_{i+1}]$
 $r_x^i(h), r_y^i(h), r_z^i(h)$ Sont les données de définition des N segments du chemin, elles sont exprimées en fonction de h et i ($h_i < h < h_{i+1}$ et $i = 0, \dots, N - 1$).

Des Splines d'interpolation cubique, décrites par les équations IV.2, sont conçues pour relier les différentes coordonnées des points de passage en assurant une continuité d'ordre 2.

Posons : $\eta = h - h_i$ on obtient pour $\alpha = \{x, y, z\}$:

$$r_\alpha(\eta) = a_{\alpha,i} + b_{\alpha,i} \eta + c_{\alpha,i} \eta^2 + d_{\alpha,i} \eta^3 \quad (\text{IV.9})$$

Les coefficients a, b, c, d sont déterminés à partir des équations (IV.4 et IV.5) d'une façon à satisfaire les contraintes de continuité entre h_i et h_{i+1} .

IV.4.3. Reparamétrisation en fonction de la longueur d'arc

Une autre représentation des chemins consiste à passer en paramétrisation par la longueur d'arc (abscisse curviligne) qui s'effectue en définissant le variable s qui donne la longueur d'arc en fonction de la variable h . La nouvelle version des trajectoires paramétrées est obtenue sous la forme :

$$r_d(h) \equiv r_d(s) = r_d(\xi) \quad (\text{IV.10})$$

D'où s et $\xi = s - s_{k-1}$ sont respectivement les variables globales et locales représentant la longueur d'arc.

Cette technique de paramétrage est bien préférable dans nombreux de domaines, puisqu'elle permet par la suite de contrôler simultanément le positionnement ainsi que la vitesse du mouvement de la charge.

La forme des courbes paramétrées en fonction de la longueur d'arc s (curviligne) dans un environnement segmenté peut être obtenue à partir de n'importe quelle autre paramétrisation h par

les étapes suivantes [64, 65] :

$$- \text{ Calculer la longueur d'arc comme étant une fonction de paramètre } h : s = g(h) \quad (\text{IV.11})$$

$$- \text{ Calculer : } \quad h = g^{-1}(s) \quad (\text{IV.12})$$

La relation (IV.12) représente la fonction inverse de longueur d'arc.

$$- \text{ Substituant } h = g^{-1}(s) \text{ dans l'équation de } r_d(h), \text{ Le nouveau vecteur paramétré s'écrit alors :}$$

$$\begin{cases} r_d(s) = (x(g^{-1}(s)), y(g^{-1}(s)), z(g^{-1}(s))) \\ \text{avec } s \in [0, L] \text{ ou } L: \text{ est la longueur maximale d'arc} \end{cases} \quad (\text{IV.13})$$

Cependant les relations IV.11 et IV.12 sont généralement très difficiles à calculer. Pour cela, des méthodes d'approximation numériques seront très utilisées pour résoudre ce problème.

IV.4.3.1. Calcul d'intégrale

La longueur d'arc s en fonction de h est une intégration géométrique exprimée sous la forme :

$$s = g(h) = \int_0^h \sqrt{\left(\frac{dx(h)}{dh}\right)^2 + \left(\frac{dy(h)}{dh}\right)^2 + \left(\frac{dz(h)}{dh}\right)^2} dh \quad (\text{IV.14})$$

La longueur d'arc s a chaque point de passage P_i peut être calculée selon la relation itératif suivante :

$$\begin{cases} s_{i+1} = s_i + \Delta s_k \\ \Delta s_k = \int_0^{\Delta h_k} \sqrt{\left(\frac{dx(\eta)}{d\eta}\right)^2 + \left(\frac{dy(\eta)}{d\eta}\right)^2 + \left(\frac{dz(\eta)}{d\eta}\right)^2} d\eta \end{cases} \quad (\text{IV.15})$$

Avec $s_0 = 0$ représente la longueur curviligne initiale.

La formule d'intégrale IV.15 peut être approximée en utilisant des méthodes de calcul numérique d'intégrale telle que la méthode de « Gaussian quadrature or Simpson's rule » [62].

Cette dernière relation (IV.15) permet de tabuler la variation de la longueur d'arc en fonction de la variation de la corde.

IV.4.3.2. Calcul de la fonction d'inversement d'intégrale

Cette relation ; fonction IV.12 ; peut être formulée comme étant la solution numérique de l'équation :

$$s - g_i(h) = 0 \quad (\text{IV.16})$$

$$\text{Avec : } g_i(h) = \int_0^h \sqrt{\left(\frac{dx(h)}{dh}\right)^2 + \left(\frac{dy(h)}{dh}\right)^2 + \left(\frac{dz(h)}{dh}\right)^2} dh$$

L'expression des polynômes $g_i(h)$ ($1 \leq i \leq n$) ; exprimée en fonction des points de passage c est à dire en fonction des différents segments ; est strictement croissante. A cet effet, on pose :

$$\xi = s - s_{k-1}, \quad \eta = h - h_i \text{ et } g(\eta) = \int_0^\eta \sqrt{\left(\frac{dx(v)}{dv}\right)^2 + \left(\frac{dy(v)}{dv}\right)^2 + \left(\frac{dz(v)}{dv}\right)^2} dv$$

$$\text{On obtient : } \quad \xi - g_i(\eta) = 0 \quad (\text{IV.17})$$

La solution de l'équation IV.17 est unique, localisée certainement dans l'intervalle $[h_i, h_{i+1}]$ où i

représente l'indice du segment qui localise le paramètre s . A partir de ce point, le problème sera traduit en un problème de calcul de la racine de l'équation $\xi - g(\eta) = 0$ pour chaque valeur donnée de s / ξ .

$$\text{Posons} \quad F(\eta, \xi) = g(\eta) - \xi = 0 \quad (\text{IV.18})$$

Le but de ce qui suit est de proposer un algorithme ; qui répète pour chaque entrée de s ; qui permet d'obtenir une valeur approchée de la solution d'une équation de la forme $F(\eta, \xi) = 0$ sachant que ξ/s est connue.

Nous pouvons combiner la certitude de la règle de bisection de trouver une racine avec la convergence rapide de l'algorithme de Newton-Raphson dans un algorithme hybride comme suit [66] :

- D'abord il faut savoir que la racine est bornée dans un certain intervalle $\eta_0 \in [\eta_{min}, \eta_{max}]$
Comme la variation du s en fonction h est tabulé par la relation itérative IV.15, la localisation de s est aisée. Dans ce cas, on peut choisir : $\eta_{min} = 0$ and $\eta_{max} = \Delta h_k$ ou k : représente l'indice du segment qui localise la valeur donnée du s .

- Ensuite, nous partons d'une certaine conjecture initiale :

$$\eta_0 = \eta_{min} + \frac{\xi}{L} (\eta_{min} + \eta_{max}) \quad (\text{IV.19})$$

Et nous prenons une étape de Newton-Raphson comme suit :

$$\eta_{i+1} = \eta_i + \frac{F(\eta_i)}{F'(\eta_i)} \quad \text{Avec} \quad F'(\eta_i) = \frac{dF}{d\eta} = \frac{dg}{d\eta} = \left| \frac{dY}{d\eta} \right| \quad (\text{IV.20})$$

- Nous vérifions maintenant si cette étape est bornée dans l'intervalle $[\eta_{min}, \eta_{max}]$
 - Si oui, alors l'étape de Newton-Raphson est acceptée
 - Sinon on prendra plutôt une étape de bisection.

Une fois la relation $h = g^{-1}(s)$ est obtenue, Substituant h dans l'équation de $r_d(h)$, une caractérisation curviligne des différents mouvements sont obtenue :

$$\begin{cases} r_d(s) = (x(g^{-1}(s)), y(g^{-1}(s)), z(g^{-1}(s))) \\ \text{avec } s \in [0, L] \text{ ou } L: \text{ est la longueur maximale d'arc} \end{cases}$$

IV.5. Spécification temporelle du mouvement

La dernière étape consiste à synchroniser temporellement les mouvements d'ensemble des axes (x, y, z) . Cette synchronisation nécessite la définition d'une loi de mouvement, pour cela le paramètre s est défini comme étant une fonction du temps, de cette manière l'équation temporelle du mouvement ; ou la trajectoire de référence ; est obtenue :

$$r_d(t) = r_d(s(t)) \quad (\text{IV.21})$$

De cette manière, on peut conclure que :

$$\dot{r}_d(t) = \dot{s}(t) \frac{\partial r_d(s)}{\partial s} \text{ et } \ddot{r}_d(t) = \ddot{s}(t) \frac{\partial r_d(s)}{\partial s} + (\dot{s}(t))^2 \frac{\partial^2 r_d(s)}{\partial s^2} \quad (\text{IV.22})$$

Un raisonnable choix de $s(t)$ est celle proposé ultérieurement dans le chapitre III, dans ce cas $s(t)$ est exprimée par :

$$\begin{cases} S_I = \frac{S}{\tau - \tau_0} \left(-\frac{5t^8}{2\tau_0^7} + \frac{10t^7}{\tau_0^6} - \frac{15t^6}{\tau_0^5} + \frac{7t^5}{\tau_0^4} \right) & 0 < t < \tau_0 \\ S_{II} = \frac{S}{\tau - \tau_0} \left(t - \frac{\tau_0}{2} \right) & \tau_0 < t < t_f - \tau_0 \\ S_{III} = S + \frac{S}{\tau - \tau_0} \left(\frac{5(\tau - t)^8}{2\tau_0^7} - \frac{10(\tau - t)^7}{\tau_0^6} + \frac{15t(\tau - t)^6}{\tau_0^5} - \frac{7(\tau - t)^5}{\tau_0^4} \right) & t > t_f - \tau_0 \end{cases}$$

Remarque

- Pour contrôler la cinématique (vitesse, accélération et jerk) du mouvement, il suffit de modifier la courbe de reparamétrisation $s(t)$ et ceci sans altérer le chemin initial (évolution géométrique).
- Dans le cas où le chemin est paramétré en fonction de la longueur d'arc, S doit être choisie égal à L ou L représente la valeur maximale de la longueur d'arc.

Les différentes étapes d'exécution d'algorithme de planification sont résumées par les algorithmes 1, 2 et 3.

Algorithm1: Get desired trajectories

Inputs: initial and target load positions, known static obstacle.

Outputs: 3D vector of desired trajectories.

Begin

1st step: sketching the route by a set of sample points.

$$\mathbf{r}_d = (\mathbf{P}_i \mid \mathbf{P}_i = [x_i \ y_i \ z_i], \ i = 0, 1, \dots, N)$$

2nd step: chord length approximation $\mathbf{r}_d(\mathbf{h})$

- Chord length:

$$\mathbf{h}_{i+1} = \mathbf{h}_i + \Delta \mathbf{h}_k$$

$$\Delta \mathbf{h}_k = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2} \text{ and } \mathbf{h}_0 = 0$$

- Cubic spline function to get $\mathbf{r}_d(\mathbf{h}) = \begin{bmatrix} r_x(\mathbf{h}) \\ r_y(\mathbf{h}) \\ r_z(\mathbf{h}) \end{bmatrix}$

3rd step: Arc length parameterization $\mathbf{r}_d(s)$

- Numerical integration to calculate the arc length parameter

$$\mathbf{s} = \mathbf{g}(\mathbf{h}) = \int_0^{\mathbf{h}} \sqrt{\left(\frac{dx(h)}{dh}\right)^2 + \left(\frac{dy(h)}{dh}\right)^2 + \left(\frac{dz(h)}{dh}\right)^2} d\mathbf{h}$$

Gaussian quadrature or Simpson's rule to calculate the integral form.

- Finding \mathbf{h} for given \mathbf{s} ($\mathbf{h} = \mathbf{g}^{-1}(\mathbf{s})$) *

Can be formulated as a root finding problem $\mathbf{s} - \mathbf{g}(\mathbf{h}) = \mathbf{0}$

- $\mathbf{r}_d(\mathbf{h})$ is transformed to $\mathbf{r}_d(\mathbf{s})$

4th step: Timing law

- The arc length parameter s is defined as a function of time $\mathbf{s} = \mathbf{s}(t)$
- $\mathbf{r}_d(t) = \mathbf{r}_d(\mathbf{s}(t))$

End

* algorithm2: Finding h for given s algorithm

Inputs: s
 Outputs: h
 Begin

- Find segment k in which collocate the arc length
- $\xi = s - s_{k-1}$, $\eta = h - h_i$ and $\mathbf{g}(\eta) = \mathbf{g}^i(\eta)$
- Set $\mathbf{F}(\eta) = \mathbf{g}(\eta) - \xi = \mathbf{0}$
- Use hybrid bisection-Newton method** to get out h .

End

** algorithm3: hybrid bisection-Newton method

Inputs: $\mathbf{F}(\eta)$, $\mathbf{F}'(\eta)$, η_{min} and η_{max}
 L : is the max arc length

Outputs: η
 Begin

- Set initial guess for Newton method : $\eta_0 = \eta_{min} + \frac{\xi}{L} (\eta_{min} + \eta_{max})$
- Set initial guess for Bisection method
- Newton-Raphson iteration: $\eta_{i+1} = \eta_i + \frac{\mathbf{F}(\eta_i)}{\mathbf{F}'(\eta_i)}$
- If $\eta_{i+1} \in [\eta_{min}, \eta_{max}]$ then
 - . Newton-Raphson iteration is accepted.
 - . Else Bisection method:
 -
- End if
- Rest of Newton method.

End

IV.6. Approximation et lissage

Outre le fait d'obtenir une représentation des trajectoires pouvant être exécutées par un unique contrôleur, l'approximation des trajectoires planifiées permet d'améliorer le caractère de lissage des discontinuités qui sont apparues en accélération.

En effet, des échantillons du vecteur des trajectoires planifiées $r_d(t) = \begin{bmatrix} r_x(t) \\ r_y(t) \\ r_z(t) \end{bmatrix}$ seront injectés dans

un block de lissage.

Ce dernier est formé d'une fonction ; proposée par [67] ; entièrement automatisée pour le lissage des ensembles de données échantillonnées uniformément. Ce type de fonction permet d'agir sur la référence de position de chaque axe.

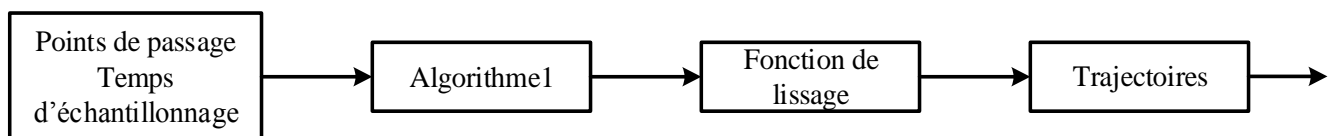


Figure IV.5 Fonction de lissage

IV.7. Simulation

Les simulations réalisées dans cette partie ont pour objectif de mettre en évidence l'efficacité d'algorithme proposé ainsi que l'influence de la fonction de lissage sur le comportement dynamique du pont. Pour cela, deux types des trajectoires seront générées :

- ✓ Des trajectoires avec un bloc de lissage
- ✓ Des trajectoires sans bloc de lissage.

Point de passage	Coordination
P ₀	(1, 2, 1)
P ₁	(8, 3, 2)
P ₂	(15, 4, 3)
P ₃	(18, 7, 4)
P ₄	(18, 9, 5)
P ₅	(18, 11, 6)
P ₆	(14, 14, 6)
P ₇	(10, 17, 5)
P ₈	(10, 18, 4)
P ₉	(10, 21, 3)
P ₁₀	(13, 24, 2)
P ₁₁	(18, 23, 1)

Tableau IV.1 Points de passage

Pour illustrer l'algorithme de génération des trajectoires hors ligne, on effectue des tests dans un environnement complexe jonché d'obstacles. Le nombre, la position ainsi que la taille des obstacles sont connues préalablement. La figure ci-après montre une projection de l'espace du travail dans le plan (x,y). Les points de passage sont au nombre de 12 et sont décrits dans la Table IV.1.

La figure IV.6 représente aussi une projection dans le plan (x,y) des chemins planifiés avec les deux approches de planification (avec et sans fonction de lissage).

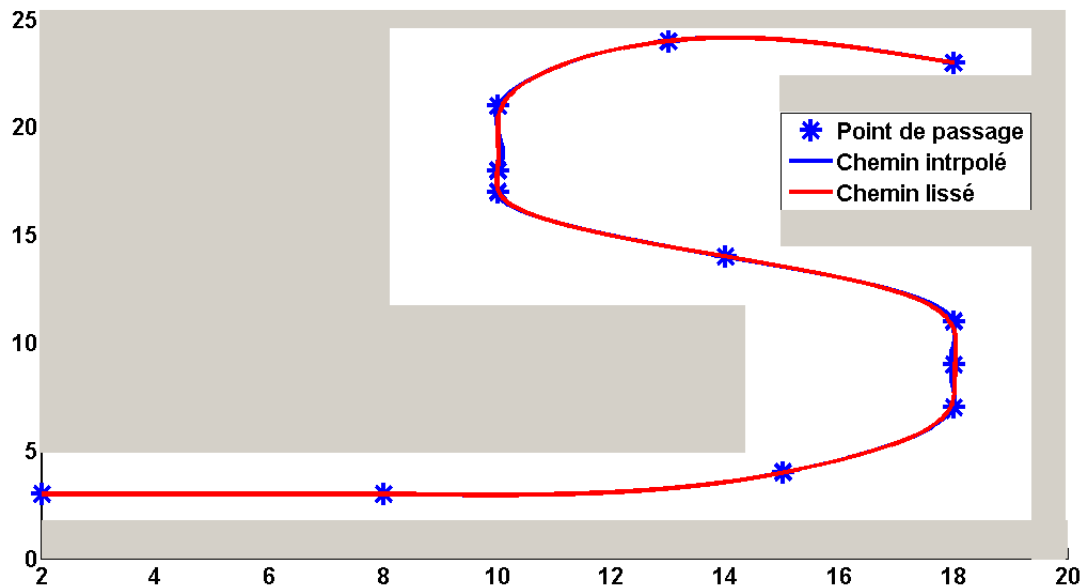


Figure IV.6 Projection des chemins planifiés (lissé et non lissé)

Pour analyser l'influence de la fonction de lissage sur le comportement dynamique du système, les trajectoires générées seront testées sur un pont roulant. Le suivi des trajectoires est assuré par des algorithmes de commande par mode glissant d'ordre deux développés dans le chapitre précédent. Les paramètres de commande seront fixés à :

Type de commande	Axe x	Axe y	Axe z
Commande continue	$k_{px} = 10$	$k_{py} = 10$	$k_{pR} = 9$
	$k_{dx} = 6.9$	$k_{dy} = 6.0$	$k_{dR} = 7$
Commande discontinue	$r_{1x} = 2$	$r_{1y} = 2$	$r_{1R} = 3$
	$r_{2x} = 1$	$r_{2y} = 1$	$r_{2R} = 2$

Tableau IV.2 Paramètre de commande

L'évolution dynamique de la charge est représentée à la figure IV.7. La figure IV.8 représente les forces générées pour assurer le suivi des trajectoires de références.

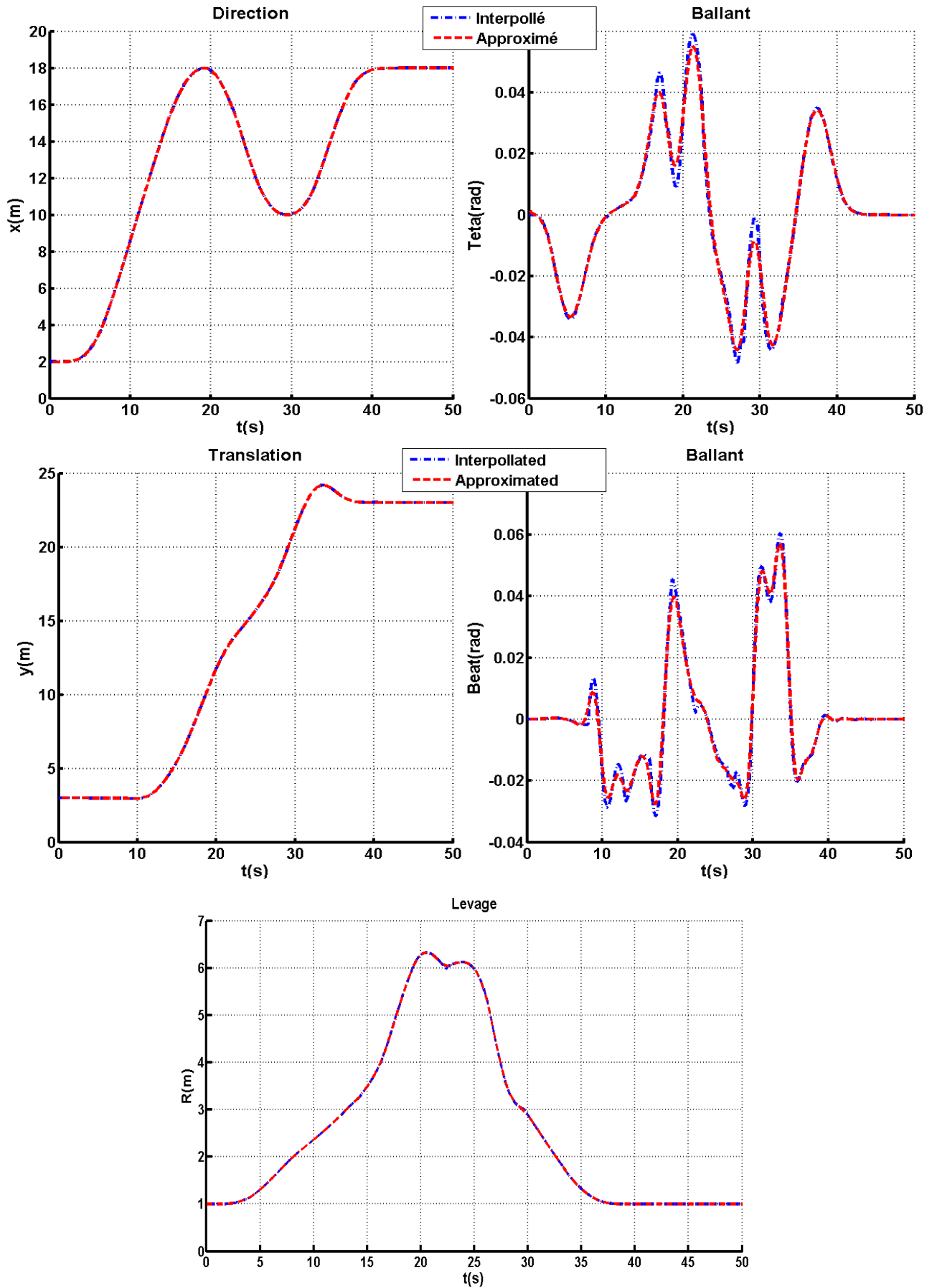
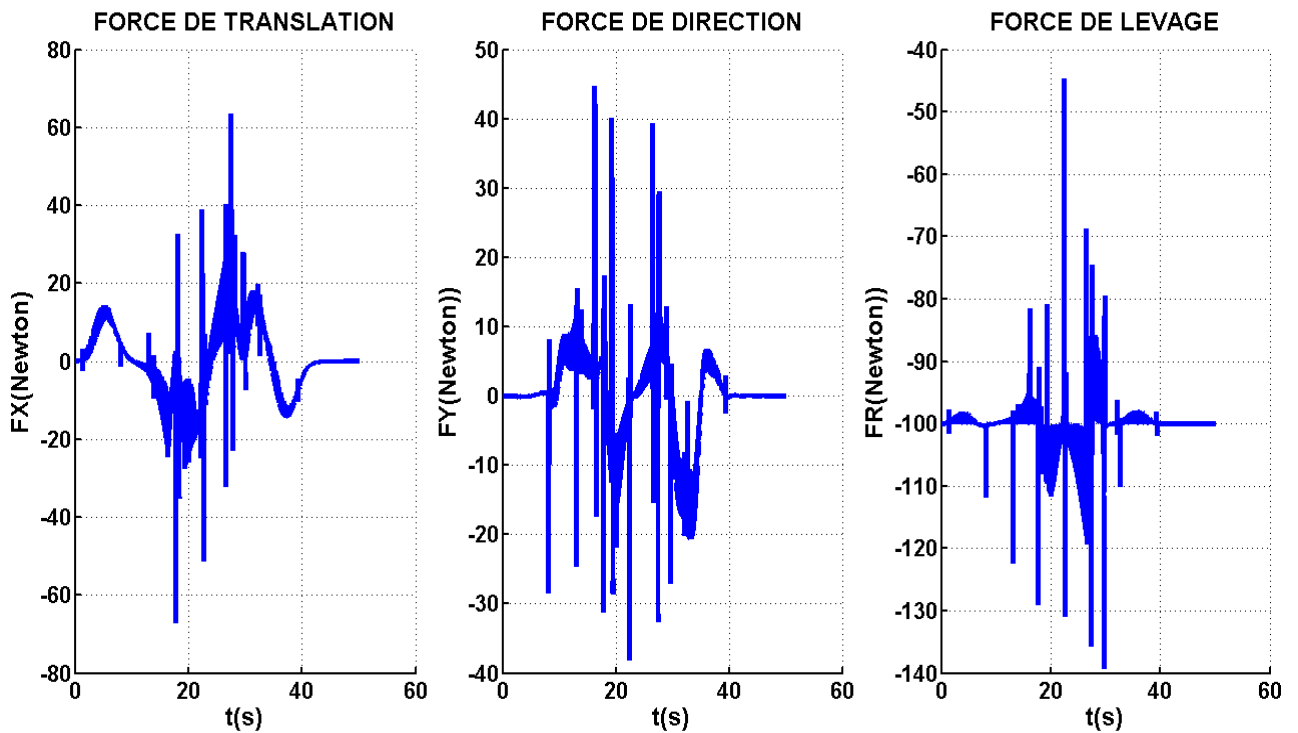
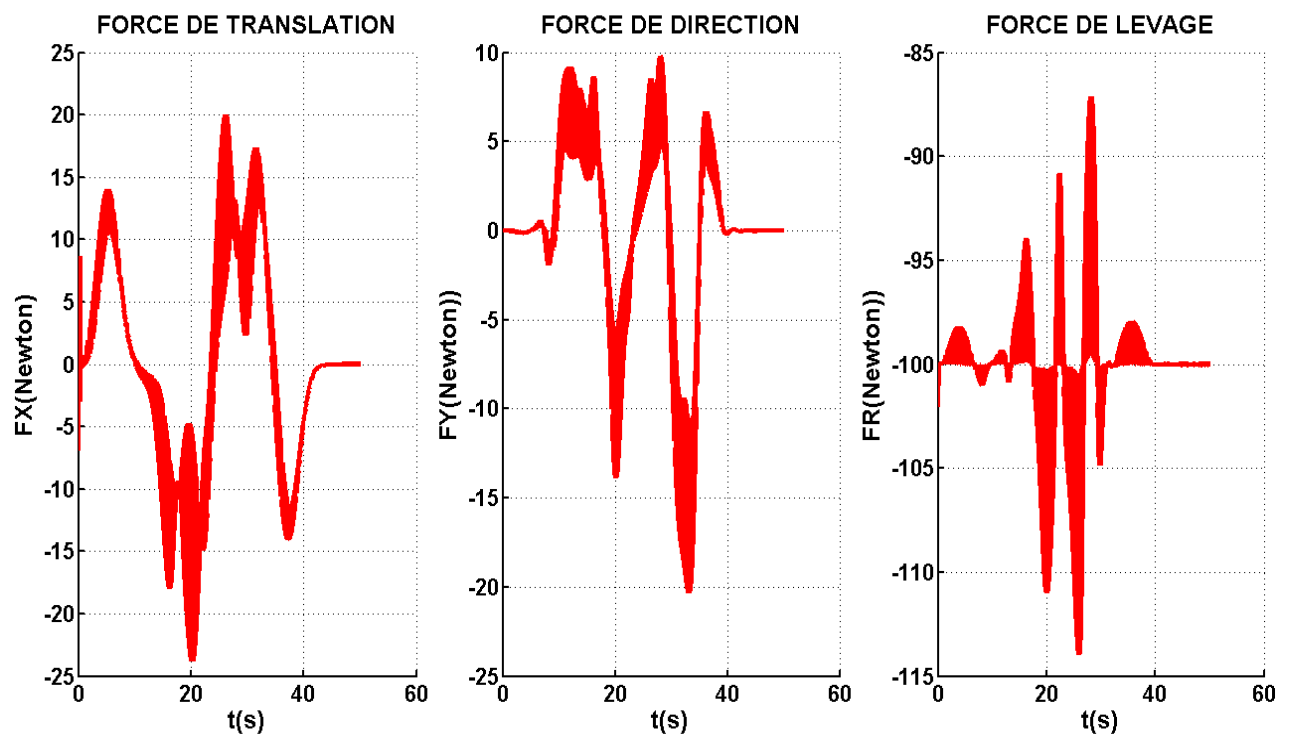


Figure IV.7 Evolution dynamique du pont



(a) Sans fonction de lissage



(b) Avec fonction de lissage

Figure IV.8 Forces appliquées (Bleu) Sans fonction de lissage (Rouge) Avec fonction de lissage

Après une analyse de ces résultats, on constate, d'une part que :

- ✓ L'algorithme de planification permet de guider la charge vers la cible. Les obstacles sont éliminés, l'angle de balancement a été atténué.
- ✓ L'algorithme de planification avec une fonction de lissage permet d'obtenir un déplacement de la charge avec une bonne qualité des signaux de commande.

D'autre part les résultats obtenues en simulation permet de confirmer les résultats des chapitre II et III en ce qui concerne la robustesse de la commande proposée (robustesse par rapport à la variation de la trajectoire de référence).

IV.8. Conclusion

Une méthode de planification des trajectoires de référence pour assurer le transfert des objets dans des milieux encombrés a été détaillée dans ce chapitre. La méthode proposée permet de contrôler séparément l'évolution géométrique du pont roulant (tel que l'évitement des collisions avec les obstacles) ainsi que l'évolution dynamique (tels que le contrôle de la vitesse, l'accélération et le temps de transfert des objets).

La planification des trajectoires de références se réalise alors en deux étapes. La première étape permet de déterminer un chemin continu à partir d'une séquence des points de passage. La seconde étape permet ensuite de déterminer l'évolution dynamique de la charge le long de ce chemin. Le traitement séparé de l'évolution géométrique et l'évolution dynamique du pont permet à la charge de suivre le chemin spatial généré quelle que soit la vitesse et l'accélération désirées.

L'application d'un tel algorithme en collaboration avec une technique appropriée de commande (comme exemple : la commande hybride détaillée dans le chapitre III) permet de régler les problèmes de manutention des charges via un pont et les indésirables balancements qui se posent généralement au cours du fonctionnement d'un pont roulant.

Ce chapitre permet de confirmer l'effet de l'approche de commande proposée sur la stabilité et robustesse des systèmes complexes et incertains.

L'importance d'un tel planificateur ; exécuté hors ligne ; est apparue lorsqu'on utilise le pont pour l'exécution des tâches répétitives.

CONCLUSIONS GENERALES

Conclusion générale :

Le travail mené tout au long de ce mémoire a permis d'apporter un certain nombre de résultats au problème de la commande des ponts roulants. Les ponts roulants forment un bon exemple pour l'étude des différents processus assurant l'efficacité, la stabilité et la robustesse pour une grande classe des systèmes mécaniques automatisés. D'une manière générale, la commande de ce type de système peut être exprimée comme une fonction qui gère un compromis entre les critères de productivité, de précision et de sécurité. L'approche proposée dans ce mémoire permet de répondre à ce compromis dans sa globalité.

Ce travail commence par des présentations générales pour les ponts roulants en vue de contourner la problématique d'autonomie de ces systèmes d'une part et d'élaborer le modèle mathématique qui représente l'évolution dynamique du pont d'autre part.

Le chapitre II a permis d'explorer l'intérêt d'utilisation des différents algorithmes de la commande par mode glissant pour l'asservissement de systèmes incertains. Les techniques de commande par mode glissant d'ordre deux ont été prouvées efficace pour l'amélioration des performances de mode glissant classique. Cependant, ces techniques ont un souci fondamental au niveau de la phase de convergence (robustesse et temps de convergence). Dans ce contexte, La technique de commande dite quasi-homogène discontinue est montrée qu'elle était efficace en vue de l'amélioration du temps de convergence, de l'attractivité et par conséquent de la robustesse du mode glissant d'ordre deux.

Dans le chapitre III, on montre en appliquant la technique de commande par mode glissant quasi-homogène discontinue qu'un bon choix de la surface de glissement permet de contrôler simultanément le déplacement ainsi que les ballants de la charge. L'approche proposée est adaptée à la fois au suivi de trajectoire et au rejet des perturbations externes :

- Le choix d'une loi du mouvement lisse permet de contrôler et d'atténuer une grande partie des ballants apparus au cours du mouvement d'une charge transportée.
- La technique de commande quasi-homogène discontinue permet d'améliorer considérablement la robustesse et la stabilité du système commandée.

Les résultats de ce chapitre ont été confirmés par des simulations sous différentes conditions.

Dans le chapitre IV, une extension des résultats du troisième chapitre a été proposée pour résoudre le problème de manipulation des ponts roulants dans des milieux encombrés. Les résultats de ce chapitre permettent de confirmer les résultats des chapitres précédents.

Annexe A- Stabilisation d'un double intégrateur perturbé

Problème :

Le problème de stabilisation d'un double intégrateur perturbé sera considéré dans cette section :

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 & F &: l'entrée de commande \\ \dot{x}_2 &= F - f & f &: regroupe les forces de frottement et les incertitudes \end{aligned}$$

Le modèle d'état du système peut être représenté :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u = Ax + Bu \quad \text{avec } u = F - f$$

L'objectif de la commande est de stabiliser le double intégrateur dans sa position d'équilibre (0,0).

Commande par retour d'état statique

On définit un retour d'état statique linéaire : $F = -k x$ d'où k représente les paramètres de commande.

La solution est alors obtenue en résolvant l'équation de Riccati suivante:

$$PA + A^T P + Q - PBR^{-1}B^T P = 0 \quad \text{Dans ce cas : } K = R^{-1}B^T P$$

La résolution de l'équation algébrique de Riccati est disponible dans les Toolboxes du logiciel Matlab :

pour $Q = \text{Diag}(100,100)$, $R = 1$, $f = 0.06$ la solution est obtenue :

$A = [0 \ 1; 0 \ 0]$ $B = \text{transpose}([0 \ 1])$ $R = 1;$ $Q = [100 \ 0; 100 \ 0]$ $[K,P,E] = \text{lqr}(A,B,Q,R)$	Retour d'état : $K =$ 10.0000 4.4721
	Matrice P : $P =$ -5.2786 10.0000 10.0000 4.4721
	Pole du système : $E =$ -2.2361 + 2.2361i -2.2361 - 2.2361i

Retour d'état statique avec l'ajout d'un terme d'intégrale

Pour pouvoir accélérer la convergence et diminuer l'erreur statique résultant de la commande par

retour d'état statique linéaire, on peut ajouter une action intégrale en utilisant l'intégrale de la position comme variable d'état. Pour cela on introduit la variable x_I telle que $\dot{x}_I = x$ et on obtient le système suivant :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_I \\ \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_I \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u$$

pour $Q = \text{Diag}(1,1,1)$, $R = 1$ on obtient :

$A = [0 \ 1 \ 0; 0 \ 0 \ 1; 0 \ 0 \ 0]$ $B = \text{transpose}([0 \ 0 \ 1])$ $Q = \text{diag}([1 \ 1 \ 1], 0)$ $R = 1;$ $[K, P, E] = \text{lqr}(A, B, Q, R)$	Retour d'état : $K =$ 1.0000 2.4142 2.4142
	Matrice P : $P =$ 2.4142 2.4142 1.0000 2.4142 4.8284 2.4142 1.0000 2.4142 2.4142
	Pole du système : $E =$ -1.0000 + 0.0000i -0.7071 + 0.7071i -0.7071 - 0.7071i

Commande par twisting algorithm :

La loi de commande est définie par (Chapitre II) : $u = -r_1 \text{sing}(s) - r_2 \text{sign}(\dot{s})$ d'où $r_1 > r_2 > f$

On peut choisir $r_1 = 2$, et $r_2 = 1$.

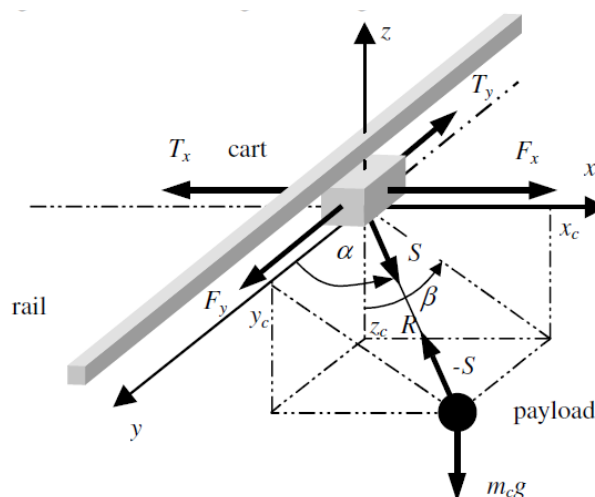
Commande quasi-homogène discontinue :

Elle représente une combinaison entre deux types de commande :

Le retour d'état défini par les paramètres : $K = 10.0000 \quad 4.4721$ et la commande discontinue définie par : $r_1 = 2$, et $r_2 = 1$

Annexe B- Modèle de simulation

Le pont roulant d' « Inteco 3D » se compose d'un chariot qui se déplace dans le plan (xy), d'une charge attachée par un câble, cette charge peut être déplacée vers le haut et vers le bas. Le système est schématiquement représenté par la figure A.1. Pour ce pont, un modèle mathématique représente le mouvement du système sur les trois axes est considéré. Le système contient cinq grandeurs mesurées :



FigureA.1 pont roulant : coordonnées et forces

- x_w représente la distance entre l'ensemble (rail + chariot) et le cadre de construction.
- y_w représente la distance entre le chariot et le centre du rail.
- R représente la longueur du câble de manutention.
- α représente l'angle formé par l'axe y et le câble de manutention.
- β représente l'angle formé par la direction négative de l'axe z et la projection du câble dans le plan xz.

La position de la charge est déterminée par :

$$x_c = x + l \sin \alpha \sin \beta$$

$$y_c = y + l \cos \alpha$$

$$z_c = -l \sin \alpha \cos \beta$$

Pour simplifier, les notations suivantes seront utilisées dans la suite :

$$\mu_1 = \frac{m_c}{m_w} \quad \mu_2 = \frac{m_c}{m_w + m_s} \quad s = \frac{S}{m_c}$$

$$u_1 = \frac{F_y}{m_w} \quad u_1 = \frac{F_x}{m_w + m_s} \quad u_3 = \frac{F_R}{m_c} \quad T_1 = \frac{T_y}{m_w} \quad T_2 = \frac{T_x}{m_w + m_s} \quad T_3 = \frac{T_R}{m_c}$$

$$N_1 = \mu_1 - T_1 \quad N_2 = \mu_2 - T_2 \quad N_3 = \mu_3 - T_3$$

Les équations décrivant le modèle dynamique du pont roulant seront données par :

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= N_1 + \mu_1 c_5 N_3 \\ \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= N_2 + \mu_2 s_5 s_7 N_3 \\ \dot{x}_5 &= x_6 \\ \dot{x}_6 &= (s_5 N_1 - s_5 s_7 N_2 + (\mu_1 - \mu_2 s_7^2) c_5 s_5 N_3 + V_5) / x_9 \\ \dot{x}_7 &= x_8 \\ \dot{x}_8 &= -(c_7 N_2 + \mu_2 s_5 c_7 s_7 N_3 + V_6) / s_5 x_9 \\ \dot{x}_9 &= x_{10} \\ \dot{x}_{10} &= -c_5 N_1 - s_5 s_7 N_2 - (1 + \mu_1 c_5^2 - \mu_2 s_5^2 s_7^2) N_3 + V_7 \end{aligned}$$

Avec :

$$\begin{aligned} x_1 &= y_w \quad x_2 = \dot{x}_1 = \dot{y}_w \\ x_3 &= x_w \quad x_4 = \dot{x}_3 = \dot{x}_w \\ x_5 &= \alpha \quad x_6 = \dot{x}_5 = \dot{\alpha} \\ x_7 &= \beta \quad x_8 = \dot{x}_7 = \dot{\beta} \\ s_n &= \sin x_n \quad c_n = \cos x_n \\ V_5 &= c_5 s_5 x_8^2 x_9 - 2x_{10} x_6 + g c_5 c_7 \\ V_6 &= 2x_8 (c_5 x_6 x_9 + s_5 x_{10}) + g s_7 \\ V_7 &= s_5^2 x_8^2 x_{96} + g s_5 c_7 + x_6^2 x_9 \\ x_9 &= R \quad x_{10} = \dot{x}_9 = \dot{R} \end{aligned}$$

Dans ce système, pour éliminer le cas de la singularité du système : $\alpha \neq 0$

Dans ce travail, pour adapter ce modèle avec le modèle de la commande proposée, un changement approprié de variable est donnée comme :

$$\begin{aligned} \theta_x &= \beta & x &= x_w \\ \theta_y &= \frac{\pi}{2} - \alpha & y &= y_w \\ & & z &= z \end{aligned}$$

Références Bibliographiques

- [1]. C. Pelletier, "*Appareils de levage - Généralités*", Techniques de l'Ingénieur, 2000.
- [2]. C. Pellissier, "*Ponts roulants et portiques*", Techniques de l'Ingénieur, 2000.
- [3]. S. kang, E. Miranda, "*Toward Fully Automated Robotic Crane for Construction Erection*", Conference: Proceedings of The Future of the AEC Industry, At Las Vegas, Nevada.
- [4]. E. Fadier, "*Automatisation et sécurité*", Techniques de l'Ingénieur, 2009.
- [5]. INRS, acteur du dispositif de prévention en France "*Ponts roulants Manuel de sécurité*", <http://www.inrs.fr/>, 2011.
- [6]. E. M. Abd-el-arahmen, A.H. Nayef and Z. N. Messoud, "*Dynamics and control of cranes: A review*" journal of vibration and control 2003 sage control, 2001.
- [7]. O. Sawodnya, H. Aschemann and S. Lahresc, "*An automated gantry crane as a large workspace robot*", Control Engineering Practice 10, 1323–1338, 2002.
- [8]. N. Zrnić, Z. Petković and S. Bošnjak, "*Automation of Ship-To-Shore Container Cranes: A Review of State-of-the-Art*", Faculty of Mechanical Engineering University of Belgrade, FME Transactions 33, 111-121, 2005.
- [9]. K. Hong, "*Two stages control for container cranes*", JSME international journal series. C Vol.43.No 2, 2000
- [10]. S. Cho and H. Lee, "*An Anti-Swing Control of a 3-Dimensional Overhead Crane*", Proceedings of the American Control Conference Chicago- Illinois- USA, 2000.
- [11]. J. Hua, K. Shine "*Adaptive Control for 3-D Overhead Crane Systems*", Proceedings of the 2006 American Control Conference Minneapolis, Minnesota- USA, 2006.
- [12]. Y. Sakawa and Y. Shindo, "*Optimal Control of Container Cranes*" Automatica. Vol. 18. No. 3. pp. 257-266. International Fédération of Automatic Control, Great Britain 1982.
- [13]. M. J. Er, M. Zribi, K. L. Lee, "*Variable Structure Control of an Overhead Crane*", Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Control Applications Trieste, Italy, 1998.
- [14]. V.Utkin, "*Variable Structure Systems with Sliding Modes*", IEEE transactions on automatic control, 1977.
- [15]. J.J.Slotine and W.Li "*Applied nonlinear control*", Third edition, Prentice Hall.
- [16]. F. Omar, F. Karray, O. Basir, L. Yu, "*Autonomous Overhead Crane System Using a Fuzzy Logic Controller*", Journal of Vibration and Control, 2003.

-
- [17]. W. Blajer, K. Kotodziejczyk, "*Motion planning and control of gantry cranes in cluttered work environment*", IET Control Theory Appl, pp. 1370–1379, 2007.
- [18]. I. Cho, S. Kun, and. H.H Lee, "*Sway Control Technology and Its Application for Overhead Traveling Cranes*", Proceedings of the American Control Conference, Chicago, 2000.
- [19]. J. Piriou, "*Optimising the productivity of lifting appliances Anti-Sway: controlling the swaying of the load*", White paper Schneider electric, January 2010.
- [20]. B. Biegel, A. Hansen, M. Juelsgaard, P. Koldkjær, "*Anti Sway System for a Ship to Shore Crane*", Project Group E631 6th Semester, Department of Electronic Systems Aalborg University Project period: 2/2 – 3/6 2009.
- [21]. T. Ruppel, K.L. Knierim and O. Sawodny, "*Analytical Multi-Point Trajectory Generation for Differentially Flat Systems with Output Constraints*", Preprints of the 18th IFAC World Congress Milano (Italy), 2011.
- [22]. A. Gasparetto, P. Boscariol, A. Lanzutti, R. Vidoni, "*Trajectory Planning in Robotics*", Mathematics in Computer Science. Math.Comput.Sci. 6:269–279, 2012.
- [23]. X. Broquer, "*planification de trajectoire pour la manipulation d'objet et l'interaction Homme-Robot*", Thèse en vue de l'obtention du doctorat de l'université de Toulouse, 2011.
- [24]. S. S. Perumaal, N. Jawahar, "*Automated Trajectory Planner of Industrial Robot for Pick-and-Place Task*", International Journal of Advanced Robotic System Regular Paper
- [25]. M. Defoort, "*Contributions à la planification et à la commande pour les robots mobiles coopératifs*", thèse en vue de l'obtention du doctorat. Ecole centrale de Lille, 2007.
- [26]. H.H. Lee, "*Modeling and Control of a Three-Dimensional Overhead*", 472 / Vol. 120, Transactions of the ASME, 1998.
- [27]. S. Riachy, "*Contribution à l'estimation et à la commande de systèmes mécaniques sous-actionné*" THÈSE pour obtenir le grade de Docteur de l'Ecole Centrale de Lille, 2008.
- [28]. N.B. Almutairi, M. Zribi, "*Sliding Mode Control of a Three-dimensional Overhead Crane*", Journal of Vibration and Control, 15(11): 1679–1730, 2009.
- [29]. A. Boubakir, F. Boudjema, C. Boubakir, N. Ikhlef, "*Loi de Commande par Mode de Glissement avec Une Surface de Glissement Non Linéaire Appliquée au Système Hydraulique à Réservoirs Couplés*", International Conférence on Computer Integrated Manufacturing CIP'2007 03-04, 2007.
- [30]. J.M. Biannic, A.Fossard, "*Commande en régime glissant*", Technique de l'ingénieur, s7435.
- [31]. V. Emelyanov, "*high-order sliding modes in control systems*", Computational Mathematics anti Mulefing, Vol. 7, No. 3. 1996.
-

-
- [32]. A. Levant, "*Principles of 2-Sliding Mode Design*", Automatica, Volume 43, issue4, Pages 576–586, 2007.
- [33]. C. Vecchio, "*Sliding Mode Control: theoretical developments and applications to uncertain mechanical systems*", Thèse de l'université de Pavie, Italie.
- [34]. L. Fridman, J. Moreno, and R. Iriarte "*Sliding Modes after the First Decade of the 21st Century*", Springer 2012. Series: Lecture Notes in Control and Information Sciences, Vol. 412, 2012.
- [35]. C. Kunusch, P. Puleston, M. Mayosky "*Sliding-Mode Control of PEM Fuel Cells*", Springer 2012. series: Advances in Industrial Control, 2012.
- [36]. R. Santiesteban, L. Fridman, J.A. Moreno, "*Finite-time convergence analysis for "Twisting" controller via a strict Lyapunov function*", 2010 11th International Workshop on Variable Structure Systems Mexico City, Mexico, 2010.
- [37]. H.B. Oza, Y.V. Orlov, S. K. Spurgeon, "*Settling Time Estimate for a Second Order Sliding Mode Controller: A Homogeneity Approach*" Preprints of the 18th IFAC World Congress Milano, 2011.
- [38]. T. Floquet, J.P. Barbot, W. Perruquetti, "*Second order sliding mode control for induction motor*", Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control Sydney, Australia, 2000.
- [39]. J. A. Moreno, "*A Lyapunov approach to second-order sliding mode controllers and observers*" Proceedings of the 47th IEEE Conference on Decision and Control Cancun, Mexico, 2008.
- [40]. V. Bregeault, "*quelques contributions à la théorie de la commande par modes glissants*" Thèse de Doctorat, école centrale de Nantes, 2010.
- [41]. U. Itkis. "*Control systems of variable structure*". Ed. J. Wiley: New York, 1976.
- [42]. A. Isidori "*Nonlinear control system*". Springer Verlag, Berlin, third edition. 1995.
- [43]. K. Braikia "*Asservissement des systèmes incertains par des commandes à mode glissant. Application à un robot flexible*". Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, 2011.
- [44]. W.S. Lin and C.S. Chen., "*Robust adaptive sliding mode control using fuzzy modelling for a class of uncertain mimo nonlinear systems*", IEE on Control Theory and Applications, 149(3):193–201, 2002.
- [45]. S. Hajri, "*Commande dynamique par mode glissant Application à la robustification des systèmes complexes*", PhD thesis, Université des sciences et technologie de Lille, 1997.
-

-
- [46]. S. V. Emelyanov, S. K. Korovin, L.V Levantovsky, " *Higher order sliding regimes in the binary control systems* ", *Soviet Physics, Doklady*, 31(4), 291–293, 1986.
- [47]. K. Furuta " *Sliding mode control of discrete system* " *Systems & Control Letters*, 14 :145-152, 1990.
- [48]. A. Levant. " *Sliding order and sliding accuracy in sliding mode control* " *International Journal of Control*, 58(6):1247–1263, 1993.
- [49]. W. Perruquetti and J.P. Barbot " *Sliding mode control in engineering* " . MARCEL DEKKER, INC. New York .Basel 2002.
- [50]. A. Levant " *Robust Exact Differentiation via Sliding Mode Technique* ". *Automatica*, Vol. 34, No. 3, pp. 379–384, 1998.
- [51]. M. Smaoui, " *Etude d'un différentiateur robuste via modes glissants d'ordre supérieur: Application en électropneumatique* ", Laboratoire d'Automatique Industrielle - INSA de Lyon
- [52]. P. Tomei, " *Adaptive PD Controller for Robot Manipulators* " *IEEE transactions on robotics and automation*, vol. 7, no. 4, august 1991
- [53]. R. Bearee, " *Prise en compte des phénomènes vibratoires dans la génération de commande des machines-outils a dynamique élevée* " Thèse Pour obtenir le grade de : Docteur de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, 2005.
- [54]. F. Colas, " *Synthèse et réglage de lois de commande adaptées aux axes souples en translation – Application aux robots cartésiens 3 axes –* " Thèse Pour obtenir le grade de : Docteur de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, 2007.
- [55]. S. Dicheva, " *Planification de mission pour un système de lancement aéroporté autonome* ", Thèse Pour obtenir le grade de : Docteur de l'Université d'Évry Val d'Essonne, 2012.
- [56]. M.W. Spong, " *The control of under actuated mechanical systems* ", Partial support for this research was provided by the National Science Foundation under Grants MSS- INT9202168
- [57]. M. Park and D. Chwa, " *Swing-Up and Stabilization Control of Inverted-Pendulum Systems via Coupled Sliding-Mode Control Method* ", *IEEE transactions on industrial electronics*, vol. 56, no. 9, 2009.
- [58]. G. Bartolini, A. Pisano, and E. Usai, " *output-feedback control of container cranes: a comparative analysis* ", *Asian Journal of Control*, Vol. 5, No. 4, pp. 578-593, 2003.
- [59]. G. Bartolini, A. Pisano, E. Usai, " *Second-order sliding-mode control of container cranes* ", *Automatica* 38 1783 – 1790 www.elsevier.com/locate/automatica Brief Paper, 2002.
- [60]. D.T. Liu, W.P. Guo, " *Tracking Control for an Underactuated Two-Dimensional Overhead Crane* ", *Journal of Applied Research and Technology*.
-

- [61]. Z. Lei, S. Behzadipour, M. Al-Hussein, U. Hermann, "*application of robotic obstacle avoidance in crane lift path planning*".
- [62]. S.C. Chapra, "*Applied Numerical Methods with MATLAB® for Engineers and Scientists*" Third Edition, MCGRAW HILL.
- [63]. W. Khalil, E. Dombre, "*Modeling, identification and control of robots*" Butterworth-Heinemann, 2004.
- [64]. H. Wang, J. Kearney, and K. Atkinson, "*Arc-Length Parameterized Spline Curves for Real-Time Simulation*" *Curve and Surface Design: Saint-Malo*, pp. 387–396, 2002
- [65]. B. Guenter, R. Parent, "*Computing the Arc Length of Parametric Curves*" *IEEE Computer Graphics & Applications*.
- [66]. D. Eberly, "*Moving along a Curve with Specified Speed*" Geometric Tools, LLC <http://www.geometrictools.com> Created: April 28, 2007.
- [67]. D. Garcia, "*Robust smoothing of gridded data in one and higher dimensions with missing value*" CRCHUM , Research Centre, University of Montreal Hospital, Montreal, Canada.
- [68]. 3DCrane User's Manual, www.inteco.com.pl

ملخص:

ان الهدف من هذه المذكرة هو تطوير نظام يسمح بالتحكم في سلوك الجسور الرافعة (الرافعات). ان هذه الدراسة تمنح مجموعة من الوسائل والأدوات التي تمكن من التحكم الآلي والتام في هذا النوع من الآلات وهو ما يسمح بنقل الحمولات بسرعة وكفاءة كبيرتين. ان التحكم بهذا النوع من الآلات يتطلب مخططا زمنيا مناسباً لحركة الأجزاء المختلفة للنظام. مخططات الحركة المقترحة خلال هذه المذكرة تسمح بتحسين أداء الجهاز مع التخفيف من الاهتزازات الناتجة عن انتقال العربة. لقد تم اقتراح خوارزميات تسمح بتطوير هذه المخططات بغرض التعامل مع الحواجز التي تعترض الحمولة أثناء حركتها. لضمان متابعة نظام الحركة لهذه المسارات الزمنية تم اقتراح طريقة التحكم بواسطة أنظمة المنزقة ذات الرتبة الثانية. ان هذا النوع من أنظمة التحكم يضمن استقرار النظام وصلابته.

كلمات مفتاحية: الرافعات، الجسور الرافعة، التحكم الصلب، النمط الانزلاقي ذو الرتبة الثانية، نظام التحكم المزيج، المخططات الزمنية للحركة، تجنب العوائق.

Résumé :

L'objectif principal de cette étude est la conception d'un système de commande qui permet de contrôler le fonctionnement des ponts roulants. Cette étude fournit des connaissances et des outils qui permettront à long terme d'automatiser les opérations de levage et de placement des charges et d'améliorer les performances du système. La commande des ponts roulant exige une planification appropriée des trajectoires de référence. La méthode de planification des trajectoires proposée permet d'atténuer les oscillations de la charge en gardant des performances acceptables. Une extension de cette méthode sera proposée pour la résolution du problème de la manipulation des ponts roulant dans des milieux encombrés bien définis. Le suivi des trajectoires de référence et la robustesse du système commandé sont assurés par un algorithme de commande basée sur la technique de contrôle par mode glissant d'ordre deux. Plusieurs résultats par simulation sont présentés pour illustrer les performances des approches proposées.

Mots Clés : Ponts roulants, portiques, commande robuste, mode glissant d'ordre deux, commande quasi-homogène, planification de trajectoire, évitement d'obstacles.

Abstract:

The main objective of this study is to design a control system that controls the operation of an overhead crane. This study aims at automating the dynamic behavior and improving performances of these machines. Crane control requires an appropriate planning of reference trajectories. The proposed method in this paper allow attenuating the load oscillation, maintaining acceptable performances of system. An extension of this method is proposed to regulate the problem of manipulating load in predefined cluttered workspaces. A control algorithm based on the second order sliding mode controller is developed to provide the trajectories tracking, the stability and the robustness of the studied system. Several simulation results are presented to illustrate the performance of the proposed approaches.

Key Words: overhead crane, gantry cranes, robust control, second order sliding mode control, quasi-homogenous control, trajectory pacification, obstacle avoidance.