

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة الدكتور الطاهر مولاي سعيدة

Université Saida Dr Tahar Moulay –

Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

Mémoire de fin d'études présenté pour l'obtention du Diplôme de MASTER

**En : AUTOMATIQUE**

**Spécialité : AUTOMATIQUE & SYSTEMES**

**Par : GUERROUDJ Yahia Benabdallah et GUESMI Mohamed Rachid**

**Sujet**

# **Comparison Between Intelligent Control and Model Predictive Control (MPC) for Inverted Pendulum Robot**

Soutenue publiquement en **27/ 06/ 2024** devant le jury composé de :

<b>Mr. MOSTFAI Mohammed</b>	Pr	Univ. Saida	Examineur
<b>Mr. BOUROUNA Abdelkader</b>	MAA	Univ. Saida	Rapporteur
<b>Mr. MERAH Abdelkader</b>	MCA	Univ. Saida	Président

Année universitaire 2023/2024

**Dédicace :**

إلى المستضعفين من المسلمين.

## الملخص:

يمثل نظام البندول المقلوب (IPC) تحديًا أسيرًا في مجال هندسة التحكم. تخيل قضيب (البندول) متوازن بشكل غير مستقر على عربة متحركة. هدفنا؟ تحدي الجاذبية وإبقاء البندول عمودياً! نتناول هذه المذكرة ثلاث تقنيات تحكم مستخدمة لتحقيق هذا الإنجاز: PID، والتحكم التنبؤي بالنموذج (MPC) والتحكم المنطقي الضبابي.

يتطلب عدم الاستقرار المتأصل في البندول المقلوب استراتيجية تحكم. من خلال تنظيم حركة العربة بمهارة، يمكننا التأثير بشكل غير مباشر على زاوية البندول وتوجيهه نحو توازنه الرأسي. يقارن هذا العمل فعالية طرق التحكم الثلاثة هذه لتثبيت البندول في بيئة محاكاة MATLAB/Simulink.

الكلمات الدالة: نظام البندول المقلوب، هندسة التحكم، التثبيت، التحكم PID، التحكم التنبؤي بالنموذج، التحكم المنطقي الضبابي، MATLAB، Simulink.

## RÉSUMÉ :

Le système du pendule inversé (CIP) représente un défi captivant dans le domaine de l'ingénierie du contrôle. Imaginez une tige (le pendule) en équilibre précaire sur un chariot en mouvement. Notre objectif ? Défier la gravité et maintenir le pendule à la verticale ! Ce mémoire examine trois techniques de contrôle employées pour réaliser cet exploit : PID, contrôle prédictif de modèle (MPC) et contrôle à logique floue.

L'instabilité inhérente au pendule inversé nécessite une stratégie de contrôle. En orchestrant habilement le mouvement du chariot, nous pouvons indirectement influencer l'angle du pendule et le guider vers son équilibre vertical. Ce travail compare l'efficacité de ces trois méthodes de contrôle pour stabiliser le pendule dans un environnement de simulation MATLAB/Simulink.

**Mots-clés :** Système de pendule inversé, ingénierie du contrôle, stabilisation, contrôle PID, contrôle prédictif de modèle, contrôle à logique floue, MATLAB, Simulink.

## THE ABSTRACT:

The Cart-Inverted Pendulum (CIP) system presents a captivating challenge in control engineering. Imagine a rod (the pendulum) balanced precariously atop a moving cart. Our objective? To defy gravity and maintain the pendulum upright! This memory delves into three control techniques employed to achieve this feat: PID, Model Predictive Control (MPC), and Fuzzy Logic Control.

The inherent instability of the inverted pendulum necessitates a control strategy. By ably orchestrating the cart's movement, we can indirectly influence the pendulum's angle, guiding it towards its upright equilibrium. This work compares the efficacy of these three control methods in stabilizing the pendulum within a MATLAB/Simulink simulation environment.

**Keywords:** Cart-Inverted Pendulum System, Control Engineering, Stabilization, PID Control, Model Predictive Control, Fuzzy Logic Control, MATLAB, Simulink

## Liste des Symboles :

**PID** : proportionnel intégrative dérivative

**FLC** : contrôle par logique floue

**MPC** : contrôle a model prédictive

**F** : La force (N)

**L** : Lagrangien du système (m)

$\varepsilon_j$  : Les degrés de liberté

**F(t)** : Force exercé sur le chariot (N)

**X(t)** : Position du chariot

**U** : la commande

**D** : Coefficient de frottement de la rotation du pendule

**g** : intensité de la pesanteur (m/s<sup>2</sup>)

$\theta$  : l'angulation du pendule (rad)

$\dot{\theta}$  : vitesse angulaire du pendule (rad/s)

**Mc** : la masse totale du chariot pendule (kg)

**Mp** : la masse du pendule (kg)

**Kp, Ki, Kd** : les gains du PID

**L** : longueur du pendule (m)

**u(t)** : le signal de commande

**y(t)** : la sortie du système à commande

**e** : l'erreur

## Liste des figures :

Figure I.1 : Exemples de robots manufacturiers.....	(7)
Figure I.2 : Exemples de robotique dans le domaine médicale.....	(9)
Figure I.3 : Exemples de la robotique du bâtiment et de la construction.....	(12)
Figure I.4 : Exemples de robot d'agriculture.....	(14)
Figure I.5 : Exemples de robotique dans la Logistique et entreposage.....	(16)
Figure I.6 : Exemples de robotique dans Exploration et interventions en environnements extrêmes.....	(18)
Figure I.7 : Exemples de robotique dans le Services à la personne et aux collectivités...	(20)
Figure I.8 : Exemples d'application du système robot a pendule inverse.....	(24)
Figure II.1 : Schéma de robot pendule inverse sur un chariot système.....	(27)
Figure II.2 : Diagramme d'un système par contrôle linéaire.....	(33)
Figure II.3 : Diagramme d'une structure de contrôler par PID.....	(38)
Figure II.4 : Le model Simulink pour le control linéaire.....	(39)
Figure II.5 : Simulation du positionnement du robot et de la consigne.....	(40)
Figure II.7 : Simulation de l'angulation du pendule par rapport à la consigne.....	(40)
Figure III.1 : Exemple de température entre deux univers de discours différentes.....	(43)
Figure III.2 : Block diagramme d'un contrôleur par logique floue.....	(46)
Figure III.3 : Définition des classes de l'erreur de positionnement.....	(51)
Figure III.4 : Définition des classes de la dérivée de l'erreur de positionnement.....	(52)
Figure III.5 : Définition des classes du signal de commande du robot.....	(53)
Figure III.6 : Le model Simulink pour le control par logique floue.....	(54)
Figure III.7 : Simulation du positionnement et de la consigne du robot.....	(55)
Figure III.8 : Simulation de l'angulation.....	(55)
Figure IV.1 : Philosophie de la commande prédictive.....	(62)
Figure IV.2 : Schéma du principe de la commande prédictive.....	(62)
Figure IV.3 : Schéma de la stratégie du commande prédictive.....	(63)
Figure IV.4 : Schéma de robot pendule inverse sur un chariot système.....	(70)
Figure IV.5 : Bloc SIMULINK robot pendule inversée.....	(72)

<b>Figure IV.6 : Simulation du positionnement du robot et de la consigne.....</b>	<b>(72)</b>
<b>Figure IV.7 : Simulation de l'angulation du pendule par rapport à la consigne. ....</b>	<b>(73)</b>
<b>Figure IV.8 : Comparaison du positionnement du robot mobile entre un contrôleur MPC et FLC.....</b>	<b>(74)</b>
<b>Figure IV.9 : Comparaison de l'angulation du robot mobile entre un contrôleur MPC et FLC.....</b>	<b>(74)</b>

## Liste des tableaux :

<b>TableauII.1 : Paramètre physique du robot pendule inverse sur un chariot système...</b>	<b>(28)</b>
<b>TableauIII.1 : Exemple de fonctions d'appartenance.....</b>	<b>(45)</b>
<b>TableauIII.2 : la matrice d'inférence du contrôleur floue.....</b>	<b>(54)</b>
<b>TableauIV.1 : Nouveau paramètre physique du robot pendule inverse.....</b>	<b>(71)</b>



## Sommaire :

INTRODUCTION GENERAL.....	(1)
---------------------------	-----

### CHAPITRE I : ETAT DE L'ART SUR LA ROBOTIQUE

I.1.Introduction.....	(3)
-----------------------	-----

I.2.Chronologie détaillée de l'évolution de la robotique.....	(3)
---	-----

I.2.1.Préhistoire et Antiquité.....	(3)
-------------------------------------	-----

I.2.2.Moyen Âge et Renaissance.....	(3)
-------------------------------------	-----

I.2.3.18ème et 19ème siècles.....	(3)
-----------------------------------	-----

I.2.4.20ème et 21ème siècles.....	(4)
-----------------------------------	-----

I.3.Les applications concrètes de la robotique dans divers domaines.....	(5)
--	-----

I.3.1.Industrie manufacturière.....	(5)
-------------------------------------	-----

I.3.2.Domaine de la santé.....	(7)
--------------------------------	-----

I.3.3.Bâtiment et construction.....	(10)
-------------------------------------	------

I.3.4.Agriculture de precision.....	(12)
-------------------------------------	------

I.3.5.Logistique et entreposage.....	(14)
--------------------------------------	------

I.3.6.Exploration et interventions en environnements extrêmes .....	(17)
---	------

I.3.7.Services à la personne et aux collectivités.....	(19)
--	------

I.4.L'importance des robots à pendule inversé mobile dans la robotique.....	(21)
---	------

I.4.1. Développement de systèmes de contrôle et d'algorithmes.....	(21)
--	------

I.4.2. Robotique humanoïde et contrôle de l'équilibre.....	(22)
--	------

I.4.3. Stabilisation de plateformes mobiles.....	(22)
--	------

I.5.Applications concrètes des robots MIP.....	(22)
--	------

I.6.Les défis du contrôle des robots.....	(24)
---	------

I.6.1.Approches pour Relever les Défis.....	(25)
---	------

I.7.Conclusion.....	(25)
---------------------	------

### CHAPITRE II : MODELISATION D'UN ROBOT A PENDULE INVERSE MOBILE

II.1.Introduction.....	(26)
------------------------	------

II.2.Principe de fonctionnement.....	(26)
--------------------------------------	------

II.3.Défis de contrôle.....	(27)
-----------------------------	------

II.4.Description du système.....	(27)
----------------------------------	------

<b>II.5.Coordonnées du système.....</b>	<b>(27)</b>
<b>II.6.Modélisation du robot.....</b>	<b>(28)</b>
<b>II.6.1.Energie cinétique du système en mouvement.....</b>	<b>(29)</b>
<b>II.6.2.L'énergie potentielle du système.....</b>	<b>(29)</b>
<b>II.6.3.Equation de Lagrange.....</b>	<b>(30)</b>
<b>II.6.4.Equation de Lagrange pour le degré de liberté.....</b>	<b>(30)</b>
<b>II.6.5.Equation de Lagrange pour le degré de liberté.....</b>	<b>(30)</b>
<b>II.6.5.Linéarisation du model autour du point d'équilibre.....</b>	<b>(30)</b>
<b>II.6.6.Position d'équilibre instable.....</b>	<b>(31)</b>
<b>II.7.Représentation d'état.....</b>	<b>(32)</b>
<b>II.8.Etude de stabilité.....</b>	<b>(33)</b>
<b>II.9.Controle linéaire.....</b>	<b>(33)</b>
<b>II.9.1.Explication du diagramme.....</b>	<b>(34)</b>
<b>II.9.2.Rôle de chaque composant du PID.....</b>	<b>(34)</b>
<b>II.9.2.1.Action proportionnelle (P).....</b>	<b>(34)</b>
<b>II.9.2.2.Action intégrale (I).....</b>	<b>(35)</b>
<b>II.9.2.3.Action dérivée (D).....</b>	<b>(35)</b>
<b>II.9.3.Fonctionnement du calculateur PID.....</b>	<b>(35)</b>
<b>II.9.4.Techniques de réglage et d'optimisation des paramètres du PID.....</b>	<b>(36)</b>
<b>II.9.4.1.Méthodes manuelles.....</b>	<b>(36)</b>
<b>II.9.4.2. Méthodes automatiques.....</b>	<b>(36)</b>
<b>II.9.4.3. Outils logiciels.....</b>	<b>(36)</b>
<b>II.10.Critères de performance.....</b>	<b>(37)</b>
<b>II.11.Avantages et inconvénients du contrôle linéaire.....</b>	<b>(37)</b>
<b>II.12.La structure de contrôle proposée.....</b>	<b>(38)</b>
<b>II.13.Simulation.....</b>	<b>(39)</b>
<b>II.14.Conclusion.....</b>	<b>(41)</b>
<b>CHAPITRE III : CONTROLE PAR LOGIQUE FLOUE (FLC) D'UN ROBOT A PENDULE INVERSE MOBILE</b>	
<b>III.1.Introduction.....</b>	<b>(42)</b>
<b>III.2.Le fonctionnement de la logique floue.....</b>	<b>(42)</b>

III.2.1.Représentation des variables.....	(43)
III.2.2.Ensembles flous.....	(44)
III.2.3.Règles de contrôle.....	(44)
III.2.4.Fonctions d'appartenance.....	(44)
III.2.5.Opérations flous.....	(45)
III.3.Structure d'un contrôleur logique floue.....	(46)
III.4.Fuzzification des entrées du système.....	(46)
III.4.1.Processus de fuzzification.....	(47)
III.5.Inférence.....	(47)
III.5.1.Méthode Mamdani.....	(47)
III.6.La défuzzification.....	(48)
III.6.1. Centre de gravité (COG).....	(48)
III.6.2. Centre des aires (COA).....	(48)
III.6.3. Centre des maximas (MOM).....	(48)
III.6.4. Méthode de la moyenne des maximums (MOM).....	(48)
III.7.Choix de la méthode de défuzzification.....	(48)
III.8.Les avantages du contrôle par logique floue.....	(49)
III.8.1. Traitement des systèmes non linéaires.....	(49)
III.8.2. Robustesse aux incertitudes.....	(49)
III.8.3. Facilité d'implémentation.....	(49)
III.8.4. Applications.....	(49)
III.9.Les inconvénients du contrôle par logique floue.....	(50)
III.10.Simulation.....	(50)
III.10.1.Choix de la forme des classes.....	(50)
III.10.2.Définition des classes pour les deux variables d'entrées.....	(51)
III.10.3.La définition des classes d'entrées.....	(51)
III.10.4.La définition de la classe de sortie.....	(52)
III.11.Conclusion.....	(56)
 CHAPITRE IV : COMMANDE PREDICTIVE (MPC) D'UN ROBOT PENDULE INVERSEE	
IV.1.Introduction.....	(57)

<b>IV.2.Domains d’application.....</b>	<b>(58)</b>
<b>IV.2.1.Industrie chimique et pétrochimique.....</b>	<b>(58)</b>
<b>IV.2.2.Production d'énergie.....</b>	<b>(58)</b>
<b>IV.2.3.Automobile.....</b>	<b>(58)</b>
<b>IV.2.4.Aéronautique.....</b>	<b>(59)</b>
<b>IV.2.5.Autres domaines d'application.....</b>	<b>(59)</b>
<b>IV.3.Les concepts.....</b>	<b>(60)</b>
<b>IV.3.1.Modèle mathématique.....</b>	<b>(60)</b>
<b>IV.3.2.Horizon de prédiction.....</b>	<b>(60)</b>
<b>IV.3.3.Fonction de coût.....</b>	<b>(60)</b>
<b>IV.3.4.Optimisation.....</b>	<b>(60)</b>
<b>IV.3.5.Contraintes.....</b>	<b>(60)</b>
<b>IV.3.6.Retour d'information.....</b>	<b>(60)</b>
<b>IV.3.7.Résolution en ligne.....</b>	<b>(61)</b>
<b>IV.3.8.Gestion des perturbations.....</b>	<b>(61)</b>
<b>IV.3.9.Contrôle multivariable.....</b>	<b>(61)</b>
<b>IV.3.10.Applications.....</b>	<b>(61)</b>
<b>IV.4.Principe de la commande prédictive.....</b>	<b>(61)</b>
<b>IV.5.Eléments d’une commande prédictive.....</b>	<b>(63)</b>
<b>IV.5.1.Le modèle du système.....</b>	<b>(63)</b>
<b>IV.5.2.Le critère de performance.....</b>	<b>(63)</b>
<b>IV.5.3.L'algorithme d’optimisation.....</b>	<b>(63)</b>
<b>IV.6.Les différents types d'algorithmes prédictifs.....</b>	<b>(64)</b>
<b>IV.6.1.Régression linéaire.....</b>	<b>(64)</b>
<b>IV.6.2.K-Nearest Neighbors (KNN) .....</b>	<b>(64)</b>
<b>IV.6.3.Arbres de décision.....</b>	<b>(64)</b>
<b>IV.6.4.Forêts aléatoires.....</b>	<b>(65)</b>
<b>IV.6.5.Réseaux de neurones artificiels.....</b>	<b>(65)</b>
<b>IV.6.6.Machines à vecteurs de support (SVM).....</b>	<b>(65)</b>
<b>IV.6.7.Algorithmes génétiques.....</b>	<b>(65)</b>

<b>IV.7.La commande prédictive à base d'un modèle d'état.....</b>	<b>(65)</b>
<b>IV.7.1.Calcul des prédictions.....</b>	<b>(65)</b>
<b>IV.7.1.1. Calcul des prédictions des états et de la sortie.....</b>	<b>(66)</b>
<b>IV.7.2.Optimisation.....</b>	<b>(68)</b>
<b>IV.8.Avantages et inconvénients du MPC.....</b>	<b>(68)</b>
<b>IV.8.1.Avantages du MPC.....</b>	<b>(68)</b>
<b>IV.8.2.Inconvénients du MPC.....</b>	<b>(69)</b>
<b>IV.9.Commande prédictive (MPC) d'un robot pendule inversée.....</b>	<b>(70)</b>
<b>IV.10.Analyse comparative des contrôleurs MPC et FLC pour un robot à pendule inversé mobile.....</b>	<b>(74)</b>
<b>IV.10.1.Comparaison des réponses.....</b>	<b>(75)</b>
<b>IV.10.2.Analyse comparative des caractéristiques de contrôle.....</b>	<b>(76)</b>
<b>IV.11.Conclusion.....</b>	<b>(77)</b>
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>(78)</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>(80)</b>

## INTRODUCTION GENERALE :

La recherche de l'équilibre est une force inhérente à la nature, se manifestant aussi bien dans le domaine physique que dans le monde métaphysique. En revanche, les artefacts humains se distinguent par un équilibre dicté par notre volonté. Cette maîtrise nous permet de les concevoir pour résister à des forces et à des contraintes particulières.

Les robots étant une des nombreuses créations de l'homme leur industrie est en plein essor certain même dire que c'est l'âge d'or de la robotique, ne-au moins leurs Régulations demeure un vrai challenge c'est pour ça Leurs mécanismes de contrôle jouent un rôle crucial dans ce domaine, permettant aux robots d'effectuer des tâches avec précision et exactitude. Trois mécanismes de contrôle couramment utilisés sont le contrôle linéaire le contrôle prédictif de modèle (MPC) et le contrôle à logique floue (FLC). Ces mécanismes sont largement appliqués au robots pendule inversé sur chariot, où l'objectif est de maintenir l'équilibre et la stabilité de la tige. Et dans ce mémoire, nous Aurons recours à ces trois contrôleurs.

Le contrôle linéaire a une longue histoire et est largement utilisé en raison de sa simplicité et de son efficacité. Il a été introduit pour la première fois au début du 20e siècle et a depuis été affiné et amélioré. Le MPC, quant à lui, est un développement plus récent, apparu dans les années 1970. Il s'agit d'une stratégie de contrôle basée sur un modèle qui prédit le comportement futur du système et optimise les actions de contrôle en conséquence. Le FLC, basé sur la théorie des ensembles flous, a été introduit dans les années 1960 et a gagné en popularité en raison de sa capacité à gérer les incertitudes et les non-linéarités. Des études antérieures ont montré que le contrôle linéaire peut obtenir de bonnes performances dans le contrôle des robots à pendule inversé, mais qu'il peut avoir des difficultés avec des systèmes plus complexes qui nécessitent un réglage fin des paramètres. Le MPC s'est avéré offrir d'excellentes performances en termes de stabilité, mais il nécessite un modèle détaillé du système, qu'il peut être difficile d'obtenir. La commande FLC, avec sa capacité à gérer les incertitudes, s'est également avérée efficace pour contrôler les robots à pendule inversé.

Notre objectif principal est de comparer et d'analyser les performances des contrôleurs MPC et FLC dans le contexte du robot pendule inversé sur chariot. Pour ce faire, nous mènerons des expériences rigoureuses en utilisant les puissantes capacités de simulation de MATLAB/Simulink. Ces simulations nous permettront d'observer le comportement du système sous chaque approche

de contrôle, en évaluant des paramètres critiques tels que le temps de stabilisation, le dépassement et l'effort de contrôle.

Notre mémoire s'articule autour de quatre axes principaux :

1. Une revue de littérature sur l'état de l'art de la robotique en mettant la lumière sur les origines de ce domaine et ses avancées.
2. Établissement d'une modélisation mathématique du robot pendule inversé sur un chariot en le maîtrisant avec le contrôle linéaire, avec exploration de ses paramètres et ses performances en simulation.
3. Découverte de la logique floue tout en développant un système de contrôle flou adapté au robot pendule, et en évaluant ses performances en simulation.
4. Simulation du MPC ; implémentez un contrôleur MPC sur le pendule et analysez ses performances en simulation

Les résultats de notre étude permettront d'apporter des éclairages précieux sur le choix optimal du mécanisme de contrôle pour le pilotage du robot pendule inversé sur chariot. Ces conclusions pourront être étendues à d'autres systèmes robotiques similaires, contribuant ainsi à l'avancement des connaissances dans ce domaine crucial de la robotique.

# CHAPITRE I :

## ETAT DE L'ART SUR LA ROBOTIQUE



## **I.1.Introduction :**

L'histoire de la robotique, riche et captivante, retrace un parcours fascinant de l'ingéniosité humaine, marqué par l'aspiration à imiter et à amplifier nos capacités. Depuis les premiers mécanismes rudimentaires de l'Antiquité jusqu'aux robots sophistiqués d'aujourd'hui, ce domaine n'a cessé d'évoluer, façonné par des inventions révolutionnaires et des avancées technologiques majeures.

## **I.2.Chronologie détaillée de l'évolution de la robotique :**

### **I.2.1.Préhistoire et Antiquité:**

- **3500 av. J.-C. :** Invention de la roue, considérée comme l'un des premiers mécanismes précurseurs de la robotique.
- **1500 av. J.-C. :** Apparition des premières automates mécaniques en Grèce et en Égypte, animés par des forces hydrauliques ou pneumatiques.
- **120 av. J.-C. :** Héron d'Alexandrie décrit des machines sophistiquées comme l'éolipyle (première turbine à vapeur) et des automates hydrauliques.

### **I.2.2.Moyen Âge et Renaissance:**

- **12ème siècle :** Développement des horloges mécaniques, considérées comme des ancêtres des robots programmables.
- **15ème siècle :** Léonard de Vinci conçoit des dessins et plans de machines humanoïdes et d'automates, dont un robot chevalier.
- **16ème siècle :** Apparition des premiers automates à vapeur et à air comprimé, utilisés pour l'animation de spectacles et d'horloges.

### **I.2.3.18ème et 19ème siècle:**

- **1738 :** Jacques de Vaucanson présente un automate capable de jouer de la flûte, considéré comme une avancée majeure en robotique.

- **1804** : Joseph Marie Jacquard invente le métier à tisser Jacquard, utilisant des cartes perforées pour programmer des motifs complexes.
- **1897** : Nikola Tesla présente un "télé automate", un bateau radiocommandé considéré comme l'un des premiers robots autonomes.

#### **I.2.4.20ème et 21ème siècles:**

- **1920** : Karel Čapek utilise le mot "robot" dans sa pièce de théâtre R.U.R., popularisant le terme et la notion de machine humanoïde.
- **1950** : Développement des premiers robots industriels, utilisés pour la manipulation et l'assemblage automatisés.
- **1960** : Création des premiers robots humanoïdes, comme Wabot-1 (1973) et Waseda (1980), au Japon.
- **1970** : Développement de la robotique mobile, avec des robots comme Shakey (1972) capable de naviguer et d'interagir avec son environnement.
- **1980** : Apparition de la vision artificielle et de l'intelligence artificielle, permettant aux robots de percevoir et d'interpréter leur environnement.
- **1990** : Développement de robots humanoïdes plus sophistiqués, comme Asimo (1997) et Honda P2 (2000).
- **2000** : essor de la robotique collaborative, avec des robots comme Baxter (2012) et Sawyer (2015) conçus pour travailler aux côtés des humains.
- **2010** : développement de robots autonomes pour la livraison, la surveillance et l'exploration spatiale.
- **2020** : Apprentissage automatique et intelligence artificielle de plus en plus sophistiqués pour des robots plus adaptables et autonomes.

Cette chronologie est une simplification d'une histoire riche et complexe. De nombreuses autres inventions et contributions importantes ont marqué l'évolution de la robotique [1].

Voici quelques points clés à retenir :

- La robotique a une longue et riche histoire, remontant à l'Antiquité.
- Le développement de la robotique a été marqué par des progrès technologiques dans divers domaines, tels que la mécanique, l'électronique, l'informatique et l'intelligence artificielle.
- La robotique a eu un impact profond sur de nombreux aspects de la société, de l'industrie à la médecine en passant par la vie quotidienne.
- L'avenir de la robotique est prometteur, avec des applications potentielles dans des domaines comme la santé, l'éducation et l'exploration spatiale.

## **I.3.Les applications concrètes de la robotique dans divers domaines :**

### **I.3.1.Industrie manufacturière:**

- **Automatisation des tâches répétitives et dangereuses :**
  - Les robots sont utilisés pour effectuer des tâches répétitives et dangereuses pour les humains, comme la soudure, la peinture et l'assemblage de composants dans les usines automobiles et électroniques.
  - Exemples précis:
    - **Bras robotisés** pour souder les carrosseries de voitures, avec une précision et une répétitivité accrue, réduisant les risques d'accidents pour les travailleurs.
    - **Robots collaboratifs** pour assister les opérateurs dans l'assemblage de composants électroniques, augmentant la productivité et la qualité du produit final.
- **Amélioration de la précision et de la qualité de la production :**
  - Les robots peuvent effectuer des tâches avec une précision et une répétitivité élevées, ce qui permet d'améliorer la qualité des produits finis et de réduire les rebuts.
  - Exemples précis:

- **Robots de mesure** pour contrôler les dimensions des pièces avec une précision micrométrique, garantissant la conformité aux normes et la précision des assemblages.
- **Robots de peinture** pour appliquer une peinture uniforme et précise sur les produits, réduisant les défauts et les gaspillages de peinture.
- **Augmentation de la flexibilité et de la réactivité de la production :**
  - Les robots peuvent être reprogrammés rapidement pour effectuer différentes tâches, ce qui permet aux entreprises de s'adapter aux changements de la demande et de produire une variété de produits [2].
  - Exemples précis:
    - **Cellules robotiques flexibles** pour assembler différents modèles de produits sur la même ligne de production, permettant une adaptation rapide aux besoins du marché.
    - **Robots mobiles autonomes** pour transporter des matériaux et des produits finis dans l'usine, optimisant la gestion des stocks et la logistique.
- **Réduction des coûts de production :**
  - L'utilisation de robots peut réduire les coûts de production en augmentant la productivité, en réduisant les rebuts et en diminuant le besoin en main-d'œuvre.
  - Exemples précis:
    - **Calcul du retour sur investissement (ROI)** pour l'implémentation de robots, démontrant la rentabilité de l'automatisation à long terme.
    - **Étude comparative** des coûts de production avec et sans robots, soulignant les économies potentielles.

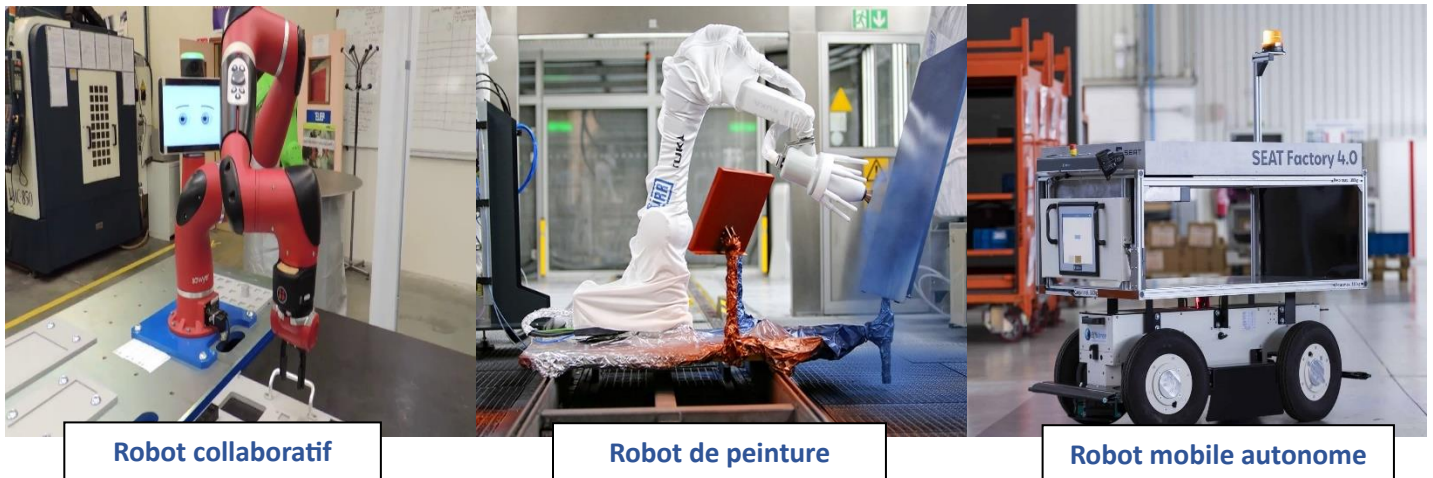


Figure I.1 : Exemples de robots manufacturiers.

#### Limites et défis de l'utilisation de la robotique dans l'industrie manufacturière :

- Coût initial élevé de l'investissement en robots et en infrastructure.
- Nécessité d'une main-d'œuvre qualifiée pour programmer et entretenir les robots.
- Risque de perte d'emplois pour certains travailleurs.
- Difficulté d'intégrer les robots dans des processus de production existants.

#### Perspective future:

- **Application** de la robotique collaborative et d'intelligence artificielle à l'industrie manufacturière.

#### I.3.2. Domaine de la santé:

- **Chirurgie robotique** : La chirurgie mini-invasive utilisant des bras robotiques améliore la précision chirurgicale, réduit les traumatismes pour le patient et permet des temps de récupération plus rapides.
  - **Exemples concrets:**
    - **Système chirurgical Da Vinci** - une plateforme chirurgicale assistée par robot permettant aux chirurgiens de réaliser des procédures laparoscopiques

complexes avec une dextérité et un contrôle amélioré (Source : Robotics in General Surgery, Giovanni Vicini, Matteo Adamo).

- **Prostatectomie laparoscopique assistée par robot** - chirurgie mini-invasive du cancer de la prostate réalisée avec le système Da Vinci, entraînant une perte de sang réduite et une récupération plus rapide par rapport à la chirurgie ouverte traditionnelle (Source : Robotics in Urology, Ajay Khanna, Manesh Desai).
- **Technologies d'assistance** : Les robots offrent une assistance physique et cognitive aux personnes handicapées ou aux personnes ayant des limitations liées à l'âge.
  - **Exemples concrets:**
    - **Exosquelettes** - des dispositifs robotiques portables qui fournissent un soutien physique et une assistance à la mobilité aux personnes handicapées ou ayant des besoins de rééducation (Source : Robotics, Medicine, and Rehabilitation, Joseph F. Engelberger).
    - **Robots d'assistance sociale (RAS)** - robots conçus pour fournir de la compagnie, un soutien émotionnel et une stimulation cognitive aux personnes âgées ou isolées (Source : Social Assistive Robotics in Education and Elderly Care, Dario Floreano, Luca Maria Gambardella).
- **Robotique de rééducation** : Les robots aident à la physiothérapie et à la rééducation, en proposant aux patients des programmes d'exercices répétitifs et contrôlés.
  - **Exemples concrets:**
    - **Systèmes robotisés d'entraînement à la marche** - des plateformes robotiques qui aident les patients atteints de troubles neurologiques à réapprendre les schémas de marche et à améliorer la fonction de la marche (Source : Neurorehabilitation Robotics, Timothy G. Sugar, James M. Lynch).
    - **Thérapie robotique du bras** - des dispositifs robotiques qui guident et soutiennent les patients dans la réalisation d'exercices répétitifs du bras pour

la rééducation d'un AVC ou d'une blessure (Source : Robotics and Neurorehabilitation, Elliot Saltzman).

- **Téléprésence et soins de santé à distance** : Les robots équipés de caméras et de capteurs permettent aux médecins d'examiner à distance les patients et d'effectuer des procédures mini-invasives dans des lieux géographiquement éloignés.
  - **Exemples concrets:**
    - **Robots de présence à distance (RPD)** - des robots mobiles utilisés par les médecins pour rendre visite virtuellement aux patients hospitalisés et effectuer des consultations (Source : Introduction to Autonomous Mobile Robots, Roland Siegwart, Nour R. Nourbakhsh).
    - **Interventions de cathétérisation robotisées** - des robots utilisés par les chirurgiens pour effectuer à distance des procédures mini-invasives, telles que le cathétérisme cardiaque, sur des patients situés dans des hôpitaux différents (Source : Robotics in General Surgery, Giovanni Vicini, Matteo Adamo).



Figure I.2 : Exemples de robotique dans le domaine médicale.

**Défis et considérations dans la robotique médicale :**

- Coût élevé des dispositifs médicaux robotiques.
- Obstacles réglementaires et considérations éthiques entourant les procédures assistées par robot.
- Nécessité de programmes de formation solides pour les professionnels de la santé sur l'utilisation et la maintenance des systèmes robotiques.
- Risque de dépendre excessivement des robots et de négliger l'interaction humaine dans les soins aux patients.

**Perspective future:**

- **Impact de la robotique sur la formation chirurgicale** et développement de plateformes de simulation robotique pour les chirurgiens.
- **Cadres éthiques pour les soins assistés par robot** traitant de l'autonomie du patient, du consentement éclairé et des biais potentiels dans les robots médicaux à base d'IA.

**I.3.3.Bâtiment et construction:**

- **Automatisation des tâches dangereuses et pénibles [3]:** Les robots peuvent réaliser des tâches dangereuses en hauteur ou dans des environnements confinés, réduisant les risques d'accidents pour les travailleurs du bâtiment.
  - **Exemples concrets:**
    - **Bras robotisés de démolition** capables de briser et de trier des matériaux de construction en toute sécurité, minimisant l'exposition des travailleurs à la poussière et aux débris (Source : Robots et drones dans le BTP, FNTP).
    - **Robots d'inspection** équipés de caméras et de capteurs pour effectuer des inspections de structures et d'infrastructures difficiles d'accès, évitant aux humains de travailler dans des conditions dangereuses (Source : Robotisation dans le secteur de la construction : une révolution qui transforme les emplois, Batiment-Historique.org).



- **Amélioration de la précision et de la productivité** : L'utilisation de robots permet d'effectuer des tâches de construction avec une plus grande précision et une meilleure productivité, réduisant les délais et les coûts de main-d'œuvre.
  - **Exemples concrets:**
    - **Imprimantes 3D pour la construction** permettant d'imprimer des structures en béton ou en matériaux composites couche par couche, offrant une automatisation partielle de la construction de murs et de bâtiments (Source : Impression 3D pour la construction : Enjeux et perspectives, Le Moniteur du BTP).
    - **Bras robotisés pour la pose de briques ou de cloisons sèches** qui peuvent assembler des éléments de construction avec une rapidité et une précision accrue, augmentant la productivité sur les chantiers (Source : Des robots sur vos chantiers 4.0, ACQ Construire).
- **Maintenance et inspection des infrastructures** : Les robots peuvent effectuer des inspections et des interventions de maintenance sur des structures et des infrastructures difficiles d'accès ou dangereuses pour les humains.
  - **Exemples concrets:**
    - **Robots d'entretien des ponts et des barrages** capables de réaliser des inspections visuelles et des travaux de maintenance en hauteur, améliorant la sécurité des travailleurs et la durée de vie des infrastructures (Source : Exemples d'applications de la robotique dans le BTP, ConstructionRobots.com).
    - **Robots de nettoyage des canalisations** conçus pour naviguer dans les réseaux de canalisations et effectuer des inspections et des nettoyages en profondeur, réduisant les coûts et les perturbations pour les usagers (Source : Robots et drones dans le BTP, FNTP).

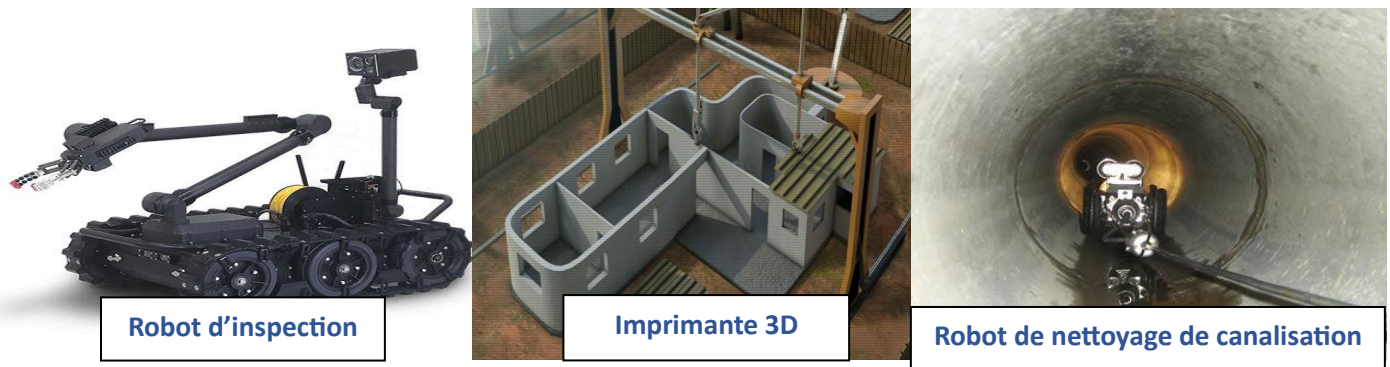


Figure I.3 : Exemples de la robotique du bâtiment et de la construction .

#### Défis et considérations dans la robotique du bâtiment et de la construction :

- Coût d'investissement initial élevé pour l'acquisition et la maintenance des robots de construction.
- Nécessité d'adapter les chantiers de construction à l'intégration des robots et de former les travailleurs à leur utilisation.
- Réglementations strictes en matière de sécurité sur les chantiers de construction qui peuvent ralentir l'adoption de la robotique.
- Limites techniques actuelles des robots de construction en termes d'autonomie et d'adaptabilité aux environnements variables des chantiers.

#### I.3.4.Agriculture de precision:

- **Automatisation des tâches répétitives et pénibles** : Les robots peuvent effectuer des tâches agricoles chronophages et physiquement exigeantes, libérant les agriculteurs pour des activités à plus forte valeur ajoutée.
  - **Exemples concrets:**
    - **Tracteurs autonomes** équipés de GPS et de capteurs pour labourer, semer et récolter les cultures de manière autonome, augmentant l'efficacité et réduisant la fatigue des agriculteurs (Source : L'agriculture de précision

avec les robots et les drones, Direction de l'information légale et administrative).

- **Robots de traite automatisés** qui effectuent la traite des vaches laitières de manière robotisée et hygiénique, améliorant le bien-être animal et libérant du temps aux éleveurs (Source : La robotique de traite : Fonctionnement, avantages et limites, Chambres d'agriculture France).
- **Optimisation de l'utilisation des ressources** : Les robots équipés de capteurs et d'intelligence artificielle peuvent analyser les données du terrain et des cultures pour optimiser l'utilisation de l'eau, des engrais et des pesticides.
  - **Exemples concrets:**
    - **Robots de désherbage** capables d'identifier et d'éliminer les mauvaises herbes de manière ciblée, réduisant l'utilisation des herbicides et leur impact sur l'environnement (Source : La robotique au service de l'agriculture de précision, La France Agricole).
    - **Systèmes d'irrigation automatisés** pilotés par des capteurs d'humidité du sol pour arroser les cultures uniquement en fonction de leurs besoins, minimisant le gaspillage d'eau (Source : L'agriculture de précision avec les robots et les drones, Direction de l'information légale et administrative).
- **Amélioration de la qualité et du rendement des cultures** : La surveillance et l'intervention automatisées des robots permettent de détecter les maladies et les ravageurs à un stade précoce, améliorant la qualité des récoltes et augmentant les rendements agricoles.
  - **Exemples concrets:**
    - **Drones agricoles** équipés de caméras et de capteurs multispectraux pour surveiller la santé des cultures et détecter rapidement les zones touchées par des maladies ou des carences nutritionnelles (Source : Le drone, un outil complémentaire pour l'agriculture de précision, ITAVI).

- **Robots de pollinisation** conçus pour polliniser les cultures de manière automatisée, palliant le déclin des populations d'abeilles et augmentant la production de fruits et légumes (Source : Des robots abeilles pour polliniser les cultures ? INRAE).

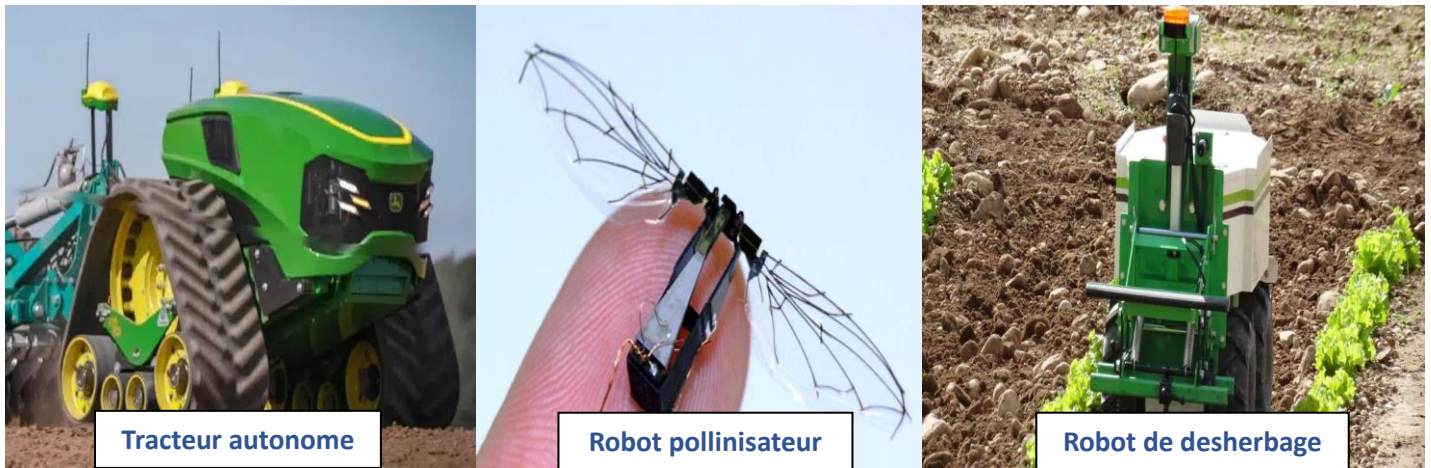


Figure I.4 : Exemples de robot d'agriculture.

#### Défis et considérations dans la robotique agricole :

- Coût d'investissement initial élevé pour les technologies robotiques agricoles.
- Nécessité d'une infrastructure de communication fiable (réseau cellulaire) pour les robots connectés.
- Disponibilité de main-d'œuvre qualifiée pour entretenir et programmer les robots agricoles.
- Impact potentiel de la robotisation sur l'emploi agricole et la nécessité d'une reconversion des agriculteurs.

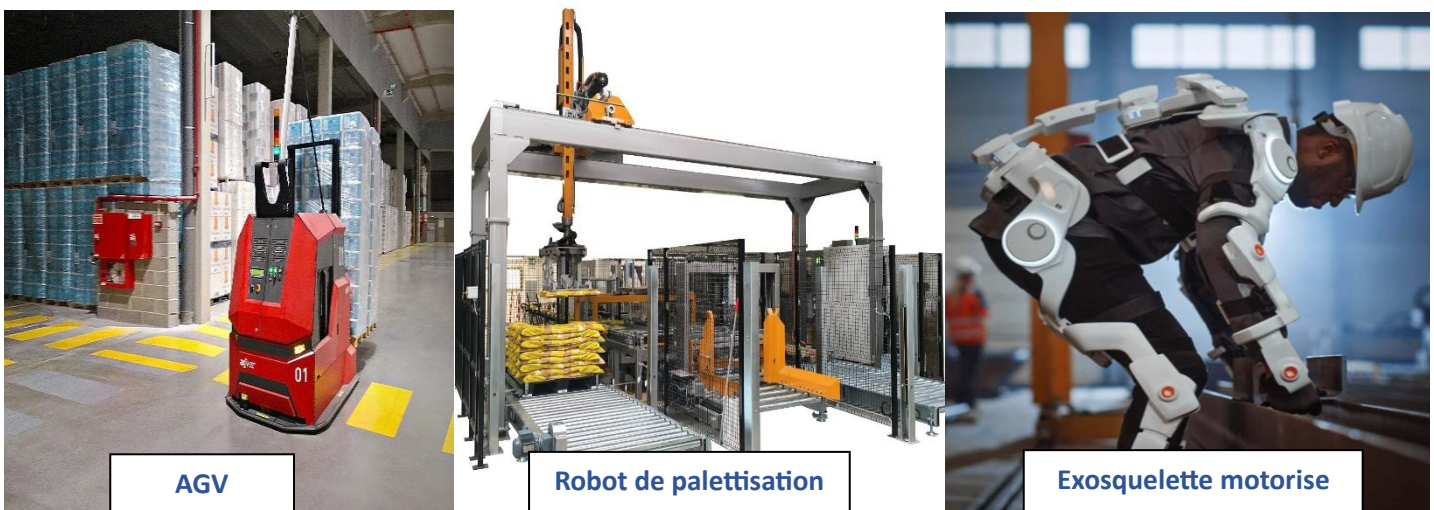
#### I.3.5. Logistique et entreposage [4]:

- **Amélioration de l'efficacité et de la productivité** : Les robots automatisent les tâches de manutention et de stockage dans les entrepôts, augmentant la rapidité et la précision des opérations μ.

- **Exemples concrets:**
  - **Bras robotisés de picking** capables de prélever et de trier des articles individuels dans les rayonnages des entrepôts, augmentant la vitesse de préparation des commandes (Source : Robotisation des entrepôts : un enjeu majeur de la supply chain, Voxlog).
  - **Véhicules à guidage automatique (AGV)** circulant de manière autonome dans les entrepôts pour transporter des palettes et des marchandises, optimisant les flux logistiques (Source : La robotique dans la logistique : un atout pour la performance)
- **Optimisation de l'espace de stockage :** Les systèmes de stockage automatisé utilisant des navettes et des robots permettent d'optimiser l'utilisation de l'espace vertical dans les entrepôts et d'augmenter la capacité de stockage.
  - **Exemples concrets:**
    - **Systèmes de stockage et de récupération automatisés (ASRS)** utilisant des robots mobiles pour stocker et récupérer des palettes dans des rayonnages hauts, maximisant l'espace disponible (Source : Systèmes de stockage et de récupération automatisés (ASRS), Honeywell Safety Products).
    - **Stockage automatisé par navettes** - des navettes robotisées compactes se déplacent sur des rails verticaux pour stocker et récupérer des marchandises dans des rayonnages étroits, optimisant l'espace au sol (Source : La navette robotisée : un système de stockage automatisé innovant, Manutan).
- **Amélioration de la sécurité et de la réduction des TMS (troubles musculo-squelettiques) :** Les robots prennent en charge les tâches de manutention lourdes et répétitives, réduisant les risques de blessures pour les travailleurs.

- **Exemples concrets:**

- **Exosquelettes motorisés** portés par les opérateurs pour les assister dans la manipulation de charges lourdes, diminuant la fatigue et les risques de lésions dorsales (Source : L'exosquelette : un robot porté qui assiste l'homme au travail, Institut National de Recherche et de Sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles (INRS)).
- **Robots de palettisation** qui empilent automatiquement les palettes de marchandises de manière stable et sécurisée, évitant les accidents de manutention (Source : La robotique collaborative au service de la palettisation, Mecanews).



**Figure I.5 : Exemples de robotique dans la Logistique et entreposage.**

**Défis et considérations dans la robotique logistique :**

- Coût d'investissement initial élevé pour la mise en place de systèmes robotiques complexes.
- Nécessité d'une adaptation des infrastructures des entrepôts pour intégrer les robots.

- Impact potentiel de la robotisation sur les emplois dans la logistique et la nécessité d'une requalification de la main-d'œuvre.
- Défis techniques liés à la manipulation d'objets de formes et de poids variés rencontrés en logistique.

### I.3.6.Exploration et interventions en environnements extrêmes:

- **Exploration spatiale et sous-marine** : Les robots peuvent explorer des environnements extrêmes et hostiles à l'homme, comme l'espace et les profondeurs océaniques [5], collectant des données scientifiques et effectuant des missions de maintenance.
  - **Exemples concrets:**
    - **Rovers martiens** explorant la surface de Mars et collectant des données géologiques et atmosphériques, permettant d'accroître nos connaissances sur la planète rouge (Source : Les robots de l'exploration spatiale, Centre National d'Études Spatiales (CNES)).
    - **Engins sous-marins autonomes (AUV)** capables de plonger à des profondeurs extrêmes et d'explorer les fonds marins, cartographiant les reliefs et étudiant la faune et la flore sous-marine (Source : Les robots et l'exploration des océans, Ifremer).
- **Interventions en zones sinistrées** : Les robots peuvent intervenir dans des zones dangereuses suite à des catastrophes naturelles ou des accidents industriels, effectuant des recherches et des opérations de sauvetage.
  - **Exemples concrets:**
    - **Robots de recherche et de sauvetage (R&R)** déployés dans les zones sinistrées suite à des tremblements de terre ou des effondrements de bâtiments pour localiser des survivants piégés sous les décombres (Source : Robotique de sécurité civile : les robots au service du sauvetage, Ministère de l'Intérieur).



- **Robots de dépollution** capables d'intervenir dans des sites contaminés par des produits chimiques ou radioactifs, limitant l'exposition des humains aux substances dangereuses (Source : Robots de dépollution en milieu nucléaire, IRSN).
- **Démineur robotique** : Les robots démineurs permettent de détecter et neutraliser les mines terrestres et autres engins explosifs de manière sécurisée et efficace.
  - **Exemples concrets:**
    - **Véhicules de déminage télécommandés** utilisés pour désamorcer les mines terrestres et autres explosifs de guerre enfouis, protégeant les démineurs humains des dangers d'explosion (Source : Le déminage humanitaire face aux nouveaux défis, Comité International de la Croix-Rouge (CICR)).



**Figure I.6 : Exemples de robotique dans Exploration et interventions en environnements extrêmes.**

**Défis et considérations dans la robotique d'exploration et d'intervention :**

- Conception de robots robustes et autonomes capables de fonctionner dans des environnements extrêmes et souvent imprévisibles.
- Développement de systèmes d'alimentation et de communication adaptés aux contraintes des environnements hostiles.



- Importance de la sécurité et de la fiabilité des robots pour garantir leur efficacité et éviter les accidents.
- Aspects éthiques liés à l'utilisation de robots dans des situations potentiellement dangereuses.

#### Perspective future:

- **L'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique** appliqués aux robots d'exploration et d'intervention pour une meilleure perception de l'environnement et une prise de décision autonome.
- **Le développement de la robotique bio-inspirée** s'inspirant des animaux pour concevoir des robots plus agiles et adaptables aux environnements difficiles.
- **La collaboration internationale** dans le domaine de la robotique pour relever les défis de l'exploration spatiale et sous-marine.

#### I.3.7.Services à la personne et aux collectivités:

- **Assistance aux personnes âgées et handicapées** : Les robots d'assistance peuvent aider les personnes âgées ou handicapées à accomplir des tâches quotidiennes et à vivre de manière plus autonome [6].
  - **Exemples concrets:**
    - **Robots d'aide à la mobilité** tels que des fauteuils roulants électriques intelligents ou des exosquelettes, offrant une assistance physique pour les personnes à mobilité réduite (Source : Robotique d'assistance pour le maintien à domicile des personnes âgées, ONSEIL National de la Silver économie).
    - **Robots compagnons** conçus pour tenir compagnie aux personnes âgées isolées, leur proposant des conversations interactives et un soutien émotionnel (Source : Robots d'assistance sociale : un accompagnement pour les personnes âgées ? France Alzheimer).

- **Ménage et entretien** : Les robots aspirateurs et lave-sol autonomes effectuent des tâches ménagères répétitives, libérant du temps pour les utilisateurs.
  - **Exemples concrets:**
    - **Robots aspirateurs intelligents** capables de cartographier l'environnement domestique et de nettoyer les sols de manière autonome et efficace (Source : Les robots aspirateurs : fonctionnalités et choix, UFC-Que Choisir).
    - **Robots lave-sol automatiques** qui nettoient et désinfectent les surfaces au sol sans intervention humaine (Source : Robots lave-sol : comment choisir et à quel prix ? L'internaute).
- **Sécurité et surveillance** : Les robots mobiles patrouillent des zones résidentielles ou commerciales et peuvent dissuader les intrusions et alerter les autorités en cas d'incident.
  - **Exemples concrets:**
    - **Robots de surveillance** équipés de caméras et de capteurs pour patrouiller les quartiers et dissuader les actes de vandalisme ou d'effraction (Source : Robots de sécurité : un marché en pleine croissance, Les Echos).
    - **Robots de tonte autonomes** capables de tondre la pelouse de manière automatique tout en détectant et évitant les obstacles (Source : Robots tondeuses : comment choisir et à quel prix ? Que Choisir).

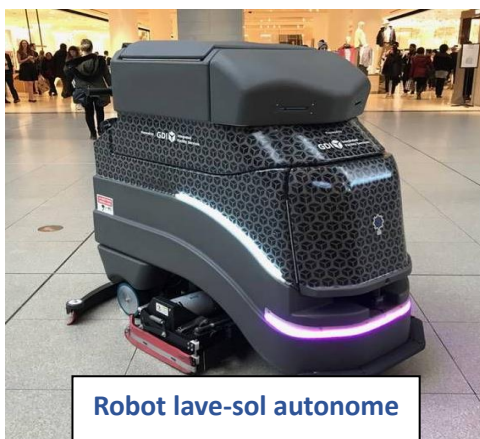


Figure I.7 : Exemples de robotique dans le Services à la personne et aux collectivités.

**Défis et considérations dans la robotique de service :**

- Coût d'achat et d'entretien des robots domestiques qui peut encore être élevé pour certains budgets.
- Aspects de sécurité et de confidentialité des données collectées par les robots domestiques.
- Acceptation sociale des robots d'assistance et questions éthiques liées à leur utilisation auprès des personnes âgées ou handicapées.
- Capacité des robots à interagir de manière naturelle et intuitive avec les utilisateurs humains.

**Perspective future:**

- **Le développement de la robotique affective** permettant aux robots d'exprimer et de comprendre les émotions pour une meilleure interaction avec les utilisateurs.
- **La réglementation de la robotique de service** pour garantir la sécurité, la protection de la vie privée et l'utilisation éthique de ces technologies.

## **I.4.L'importance des robots à pendule inversé mobile dans la robotique :**

Les robots à pendule inversé mobile (MIP) ont gagné une importance considérable dans le domaine de la robotique en raison de leur complexité inhérente et de leur ressemblance avec l'équilibre et la locomotion humains. Ces robots, caractérisés par leur nature instable et leur dynamique non linéaire, constituent un problème de contrôle difficile, ce qui en fait une plateforme précieuse pour tester et développer des algorithmes de contrôle avancés. De plus, les robots MIP trouvent des applications dans divers domaines, démontrant leur polyvalence et leur impact potentiel.

### **I.4.1. Développement de systèmes de contrôle et d'algorithmes:**

Les robots MIP servent de référence pour évaluer et affiner les techniques de contrôle, en particulier dans le domaine des systèmes non linéaires et instables. Leur capacité à s'équilibrer et à naviguer malgré leur instabilité inhérente en fait des candidats idéaux pour tester l'efficacité d'algorithmes de contrôle comme le contrôle prédictif par modèle (MPC), le contrôle par logique

floue (FLC) et l'apprentissage par renforcement (RL). Par exemple, des chercheurs du Control Systems Group du MIT ont utilisé un robot MIP pour étudier les performances du MPC dans des conditions variées.

### **I.4.2. Robotique humanoïde et contrôle de l'équilibre:**

Les robots MIP offrent une plateforme précieuse pour étudier les mécanismes d'équilibre et de locomotion humains. Leur capacité à maintenir la stabilité et à s'adapter aux perturbations reflète les défis auxquels les humains sont confrontés pour maintenir leur équilibre. En analysant les stratégies de contrôle des robots MIP, les chercheurs acquièrent des connaissances sur le contrôle de l'équilibre humain et développent des stratégies pour améliorer les prothèses, les exosquelettes et les dispositifs d'assistance.

### **I.4.3. Stabilisation de plateformes mobiles:**

Les principes de contrôle développés pour les robots MIP peuvent être étendus à la stabilisation d'autres plateformes mobiles, telles que les scooters auto-équilibrés, les Segways et les véhicules aériens sans pilote (UAV). La capacité à s'équilibrer et à se déplacer dans des environnements complexes est cruciale pour ces plateformes, et les robots MIP offrent un cadre contrôlé pour tester et affiner les algorithmes de stabilisation.

## **I.5.Applications concrètes des robots MIP:**

- **Véhicules auto-équilibrés:** Les principes du contrôle MIP ont été appliqués avec succès au développement de véhicules auto-équilibrés comme les Segways et les monocycles électriques. Ces véhicules offrent un mode de transport pratique et stable, en particulier dans les environnements urbains encombrés.
  - **Exemples concrets:**
    - **Pendule inversé mobile de l'Université de Karlsruhe:** Ce robot MIP, développé à l'Université de Karlsruhe en Allemagne, est connu pour sa capacité à effectuer des manœuvres complexes, notamment l'équilibrage sur une plateforme mobile et la montée d'escaliers.

- **Robot Mini-Cheetah du MIT:** Le robot Mini-Cheetah du MIT, un quadrupède avec des pattes à pendule inversé, présente une agilité et un équilibre remarquables, capables de courir, de sauter et même de faire des backflips.
- **Stabilisation des canons:** Les robots MIP ont été utilisés dans le développement de systèmes de stabilisation de canons. La capacité à maintenir l'équilibre et à contrer les forces de recul est essentielle pour un ciblage et un tir précis des canons, en particulier sur les plateformes d'artillerie mobile.
  - **Exemples concrets:**
    - **Le char allemand :** avec canon stabilisé tel que le Leopard 2, qui est équipé d'un canon stabilisé pour permettre des tirs précis en mouvement.
- **Exploration spatiale:** Les robots MIP sont envisagés pour des missions d'exploration spatiale en raison de leur capacité à fonctionner dans des environnements difficiles et instables. Leur adaptabilité et leurs capacités de contrôle de l'équilibre pourraient être précieuses pour des tâches telles que la collecte d'échantillons, l'exploration du terrain et la construction sur des surfaces extraterrestres.
  - **Exemples concrets:**
    - **Fusée Grasshopper de SpaceX:** La fusée Grasshopper de SpaceX a utilisé une conception à pendule inversé pour effectuer des décollages et des atterrissages verticaux, démontrant le potentiel du contrôle MIP dans les applications aérospatiales.



**Figure I.8 : Exemples d'application du système robot a pendule inverse.**

## **I.6. Les défis du contrôle des robots :**

Le domaine de la robotique a connu des progrès spectaculaires ces dernières années, permettant aux robots d'accomplir des tâches de plus en plus complexes et sophistiquées. Cependant, le contrôle précis et fiable des robots reste un défi majeur, limitant souvent leurs capacités et leur champ d'application.

- **Complexité des Systèmes Robotiques :** Les robots modernes sont des systèmes complexes composés d'une multitude de composants électroniques, mécaniques et logiciels. La coordination et le contrôle de tous ces éléments en temps réel est une tâche ardue.
- **Variabilité de l'Environnement :** Les robots doivent pouvoir fonctionner dans des environnements variés et souvent imprévisibles, ce qui nécessite des systèmes de contrôle adaptables et robustes.
- **Interactions Homme-Robot :** La collaboration étroite entre humains et robots devient de plus en plus fréquente. Le développement d'interfaces intuitives et sécurisées pour une interaction fluide est crucial.

- **Fiabilité et Sécurité** : Les robots sont utilisés dans des applications critiques où la défaillance peut avoir des conséquences graves. La fiabilité et la sécurité des systèmes de contrôle sont donc primordiales.

### **I.6.1.Approches pour Relever les Défis :**

- **Développement de Contrôleurs Avancés** : L'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique offrent des solutions prometteuses pour le développement de contrôleurs plus intelligents et adaptables [7].
- **Capteurs et Perception** : L'amélioration des capteurs et des systèmes de perception permet aux robots de mieux comprendre leur environnement et de réagir en conséquence.
- **Robotique Collaborative** : La cobotique, où robots et humains travaillent en étroite collaboration, nécessite des systèmes de contrôle capables d'anticiper et de s'adapter aux actions des humains.
- **Normes et Standards** : La mise en place de normes et de standards pour la sécurité et la fiabilité des robots est essentielle pour une adoption large et sûre de la technologie.

### **I.7.Conclusion :**

Le domaine de la robotique et Les robots MIP sont en constante évolution et regorge de potentiel pour transformer de nombreux aspects de notre vie. En comprenant l'état de l'art actuel avec approfondissement des recherches sur leur contrôle et leurs capacités et en abordant les défis de manière proactive, nous pouvons façonner un avenir où les robots travaillent aux côtés des humains pour améliorer la sécurité, la productivité, la qualité de vie et relever les défis mondiaux.

CHAPITRE II :

MODELISATION D'UN  
ROBOT A PENDULE  
INVERSE MOBILE



## II.1.Introduction :

La modélisation d'un système mécanique est une étape cruciale dans sa conception, sa simulation et son contrôle. Elle permet de représenter le comportement du système sous forme d'équations mathématiques, ce qui facilite l'analyse et la prédiction de ses mouvements. Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la modélisation du robot pendule inversé, un système dynamique non linéaire utilisé fréquemment pour illustrer les concepts de commande et de stabilisation.

Le système pendule inversé sur chariot (PIC) se présente comme un outil pédagogique captivant pour l'exploration des concepts fondamentaux de la modélisation, de l'analyse et de la commande des systèmes dynamiques. Malgré son apparence simpliste, il recèle une richesse de défis mathématiques et d'applications concrètes dans des domaines tels que :

- **Robotique** : Contrôle de robots humanoïdes bipèdes ou à roues.
- **Aéronautique** : Stabilisation d'avions et de missiles.
- **Véhicules autonomes** : Contrôle de l'équilibre et de la direction.
- **Biomécanique** : Analyse et modélisation du mouvement humain.

## II.2.Principe de fonctionnement :

Le robot pendule inversé exploite une boucle de rétroaction pour stabiliser le pendule autour de sa position d'équilibre verticale, Imaginez un funambule marchant sur un fil. Pour rester en équilibre, le funambule doit constamment ajuster sa position en fonction de son inclinaison. Si le funambule penche vers la gauche, il doit déplacer son pied droit vers la droite pour compenser. Et inversement. Le robot pendule inversé fonctionne de manière similaire. Le pendule joue le rôle du funambule et le chariot représente le fil. En utilisant un système de contrôle approprié, le robot compense l'inclinaison du pendule avec un mouvement du chariot pour le déplacer dans la direction appropriée, contrebalançant ainsi l'inclinaison et maintenant le pendule en position verticale [8].

### II.3.Défis de contrôle :

Le système pendule inversé présente plusieurs défis de contrôle :

- **Instabilité** : Le pendule est naturellement instable et tombera s'il n'est pas contrôlé activement.
- **Non-linéarité** : Les équations du système sont non linéaires, ce qui complexifie la conception d'un contrôleur efficace.
- **Couplage** : Le mouvement du chariot et du pendule est interdépendant, l'action de commande sur l'un affecte l'autre.

### II.4.Description du système :

Le système se compose de deux éléments principaux :

- **Un chariot** : Se déplaçant horizontalement sur un rail. Sa position est définie par la variable  $x$ .
- **Un pendule** : Articulé au chariot et pouvant osciller dans un plan vertical. Son orientation est définie par l'angle  $\theta$  par rapport à la verticale.

### II.5.Coordonnées du système :

Le système pendule-chariot possède deux degrés de liberté, exprimés par deux coordonnées généralisées :  $x$  pour la translation horizontale du chariot et  $\theta$  pour la rotation du pendule.

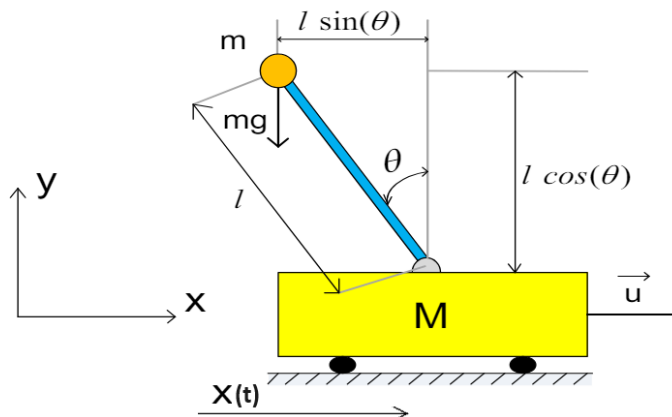


Figure II.1 : Schéma de robot pendule inverse sur un chariot système.

**Paramètres :****m** : masse du pendule**x(t)** : position du chariot**M** : masse du chariot**θ(t)** : angle du pendule**l** : longueur du pendule**g** : la pesanteur**u** : force exercée sur le chariot

Afin de reproduire le comportement réel du robot pendule inversé, les simulations utilisent des paramètres numériques précis. Ces paramètres sont répertoriés dans le tableau ci-dessous :

Paramètre	Symbol	Valeur	Unité
Mass du chariot	<b>M</b>	<b>2</b>	<b>KG</b>
Mass du pendule	<b>m</b>	<b>0.2</b>	<b>KG</b>
Longueur du pendule	<b>l</b>	<b>0.5</b>	<b>m</b>
La pesanteur	<b>g</b>	<b>9.81</b>	<b>M/s<sup>2</sup></b>

**TableauII.1 : Paramètre physique du robot pendule inverse sur un chariot système.**

## II.6.Modélisation du robot pendule inverse sur un chariot :

En utilisant la méthode de Lagrange qui s'illustre par l'équation suivante :

$$L = T - V$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\varepsilon}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial \varepsilon_j} + \left( \frac{\partial D}{\partial \varepsilon_j} \right) = F_j \quad (\text{II.1})$$

De façon à :

$T$  : énergie cinétique.

$V$  : énergie potentielle.

$\varepsilon_j$ : degré de liberté (dans notre cas  $x(t)$  et  $\theta(t)$ ).

$D$  : énergie dissipée par frottement.

$F_j$  : force généralisée dans le sens de degré de liberté.

### II.6.1.Énergie cinétique du système en mouvement :

L'énergie cinétique du chariot :

$$T_M = \frac{1}{2} M \dot{x}^2 \quad (\text{II.2})$$

L'énergie cinétique du pendule :

$$T_m = \frac{1}{2} m v_c \times v_c + \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (\text{II.3})$$

La position de centre de gravité de pendule à partir de ces coordonnées :

$$r_c = (x + l \sin(\theta)) \hat{i} + l \cos(\theta) \hat{j} \quad (\text{II.4})$$

Par conséquent, la vitesse du centre de gravité est exprimée par la formule suivante :

$$V_c = \frac{dr_c}{dt} = (\dot{x} + l \cos(\theta) \dot{\theta}) \hat{i} - (l \sin(\theta) \dot{\theta}) \hat{j} \quad (\text{II.5})$$

Le résultat du placement de (II.5) dans (II.3) donne :

$$T_m = \frac{1}{2} m (\dot{x}^2 + 2 \dot{x} l \cos(\theta) \dot{\theta} + l^2 \cos^2(\theta) \dot{\theta}^2 + l^2 \sin^2(\theta) \dot{\theta}^2) + \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 \quad (\text{II.6})$$

L'énergie cinétique du pendule Prend la forme de :

$$T_m = \frac{1}{2} m (\dot{x}^2 + 2 \dot{x} l \cos(\theta) \dot{\theta} + l^2 \dot{\theta}^2) + \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 \quad (\text{II.7})$$

L'énergie cinétique du système combiné chariot-pendule peut être représentée par l'équation suivante :

$$T = T_M + T_m = \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m (\dot{x}^2 + 2 \dot{x} l \cos(\theta) \dot{\theta} + l^2 \dot{\theta}^2) + \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 \quad (\text{II.8})$$

### II.6.2.L'énergie potentielle du système :

L'expression de l'énergie potentielle du centre de gravité de la barre est :

$$V = mgl \cos \theta \quad (\text{II.9})$$

### II.6.3.Equation de Lagrange :

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\varepsilon}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial \varepsilon_j} + \left( \frac{\partial D}{\partial \varepsilon_j} \right) = F_j \quad (\text{II.10})$$

En se servant de (II.8) et (II.9) :

$$L = T - V$$

$$L = \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m (\dot{x}^2 + 2 \dot{x} l \cos(\theta) \dot{\theta} + l^2 \dot{\theta}^2) + \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 - mgl \cos(\theta) \quad (\text{II.11})$$

### II.6.4.Equation de Lagrange pour le degré de liberté : $\varepsilon(t) = x(t)$

$$D = \frac{1}{2} b \dot{x}^2 \quad (\text{II.12})$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L}{\partial x} = F - b \dot{x} \quad (\text{II.13})$$

Par cela la première équation de Lagrange :

$$(M + m) \ddot{x} + ml \cos(\theta) \ddot{\theta} - ml \sin(\theta) \dot{\theta}^2 = F - b \dot{x} \quad (\text{II.14})$$

### II.6.5.Equation de Lagrange pour le degré de liberté : $\varepsilon(t) = \theta(t)$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = -d \dot{\theta} \quad (\text{II.15})$$

La deuxième équation de Lagrange :

$$(ml^2 + I) \ddot{\theta} + ml \ddot{x} \cos(\theta) + ml \dot{x} \sin(\theta) \dot{\theta} - ml \dot{x} \sin(\theta) \dot{\theta} - mgl \sin(\theta) = -d \dot{\theta} \quad (\text{II.16})$$

Le comportement du système chariot-pendule est gouverné par le système d'équations suivant, qui représente son modèle de connaissance.

$$\begin{cases} (M + m) \ddot{x} + b \dot{x} + ml \cos(\theta) \ddot{\theta} - ml \sin(\theta) \dot{\theta}^2 = F \\ ml \ddot{x} \cos(\theta) + (ml^2 + I) \ddot{\theta} + d \dot{\theta} - mgl \sin(\theta) = 0 \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

### II.6.5.Linéarisation du model autour du point d'équilibre :

Le système présente deux points d'équilibre : un instable à  $\theta = 0$  et un stable à  $\theta = \pi$ . Nous linéarisons les équations différentielles autour du point d'équilibre instable, en considérant de petites variations de  $\theta$  autour de  $\theta_0$ .

$$\begin{cases} \theta = \theta_0 + \varepsilon \\ \dot{\theta} = \dot{\varepsilon} \end{cases}$$

Le développement en série de Taylor du premier ordre d'une fonction de  $\theta$  est donne par :

$$f(\theta) \approx f(\theta_0) + \varepsilon \frac{df}{d\theta}(\theta_0)$$

Les termes du haut ordre sont négliges :  $\varepsilon^2 \approx 0$

### II.6.6.Position d'équilibre instable :

La barre est en équilibre instable lorsqu'elle se trouve en position verticale.

$$\text{Pour } \theta_0 = 0 \text{ nous avons : } \begin{cases} \cos(\theta) \approx \cos(0) + \theta[-\sin(0)] = 1 \\ \sin(\theta) \approx \sin(0) + \theta[\cos(0)] = \theta \\ \dot{\theta}^2 = 0 \end{cases}$$

Le système d'équations linéarisé résultant de la substitution de ces linéarisations dans le système d'équations (II.17) et de la négligence des termes d'ordre supérieur est le suivant :

$$\begin{cases} (M + m)\ddot{x} + b\dot{x} + ml\ddot{\theta} = F \\ ml\ddot{x} + (ml^2 + I)\ddot{\theta} + d\dot{\theta} + mgl\theta = 0 \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

L'application de la transformée de Laplace au système d'équations aboutit à :

$$\begin{cases} (M + m)s^2X(s) + bsX(s) + mls^2\theta(s) = F(s) \\ mls^2X(s) + (ml^2 + I)s^2\theta(s) + d\theta(s) + mgl\theta(s) = 0 \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

Dans le contexte de l'équation (II.19), la substitution pour éliminer  $X(s)$  ou  $\theta(s)$  conduit aux deux fonctions de transfert suivantes :

$$\begin{aligned} G_1(S) &= \frac{X(S)}{F(S)} \\ &= \frac{(ml^2 + I)s^2 + d(s) + mgl}{((M + m)(ml^2 + I) - m^2l^2)s^4 + [(M + m)d + (ml^2 + I)b]s^3 + [-(M + m)mgl + db]s^2 - mglbs} \\ G_2(S) &= \frac{\theta(S)}{F(S)} \\ &= \frac{-mls}{((M + m)(ml^2 + I) - m^2l^2)s^3 + [(M + m)d + (ml^2 + I)b]s^2 + [-(M + m)mgl + db]s - mgl} \end{aligned}$$

## II.7.Représentation d'état :

Les systèmes linéaires sont caractérisés par une représentation d'état sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + BF \\ y = Cx \end{cases}$$

On définit le vecteur d'état comme suit :  $x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T = [x \ \dot{x} \ \theta \ \dot{\theta}]^T$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & (g * mp)/mc & -d1/mc & -d2/(L * mc) \\ 0 & (g * (mc + mp))/(L * mc) & -d1/(L * mc) & -(d2 * mc + d2 * mp)/(L^2 * mc * mp) \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/mc \\ 1/(L * mc) \end{pmatrix} ; \quad C = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} ; \quad D = 0$$

$\theta$ : l'angle

$\dot{\theta}$  : la vitesse de rotation de la barre.

$x$  : La position du chariot

$\dot{x}$  : la vitesse linéaire du chariot

De manière à :  $\dot{x}_1 = x_2$  et  $\dot{x}_3 = x_4$

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = \ddot{x} = \frac{-b(ml^2 + I) - m^2 l^2 g \sin(x_3) \cos(x_3) + ml \sin(x_3)(ml^2 + I)x_4^2 + F(ml^2 + I)}{(ml^2 + I)(M + m) - m^2 l^2 \cos(x_3)}$$

$$\dot{x}_3 = x_4$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_4 &= \ddot{\theta} \\ &= \frac{-ml \cos(x_3) F + mlb \cos(x_3)x_2 - m^2 l^2 \sin(x_2) \cos(x_2) x_4^2 - d(M + m)x_4 mgl \sin(x_3)(M + m)}{(ml^2 + I)(M + m) - m^2 l^2 \cos^2(x_3)} \end{aligned}$$

Les paramètres du système sélectionnés sont résumés dans le tableau II.1. Ces valeurs sont ensuite substituées dans les fonctions de transfert du chariot et du pendule.

$$\frac{X(S)}{F(S)} = \frac{7.08}{s^2}$$

$$\frac{\theta(S)}{F(S)} = \frac{10.8}{s^2 - 15.4}$$

## II.8. Etude de stabilité :

Après le calcul des pôles de notre système nous avons trouvé le résultat ci-dessous

$$s_1 = 0 ; s_2 = 3.2701 ; s_3 = -3.2999 ; s_4 = -0.0227$$

L'analyse de la stabilité a révélé des pôles à parties réelles positives ( $s_1, s_2$ ), on conclut que le système est instable donc nécessitant la mise en œuvre de stratégies de contrôle par contrôle linéaire pour stabiliser le système et assurer sa convergence vers la consigne souhaitée.

En exploitant les équations du système que nous avons obtenues, nous cherchons à concevoir des contrôleurs performants. Et nous allons commencer par le contrôle linéaire.

## II.9. Contrôle linéaire :

Le contrôle linéaire incontournable dans l'automatisation et le contrôle de processus, ont révolutionné la conception des systèmes de commande grâce à leur simplicité, leur efficacité et leur large applicabilité, permettant de réguler efficacement le comportement de divers systèmes dynamiques. Ils combinent trois actions distinctes : proportionnelle, intégrale et dérivée, pour générer un signal de commande qui amène le système vers l'état désiré.

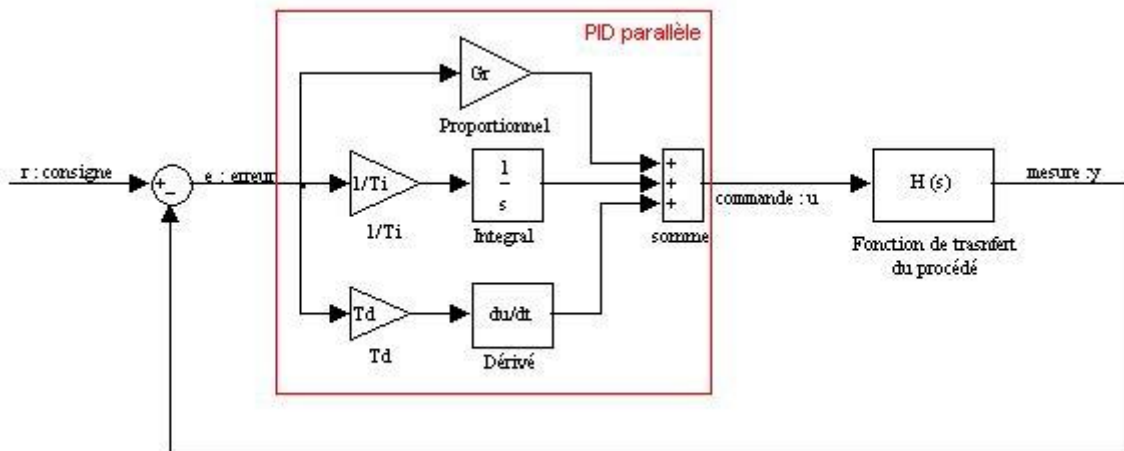


Figure II.2 : Diagramme d'un système par contrôle linéaire.



### II.9.1.Explication du diagramme :

- **Consigne** : La consigne est la valeur souhaitée de la variable contrôlée (température, vitesse, position, etc.).
- **Fonction de transfert** : est l'équation du processus ou l'appareil que l'on souhaite contrôler.
- **Commande** : Généré par le contrôleur PID en fonction de l'erreur, le signal de commande instruit l'actionneur de modifier la variable manipulée, dirigeant le système vers l'état désiré.
- **Comparateur** : Le comparateur calcule l'erreur entre la consigne et la valeur mesurée.
- **Contrôleur PID** : Le contrôleur PID calcule l'action de commande en fonction de l'erreur.
- **Variable contrôlée** : La variable contrôlée est la valeur mesurée de la variable que l'on souhaite contrôler

#### Remarques :

- Le diagramme ci-dessus est une représentation simplifiée d'un système de contrôle linéaire.
- En réalité, le système peut être plus complexe et inclure des éléments supplémentaires tels que des filtres, des compensateurs et des perturbateurs.
- Le choix des paramètres du contrôleur PID ( $K_p$ ,  $K_i$  et  $K_d$ ) est crucial pour obtenir une performance optimale du système.

Le contrôleur PID est composé de trois composantes : proportionnelle (P), intégrale (I) et dérivée (D). Chaque composante joue un rôle spécifique dans la correction de l'erreur et l'amélioration de la performance du système.

### II.9.2.Rôle de chaque composant du PID :

#### II.9.2.1.Action proportionnelle (P) :

L'action proportionnelle est basée sur l'erreur actuelle entre la valeur mesurée et la consigne. L'action de commande est proportionnelle à l'erreur, ce qui signifie que plus l'erreur est grande, plus l'action de commande est importante. L'action proportionnelle permet une réponse rapide aux changements de consigne et aux perturbations.

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p$$

### II.9.2.2.Action intégrale (I) :

L'action intégrale prend en compte l'intégrale de l'erreur au cours du temps. Cela permet d'éliminer l'erreur statique, c'est-à-dire l'erreur qui persiste même après que l'action proportionnelle a été appliquée. L'action intégrale est lente à réagir mais permet d'obtenir une meilleure précision à long terme.

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \cdot \frac{1 + s \cdot T_i}{s \cdot T_i}$$

### II.9.2.3.Action dérivée (D) :

L'action dérivée est basée sur la dérivée de l'erreur par rapport au temps. Cela permet d'anticiper les changements d'erreur et d'améliorer la stabilité du système. L'action dérivée est sensible au bruit et peut être difficile à régler.

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \cdot (1 + s \cdot T_d)$$

Les performances du contrôleur PID dépendent du réglage des gains P, I et D. Le réglage des gains est un processus itératif qui consiste à ajuster les gains jusqu'à obtenir la performance souhaitée. Il existe différentes méthodes pour régler les gains du contrôleur PID.

### II.9.3.Fonctionnement du calculateur PID :

Le contrôleur PID utilise l'erreur  $e(t)$ , qui représente la déviation entre l'état désiré (consigne  $r(t)$ ) et l'état réel (mesure  $y(t)$ ), pour calculer le signal de commande  $u(t)$ .

$$C(p) = K_p \left( 1 + \frac{1}{\tau_i \cdot s} + \tau_d \cdot s \right)$$

Où:

- $K_p$  est le gain proportionnel

- $K_i$  est le gain intégral
- $K_d$  est le gain dérivé

### II.9.4. Techniques de réglage et d'optimisation des paramètres du PID :

Le réglage des paramètres du contrôleur PID est une étape cruciale pour garantir la performance et la stabilité du système contrôlé. Il existe plusieurs techniques pour régler les paramètres du contrôleur PID :

#### II.9.4.1. Méthodes manuelles :

- **Méthode Ziegler-Nichols:** Cette méthode est basée sur l'analyse de la réponse du système à un échelon d'entrée. Elle est simple à mettre en œuvre mais peut ne pas être optimale pour tous les systèmes.
- **Méthode par essais et erreurs:** Cette méthode consiste à ajuster les paramètres du contrôleur PID jusqu'à obtenir une performance satisfaisante. Elle peut être longue et fastidieuse.

#### II.9.4.2. Méthodes automatiques :

- **Méthode d'optimisation:** Cette méthode utilise des algorithmes d'optimisation pour trouver les paramètres du contrôleur PID qui minimisent une fonction de coût. Cette méthode est plus efficace que les méthodes manuelles mais peut être plus complexe à mettre en œuvre.
- **Méthodes basées sur l'intelligence artificielle:** Des techniques d'apprentissage automatique et d'intelligence artificielle peuvent être utilisées pour identifier les paramètres optimaux du contrôleur PID. Ces méthodes sont encore en développement mais peuvent offrir une meilleure performance que les méthodes traditionnelles.

#### II.9.4.3. Outils logiciels :

Il existe des outils logiciels qui permettent de simuler le comportement du système contrôlé et de régler les paramètres du contrôleur PID de manière automatique.

## II.10.Critères de performance :

Le choix des techniques de réglage dépend des critères de performance souhaités, tels que :

- **Temps de réponse:** Le temps nécessaire pour que le système atteigne la consigne.
- **Dépassement:** L'amplitude maximale de l'erreur de suivi de consigne.
- **Stabilité:** La capacité du système à rester stable face aux perturbations.

Pour faire clair le choix de la technique de réglage dépend de la complexité du système, des exigences de performance et des ressources disponibles.

## II.11.Avantages et inconvénients du contrôle linéaire :

### Simplicité :

- Le principe du contrôle linéaire est simple et intuitif, ce qui le rend facile à comprendre et à mettre en œuvre.
- Les régulateurs PID sont disponibles sous forme de modules préconfigurés, ce qui facilite leur intégration dans des systèmes existants.
- Le réglage des paramètres du contrôleur PID peut être effectué de manière simple et intuitive, par exemple en utilisant la méthode Ziegler-Nichols.

### Robustesse :

- Le contrôle PID est robuste aux perturbations et aux variations du système.
- Le contrôleur PID est capable de maintenir une performance satisfaisante même dans des conditions d'exploitation difficiles.
- Le contrôle PID est largement utilisé dans l'industrie et a fait ses preuves dans une large gamme d'applications.

### Inconvénients du contrôle linéaire :

- **Performance limitée:** Le contrôle PID n'est pas toujours optimal et peut ne pas atteindre la performance souhaitée dans certains cas.

- **Sensibilité au bruit:** Le contrôle PID peut être sensible au bruit de mesure, ce qui peut affecter la performance du système.
- **Difficulté de réglage:** Le réglage optimal des paramètres du contrôleur PID peut être difficile et fastidieux, surtout pour les systèmes complexes.
- **Manque de flexibilité:** Le contrôle PID n'est pas facilement adaptable aux changements de la dynamique du système.

## II.12. La structure de contrôle proposée :

Dans notre cas de système robot pendule inversé nous avons utilisé une approche à deux contrôleurs, où des contrôleurs distincts gèrent l'angle du pendule et la position du chariot. Cependant, le système ne permet qu'une seule action de commande globale. Pour combiner les actions de commande des deux sous-systèmes en une seule action de commande  $F$ , une stratégie de compensation est employée. Lorsqu'une force est appliquée pour déplacer le chariot vers la gauche, le pendule a tendance à se balancer vers la droite en raison de l'interaction dynamique entre les deux éléments. Pour contrer ce mouvement indésirable du pendule, la force appliquée doit être de signe opposé pour stabiliser le système dans son ensemble. Le contrôleur du pendule utilise un algorithme PID, tandis que le contrôleur du chariot utilise un algorithme PD. Les sorties de ces contrôleurs, respectivement notées  $u(\theta)$  et  $u(x)$ , sont combinées pour générer l'action de commande globale  $F$ .

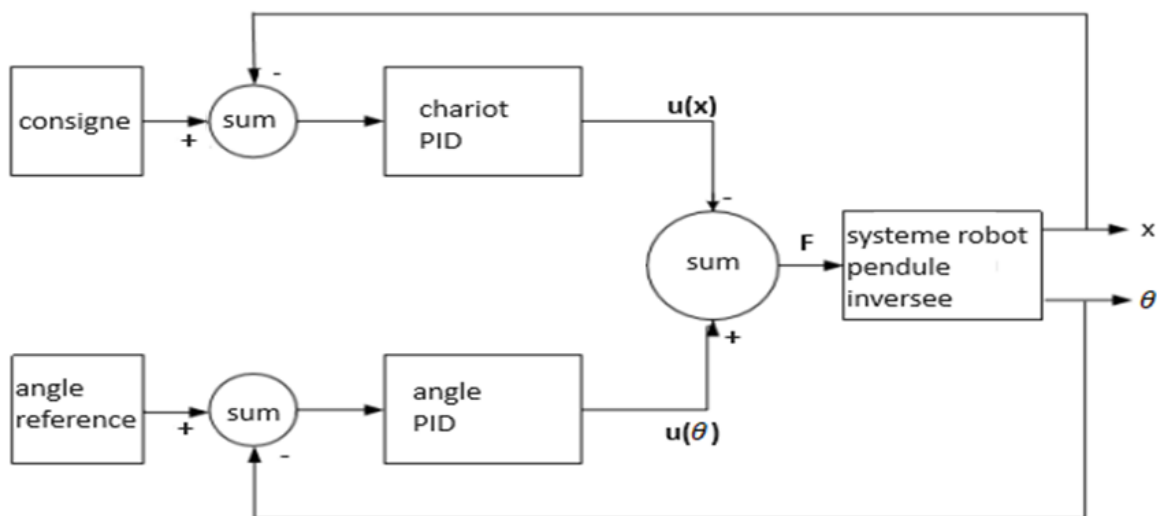


Figure II.3 : Diagramme d'une structure de contrôler par PID.

L'instabilité en boucle ouverte rend la méthode de Ziegler-Nichols inapplicable. En conséquence, le contrôleur PID pour le pendule est conçu en sélectionnant un pôle désiré  $s_d = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{(1-\zeta^2)}$ , en tenant compte des caractéristiques dynamiques souhaitées (taux d'amortissement, fréquence naturelle, erreur en régime permanent).

$$k_v = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{(k_p s + k_i + k_d s^2)}{s} G(s)$$

$$k_p = \frac{-\sin(\beta + \phi_d)}{A_d \sin \beta} - \frac{2k_i \cos \beta}{D}$$

$$k_d = \frac{\sin(\phi_d)}{D A_d \sin \beta} + \frac{k_i}{D^2}$$

Où  $D = |s_d|$  et  $\beta = \angle s_d$ . De même que  $A_d = |G(s_d)|$  et  $\phi_d = \angle G(s_d)$

Le même procédé est entamé pour le calcul des gains du PID du chariot.

### II.13.Simulation :

Les valeurs de gain PID pour le sous-système pendulaire sont soigneusement choisies comme  $K_p = 21$ ,  $K_i = 37$  et  $K_d = 5$ . Pour le sous-système chariot, elles sont  $K_p = 1,25$ ,  $K_d = 0,5$  et  $K_i = 0$ . Ces valeurs de gain sont implémentées dans le modèle Simulink pour le contrôle du robot, comme illustré à la figure ci-dessous. La consigne de position du chariot est une série d'impulsions qui varie de 5 à -5 avec une période de 40 secondes et la référence d'angle du pendule est fixée à 0 rad.

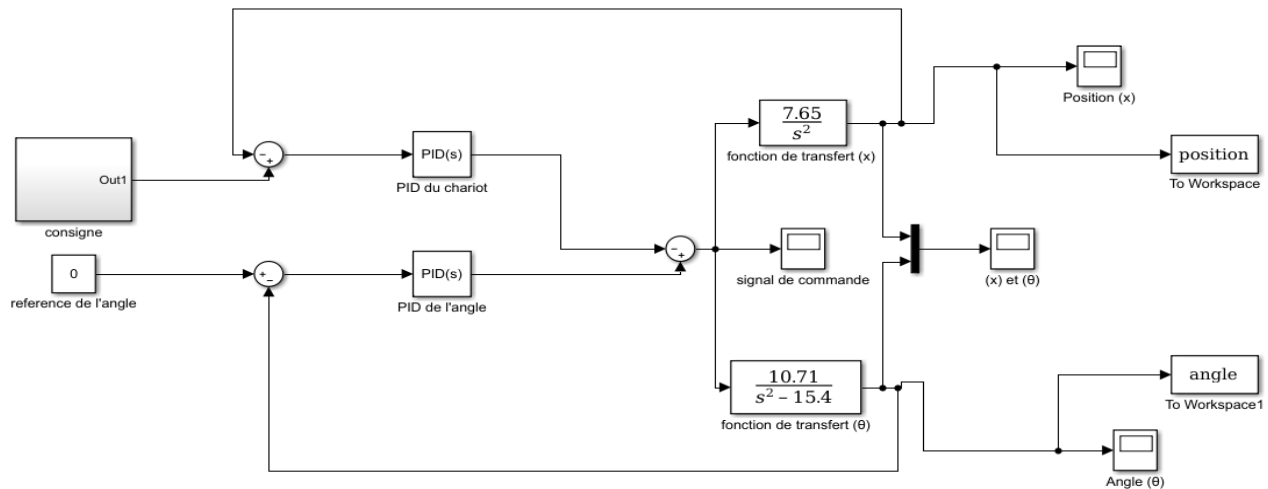


Figure II.4 : Le model Simulink pour le control linéaire.

Et les résultats ont été les suivants :

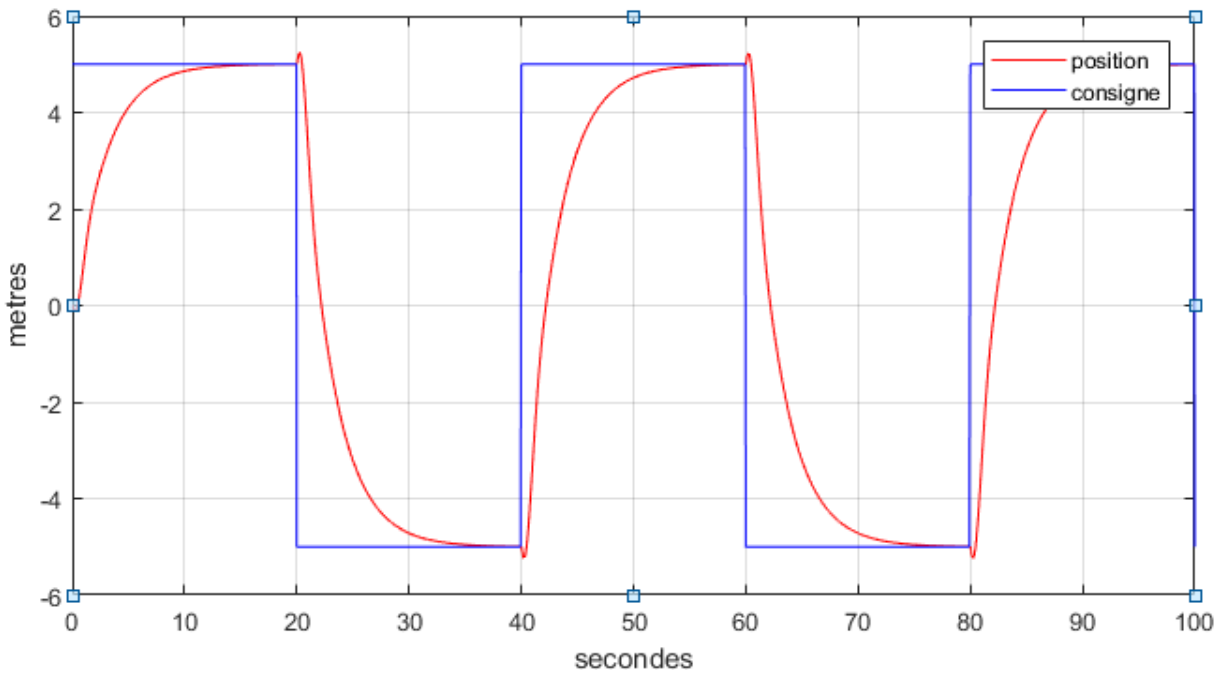


Figure II.5 : Simulation du positionnement du robot et de la consigne.

En ce qui concerne l'angulation :

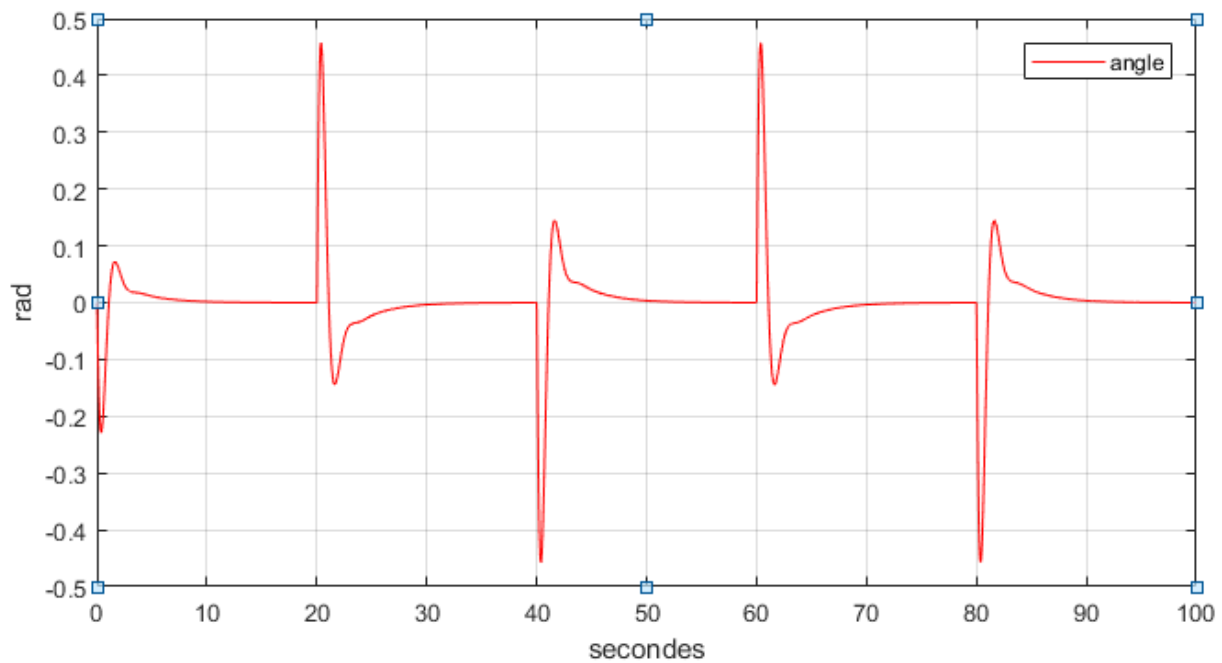


Figure II.6 : Simulation de l'angulation du pendule par rapport à la consigne.

Le contrôle linéaire régule efficacement le système, lui conférant une stabilité et un temps de réponse satisfaisants, tout en présentant un dépassement minime.

## **II.14.Conclusion :**

La compréhension du comportement dynamique du robot a pendule inversé mobile a débuté par une modélisation mathématique détaillée. Cette modélisation a permis de capturer les équations différentielles non linéaires qui régissent le mouvement du système. Après avoir trouvé que le système était instable et en s'appuyant sur les connaissances acquises grâce à la modélisation mathématique, un contrôle linéaire a été mis en place pour stabiliser efficacement le robot pendule inversé. Les performances du contrôleur PID ont été évaluées à l'aide de simulations Simulink. Les résultats ont démontré la capacité du contrôleur à stabiliser le robot pendule inversé mobile et à maintenir sa position d'équilibre souhaitée.



CHAPITRE III :

CONTROLE PAR LOGIQUE  
FLOUE (FLC) D'UN ROBOT  
A PENDULE INVERSE  
MOBILE

### III.1.Introduction :

La logique floue, née des réflexions pionnières du professeur Lotfi Zadeh en 1965, a marqué un tournant décisif dans le domaine de la robotique. En s'affranchissant des contraintes rigides de la logique binaire classique, elle a ouvert la voie à une représentation plus nuancée et réaliste du monde, permettant de traiter des informations incertaines et imprécises, omniprésentes dans notre quotidien. [13]

Dans le chapitre précédent, nous avons plongé dans les méandres de la modélisation et du contrôle du robot pendule inversé à l'aide du contrôle linéaire. Cette approche classique a fait ses preuves dans de nombreuses applications, offrant un cadre robuste et simple pour stabiliser le pendule. Cependant, lorsque nous nous aventurons dans des environnements plus complexes et incertains, les limites du contrôle PID commencent à se manifester.

La dépendance du contrôle linéaire vis-à-vis de modèles mathématiques précis et de gains prédéterminés peut le rendre sensible aux perturbations et aux variations des paramètres du système. De plus, son incapacité à gérer des informations imprécises ou qualitatives entrave son adaptabilité aux scénarios du monde réel.

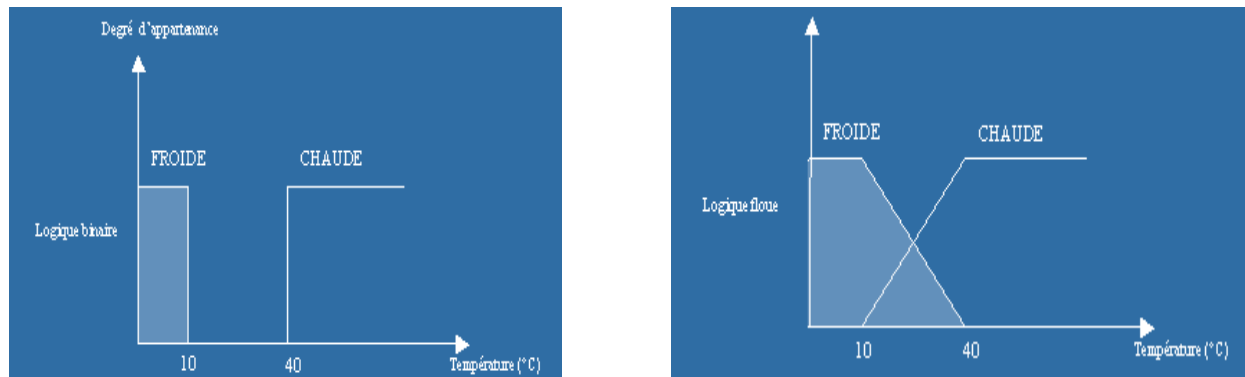
C'est là que le contrôle par logique floue entre en scène, offrant un changement de paradigme dans notre approche du contrôle du robot pendule inversé. La logique floue, inspirée du caractère vague et linguistique du raisonnement humain, embrasse la notion d'incertitude et d'imprécision, ce qui en fait un choix naturel pour les systèmes complexes et dynamiques comme le nôtre.

### III.2.Le fonctionnement de la logique floue : [11]

Imaginez un monde où les actions de contrôle ne se limitent pas à des valeurs numériques rigides mais peuvent s'exprimer en termes d'étiquettes linguistiques comme "petit", "moyen" ou "grand". C'est l'essence de la logique floue, où les variables sont représentées par des ensembles flous, caractérisés par des fonctions d'appartenance qui définissent le degré auquel un élément appartient à l'ensemble. Prenant un exemple de température :

L'être humain perçoit la température de manière graduelle, nuancée. Une température de  $10^{\circ}\text{C}$  est généralement considérée comme froide, tandis que  $40^{\circ}\text{C}$  est qualifiée de chaude. Cependant, la transition entre ces deux extrêmes ne se fait pas de manière brutale. Des valeurs intermédiaires, comme  $20^{\circ}\text{C}$  ou  $30^{\circ}\text{C}$ , appartiennent à la fois aux catégories "froide" et "chaude", mais avec des degrés d'appartenance différents.

La logique binaire, avec ses valeurs de vérité "vrai" et "faux", ne permet pas de représenter cette perception nuancée de la température. Dans ce système, une température de  $39,9^{\circ}\text{C}$  serait considérée comme "froide", tandis que  $40^{\circ}\text{C}$  serait "chaude". Cette transition abrupte ne correspond pas à notre expérience intuitive de la température.



**Figure III.1 : Exemple de température entre deux univers de discours différents.**

Dans le contexte du robot pendule inversé, la logique floue nous permet de capturer les nuances du comportement du système en utilisant des variables linguistiques telles que "l'angle du pendule est grand" ou "la position du chariot est trop loin à droite". Ces variables, contrairement à leurs homologues précises dans le contrôle linéaire, peuvent s'accommoder de l'incertitude et de mesures imprécises, reflétant le flou inhérent au monde réel. [12]

### III.2.1.Représentation des variables :

En logique floue, les variables ne sont pas nécessairement binaires (0 ou 1) mais peuvent prendre des valeurs continues sur un intervalle défini. Elles sont généralement représentées par des fonctions d'appartenance qui définissent le degré d'appartenance d'une valeur à un ensemble flou.

### III.2.2.Ensembles flous :

Un ensemble flou est un ensemble dont les éléments ont un degré d'appartenance partiel. La frontière entre les ensembles flous n'est pas toujours nette, ce qui permet de représenter des concepts plus proches de la réalité, comme "chaud", "froid", "grand" ou "petit".

### III.2.3.Règles de contrôle :

Les règles de contrôle en logique floue sont définies sous forme d'instructions **IF-THEN** où les conditions et les conclusions sont exprimées en termes d'ensembles flous.

### III.2.4.Fonctions d'appartenance :

Les fonctions d'appartenance sont des fonctions mathématiques qui définissent le degré d'appartenance d'un élément à un ensemble flou. Elles sont généralement représentées par des courbes graphiques. Il existe différentes formes de fonctions d'appartenance, telles que les fonctions triangulaires, trapézoïdales, gaussiennes et sigmoïdales. [14][15]

Fonction	Forme algébrique	Forme graphique
Fonction triangulaire	$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x < b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x < c \\ 0 & x > c \end{cases}$	
Fonction trapézoïdale	$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x < b \\ \frac{d-x}{d-c} & b \leq x < c \\ 0 & x > c \end{cases}$	
Fonction gaussien	$\mu_A(x) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2\right)$	
Fonction singleton	$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & x = a \\ 0 & x \neq a \end{cases}$	

TableauIII.1 : Exemple de fonctions d'appartenance.

### III.2.5.Opérations floues :

Les opérations floues permettent de combiner les degrés de vérité de plusieurs propositions floues pour obtenir un nouveau degré de vérité. Les principales opérations floues sont: [16]

- **ET (conjonction):** Calcule le minimum des degrés de vérité des propositions.
- **OU (disjonction):** Calcule le maximum des degrés de vérité des propositions.
- **NON (négation):** Calcule l'opposé du degré de vérité de la proposition.

### III.3. Structure d'un contrôleur logique floue :

Le contrôleur à logique floue pour le robot pendule inversé peut être représenté par le schéma suivant :

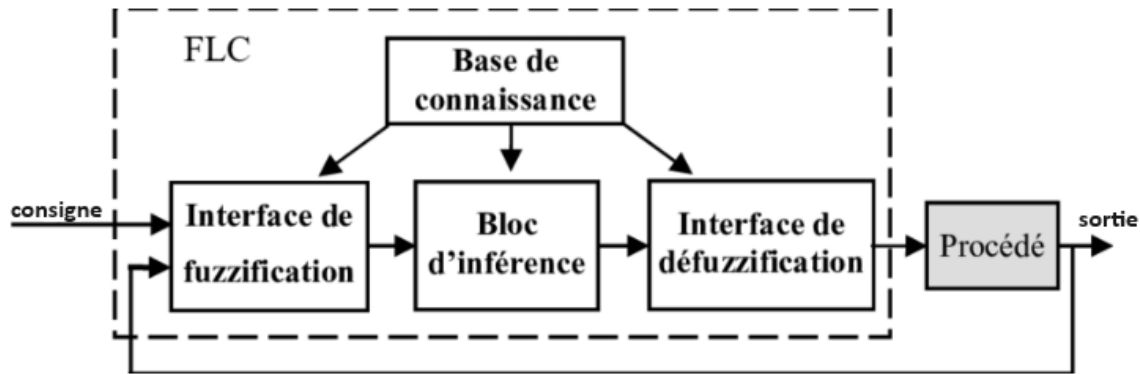


Figure III.2 : Block diagramme d'un contrôleur par logique floue

Dans ce schéma, on peut distinguer les éléments suivants :

- **Entrées:** Les entrées du contrôleur sont les variables d'état du système, telles que l'angle du pendule, la vitesse angulaire du pendule et la position du chariot.
- **Fuzzification:** Les entrées nettes sont converties en valeurs floues à l'aide de fonctions d'appartenance.
- **Base de connaissance:** La base de règles contient un ensemble de règles SI-ALORS qui définissent les actions de contrôle en fonction des entrées floues.
- **Block d'inférence:** Le moteur d'inférence évalue les règles en fonction des entrées floues et détermine le degré d'activation de chaque règle.
- **Défuzzification:** La sortie floue est convertie en une valeur de contrôle nette à l'aide d'une fonction de défuzzification.
- **Sortie:** La valeur de contrôle nette est envoyée à l'actionneur, qui manipule la position du chariot pour stabiliser le pendule.

### III.4. Fuzzification des entrées du système : [18]

La fuzzification est la première étape du traitement dans un contrôleur par logique floue. Elle consiste à transformer les valeurs numériques des entrées du système en variables floues.

### III.4.1.Processus de fuzzification :

Le processus de fuzzification peut être résumé comme suit :

- **Définir les variables floues:** Identifier les variables d'entrée du système et les représenter par des variables floues.
- **Définir les ensembles flous:** Définir les ensembles flous pour chaque variable floue.
- **Déterminer les fonctions d'appartenance:** Choisir et paramétrer les fonctions d'appartenance pour chaque ensemble flou.
- **Calculer les degrés d'appartenance:** Calculer le degré d'appartenance de chaque valeur d'entrée à chaque ensemble flou.

### III.5.Inférence :

L'inférence est le processus d'application des règles floues aux valeurs d'entrée pour générer une conclusion floue. Il existe différentes méthodes d'inférence, dont la plus connue est la méthode dite "Mamdani". [19]

#### III.5.1.Méthode Mamdani :

1. **Calcul du degré d'activation de chaque règle:** Pour chaque règle, on calcule le degré d'activation ( $\mu$ ) en utilisant la fonction d'appartenance de la variable d'entrée à l'antécédent de la règle.[20]
2. **Agrégation des conclusions floues:** On combine les conclusions floues de toutes les règles activées en utilisant une fonction d'agrégation (maximum, moyenne, etc.).
3. **Défuzzification:** On convertit la conclusion floue en une valeur de sortie réelle à l'aide d'une fonction de défuzzification (centre de gravité, moyenne pondérée, etc.).

### **III.6.La défuzzification :**

La défuzzification est l'étape finale du contrôle par logique floue qui permet de convertir l'ensemble flou de sortie en une valeur numérique unique. Cette valeur est ensuite utilisée comme commande finale pour le système à contrôler. [21]

**Il existe plusieurs méthodes de défuzzification, dont les plus courantes sont :**

#### **III.6.1.Centre de gravité (COG) :**

Cette méthode calcule la moyenne pondérée des centres de gravité des surfaces floues de l'ensemble flou de sortie. La pondération est définie par le degré d'appartenance de chaque point à la surface floue.

#### **III.6.2.Centre des aires (COA) :**

Cette méthode calcule le centre de l'aire sous la courbe de l'ensemble flou de sortie.

#### **III.6.3.Centre des maximas (MOM) :**

Cette méthode prend la valeur du point de l'ensemble flou de sortie ayant le degré d'appartenance le plus élevé.

#### **III.6.4.Méthode de la moyenne des maximums (MOM) :**

Cette méthode calcule la moyenne des valeurs des points de l'ensemble flou de sortie ayant le degré d'appartenance le plus élevé.

### **III.7.Choix de la méthode de défuzzification :**

Le choix de la méthode de défuzzification dépend de plusieurs facteurs, tels que :

- Le type de système à contrôler
- Les exigences de performance
- La complexité du système de contrôle



## **III.8.Les avantages du contrôle par logique floue :**

### **III.8.1.Traitement des systèmes non linéaires :**

- La logique floue est capable de modéliser des systèmes non linéaires complexes de manière intuitive et efficace.
- Les règles floues peuvent capturer les relations non linéaires entre les variables d'entrée et de sortie du système.
- La logique floue est plus flexible que les méthodes de contrôle classiques qui s'appuient sur des modèles linéaires.

### **III.8.2.Robustesse aux incertitudes :**

- La logique floue est intrinsèquement robuste aux incertitudes et aux variations du système.
- Les règles floues peuvent être facilement adaptées pour tenir compte des changements de l'environnement ou des conditions de fonctionnement.
- La logique floue permet de gérer les imprécisions et les données incomplètes.

### **III.8.3.Facilité d'implémentation :**

- La logique floue est relativement facile à mettre en œuvre, même pour des systèmes complexes.
- Les règles floues peuvent être facilement comprises et interprétées par les experts du domaine.
- La logique floue peut être implémentée dans différents langages de programmation et sur différents types de plateformes.

### **III.8.4.Applications : [17]**

- Le contrôle par logique floue est utilisé dans une large gamme d'applications, notamment:
  - Contrôle de la température
  - Contrôle de la vitesse
  - Robotique
  - Véhicules autonomes
  - Systèmes de production

- Diagnostic médical

### III.9.Les inconvénients du contrôle par logique floue :

- **Complexité de la conception:** La conception d'un contrôleur flou efficace peut être complexe et nécessite une expertise en logique floue et en connaissance du système à contrôler.
- **Manque de précision:** La précision du contrôle par logique floue peut être limitée, en particulier pour les systèmes non linéaires complexes.
- **Difficulté d'optimisation:** L'optimisation des paramètres d'un contrôleur flou peut être difficile et fastidieuse.
- **Interprétation des résultats:** L'interprétation des résultats du contrôle par logique floue peut être difficile pour les non-spécialistes.[22]

### III.10.Simulation :

Notre approche de contrôle floue repose sur l'élaboration de règles qui s'inspirent du comportement physique du pendule et de son équilibre. Pour ce faire, nous prenons en compte deux informations cruciales :

- L'écart entre la position souhaitée (consigne) et la position actuelle du pendule, c'est-à-dire l'erreur.
- Le taux de variation de cet écart, c'est-à-dire la dérivée de l'erreur.

L'angle du pendule n'est pas une entrée directe de cet algorithme de contrôle car nos actions sont appliquées directement au chariot mobile, qui à son tour influence le mouvement du pendule.

#### III.10.1.Choix de la forme des classes :

Afin d'obtenir un contrôle progressif et continu, sans changements brusques, la forme triangulaire s'avère être le choix le plus judicieux pour toutes les classes de variables d'entrée et de sortie. Ce choix permet également de simplifier les calculs nécessaires.

### III.10.2.Définition des classes pour les deux variables d'entrées :

Afin d'effectuer la transformation numérique symbolique, il est indispensable de connaître la plage de variation réelle de chaque grandeur d'entrée. Cette information est cruciale pour établir une correspondance entre chaque entrée et son ensemble flou correspondant, qui est lui-même divisé en sous-ensembles flous. Dans ce contexte, nous avons défini cinq sous-ensembles flous (ou classes) avec les désignations suivantes :

- Grand Négatif (GN)
- Petit Négatif (PN)
- Zéro (ZR)
- Petit Positif (PP)
- Grand Positif (GP)

### III.10.3.La définition des classes d'entrées :

#### L'erreur de positionnement :

L'erreur de position, représentée par la différence entre la position désirée (consigne) et la position actuelle du pendule.

Nous avons limité physiquement La mesure de l'erreur à un intervalle de -12,8 à 12,8 mètres.

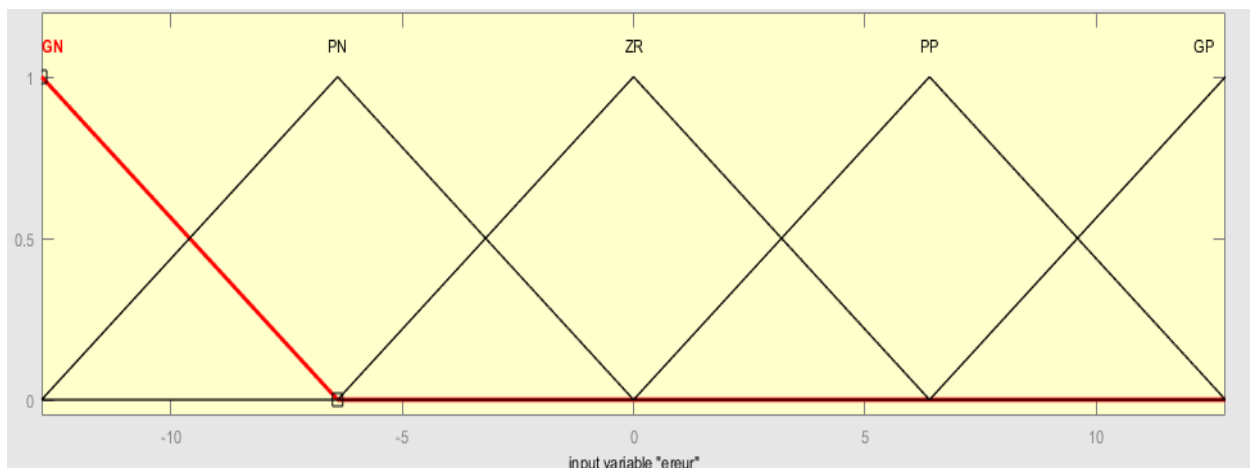
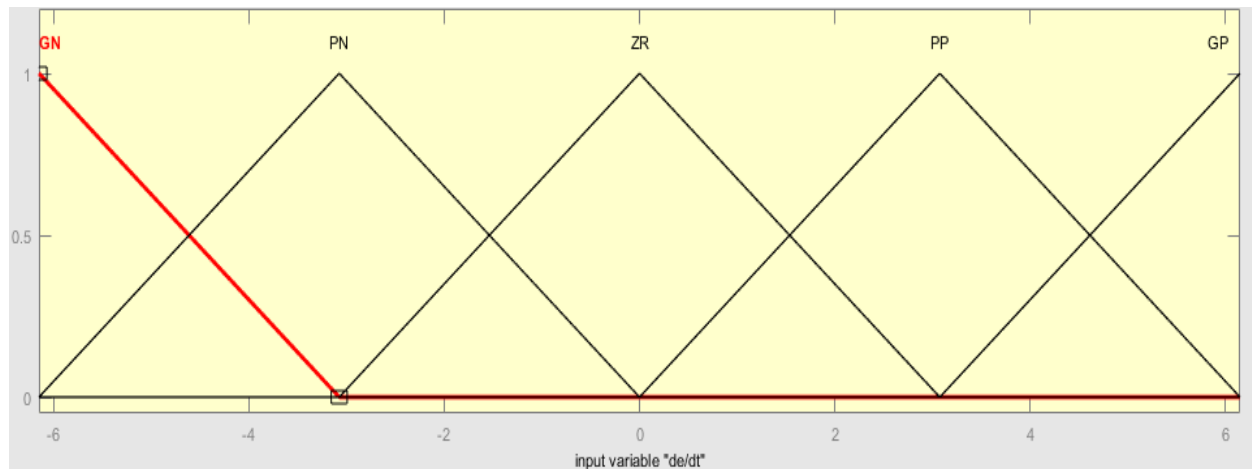


Figure III.3 : Définition des classes de l'erreur de positionnement

**La dérivée de l'erreur de positionnement :**

La dérivée de l'erreur, représentant la vitesse instantanée de variation de l'écart entre la position souhaitée et la position actuelle du pendule.

La mesure de la dérivée de l'erreur est limitée physiquement à un intervalle de -6,15 à 6,15 mètres par secondes.

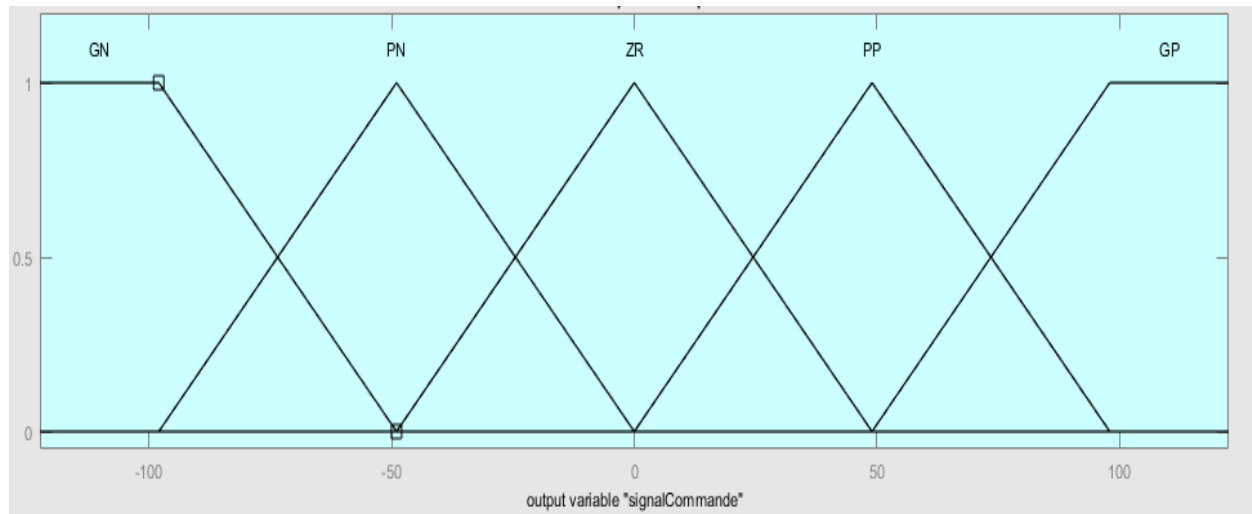


**Figure III.4 : Définition des classes de la dérivée de l'erreur de positionnement**

**III.10.4. La définition de la classe de sortie :**

La variable de sortie symbolique, qui nécessite une conversion en valeurs numériques, représente le signal de commande du robot généré par le régulateur. Des formes de classes triangulaires et trapézoïdales sont employées, en maintenant cinq sous-ensembles flous pour capturer les caractéristiques de la variable de sortie.

Les limites physiques du signal de commande du robot sont fixées entre -122,5 et 122,5.



**Figure III.5 : Définition des classes du signal de commande du robot.**

La représentation du savoir-faire du contrôleur flou s'effectue sous la forme d'un tableau de règles, où chaque règle établit une correspondance conditionnelle entre les états des variables d'entrée et une caractéristique de la variable de sortie. Étant donné que chacune des deux entrées est en cinq classes, un ensemble de 25 règles est obtenu.

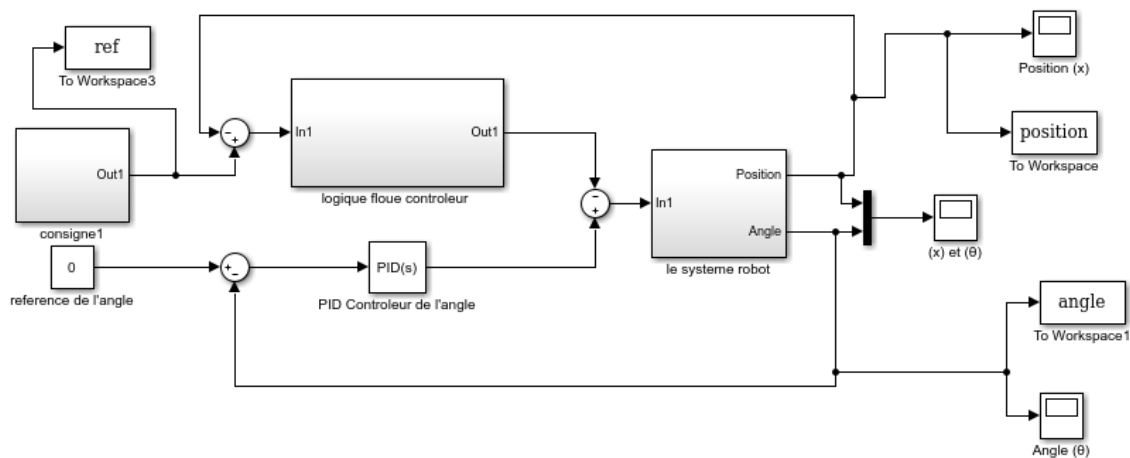
L'élaboration des règles du contrôleur gérant la stabilisation du robot a pendule inverse est simple. Par exemple, si le bras tombe rapidement vers la droite, le robot doit se déplacer très vite vers la droite pour rétablir l'équilibre. Le tableau suivant présente les règles du contrôleur.

Erreur	GN	PN	ZR	PP	GP
de/dt					
GN	GN	GN	PP	PN	ZR
PN	GN	GN	PN	ZR	PP
ZR	GN	PN	ZR	PP	GP
PP	PN	ZR	PP	GP	GP
GP	ZR	PP	GP	GP	GP

**TableauIII.2 : la matrice d'inférence du contrôleur flou.**

Dans le contexte du contrôle flou pour le mouvement du robot, une règle peut être interprétée comme suit : Si l'erreur est 'très positive' et que le taux de variation de l'erreur est 'très positif', alors la force appliquée au robot doit être 'très grande' et dirigée vers la droite, résultant en une force 'très positive'.

Ce contrôleur par logique floue est implémenté dans un Simulink comme le montre la figure ci-dessous avec une consigne de série d'impulsions variant de -5 à 5 avec une période de 40 secondes:



**Figure III.6 : Le model Simulink pour le control par logique floue.**

Et les résultats ont été les suivants :

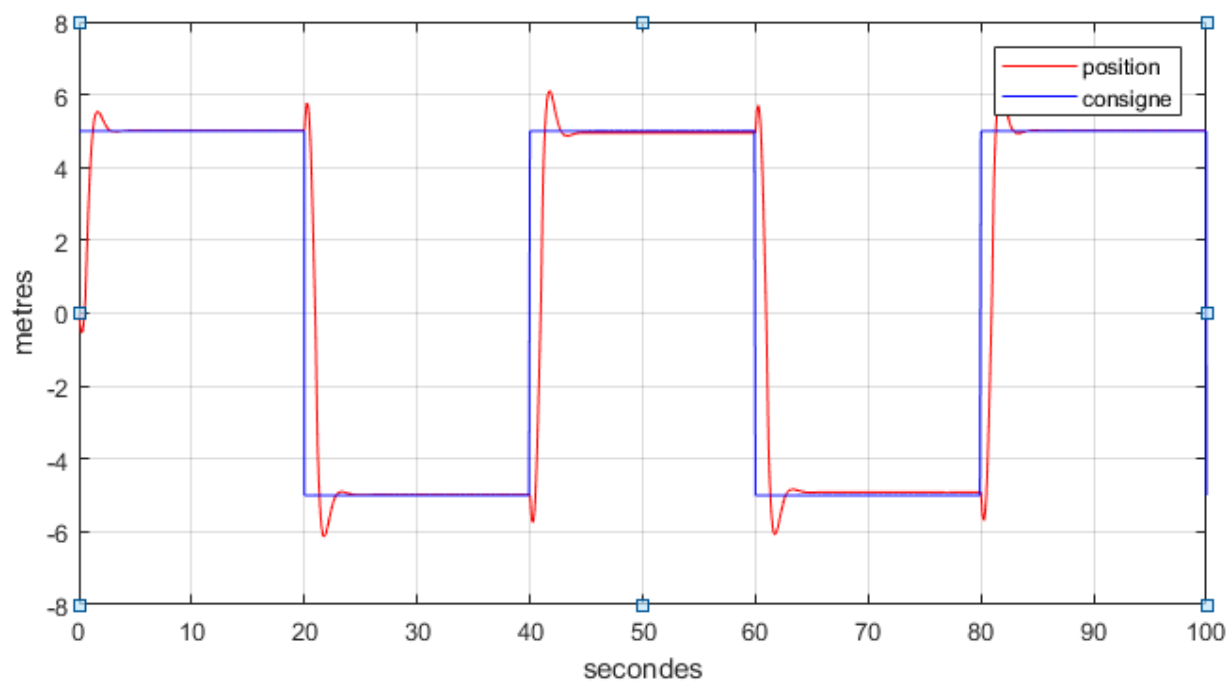


Figure III.7 : Simulation du positionnement et de la consigne du robot.

En ce qui concerne l'angulation :

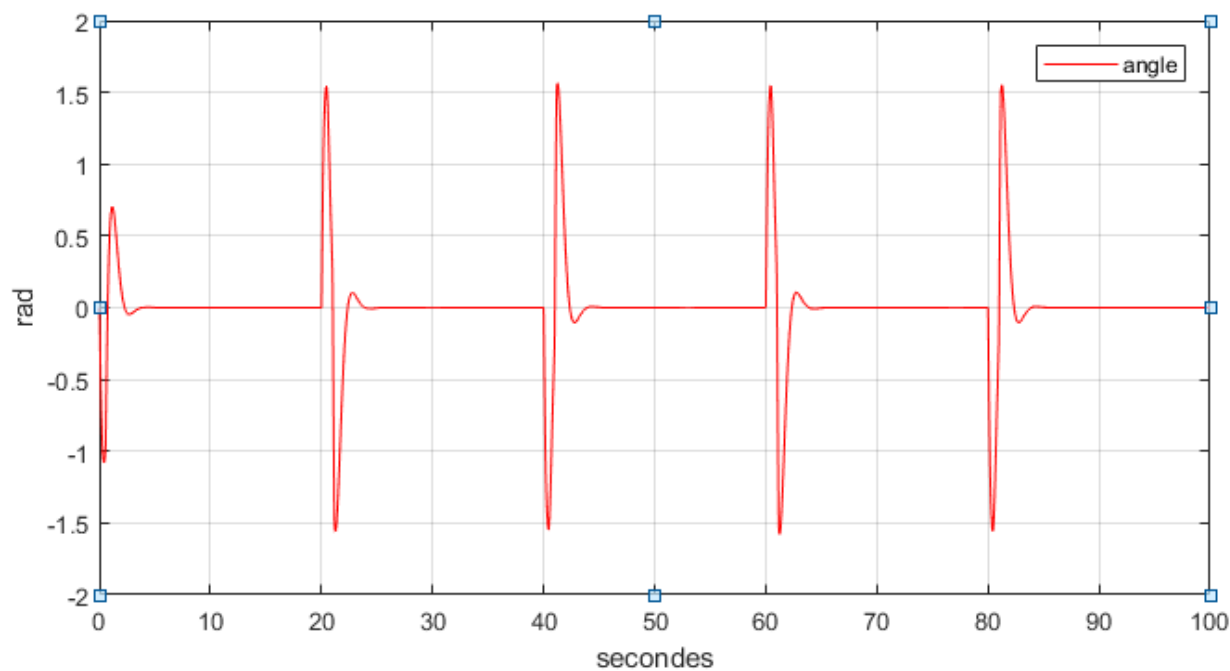


Figure III.8 : Simulation de l'angulation.

Dans l'ensemble, les graphs démontrent l'application réussie du contrôle par logique flou à la stabilisation du robot pendule inversé. Le contrôleur contrecarre efficacement la tendance du pendule à tomber et le guide vers la position d'équilibre souhaitée. Le temps de réponse rapide par rapport au PID et le dépassement proportionnel régulier constant ainsi que un recul pas très important soutiennent davantage l'efficacité de la stratégie de contrôle.

### **III.11.Conclusion :**

La logique floue offre une approche flexible et puissante pour le contrôle de systèmes complexes et non linéaires comme le robot a pendule inversé mobile. Sa capacité à traiter des informations incertaines et à s'adapter à des conditions changeantes en fait un outil précieux pour la robotique et l'automatisation.



CHAPITRE IV :  
LA COMMANDE  
PREDICTIVE (MPC) D'UN  
ROBOT A PENDULE  
INVERSEE MOBILE

## IV.1.Introduction :

La commande prédictive, ou MPC (Model Prédictive Control), repose sur une approche ingénieuse : utiliser un modèle mathématique du système pour anticiper son comportement futur et déterminer la commande optimale en minimisant un coût tout en respectant des contraintes.

Pour les familiers de l'optimisation, les notions de coût et de contraintes sont des concepts clés. Dans le contexte de la commande prédictive, il s'agit d'un cas particulier appliqué à l'optimisation des systèmes dynamiques, ce qui aboutit à la commande optimale.

L'idée fondatrice de la commande prédictive trouve ses racines dans l'ouvrage pionnier de Bellman sur la commande optimale en 1957. L'étude de la stabilité d'une telle loi de commande en boucle fermée a été menée par Kalman en 1960, qui a souligné que "l'optimalité ne garantit pas nécessairement la stabilité".

L'application industrielle de la commande prédictive a vu le jour en 1976 grâce aux travaux de Richalet et à son logiciel IDCOM (Identification, Commande). Ce formalisme permettait de traiter les systèmes linéaires comme des filtres à réponse impulsionnelle finie (FIR). Les coûts considérés étaient quadratiques et l'estimation reposait sur une approche par moindres carrés. Des contraintes affines sur les entrées et les sorties pouvaient également être spécifiées.

En 1980, Cutler et Ramaker ont introduit DMC (Dynamic Matrix Control), reprenant de nombreuses idées d'IDCOM et représentant les systèmes par leurs réponses à l'échelon.

En 1988, SMOC (Shell Multivariable Optimizing Control) a permis de considérer les systèmes sous forme d'état, avec une estimation assurée par un filtre de Kalman. Outre ces outils d'automatique plus modernes, SMOC intègre la notion de contraintes dures et molles avec la possibilité de les ordonner, ce qui constitue un avantage pratique certain.

Ce document a pour objectif de présenter les éléments constitutifs fondamentaux d'un outil de commande prédictive ainsi que son utilisation pratique. [9]

## IV.2.Domains d'application : [10]

### IV.2.1.Industrie chimique et pétrochimique :

- **Raffinerie de pétrole** : Le MPC optimise le processus de distillation, de craquage et de reformage catalytique pour maximiser le rendement des produits désirables tout en minimisant la production de déchets.
- **Synthèse de produits chimiques** : Le MPC contrôle précisément les réactions chimiques en maintenant des conditions optimales de température, de pression et de débit pour obtenir des produits de haute pureté et de qualité constante.
- **Gestion des réacteurs** : Le MPC assure une régulation efficace des réacteurs chimiques complexes, en tenant compte de réactions exothermiques et de cinétique complexe pour garantir la sécurité et l'efficacité du processus.

### IV.2.2.Production d'énergie :

- **Centrales électriques thermiques** : Le MPC optimise le fonctionnement des turbines, des chaudières et des générateurs pour maximiser la production d'électricité tout en respectant les contraintes de consommation de combustible et d'émissions polluantes.
- **Centrales électriques nucléaires** : Le MPC contrôle la réactivité du cœur du réacteur et la circulation du fluide caloporteur pour maintenir une puissance stable et sûre, tout en respectant les réglementations de sécurité strictes.
- **Réseaux électriques intelligents** : Le MPC permet de gérer la distribution d'énergie en temps réel en tenant compte de la demande fluctuante, de la production décentralisée et des contraintes de réseau, contribuant ainsi à l'optimisation de l'efficacité et de la stabilité du réseau.

### IV.2.3.Automobile :

- **Système de contrôle moteur** : Le MPC optimise l'injection de carburant et le calage de l'allumage pour minimiser la consommation de carburant, maximiser les performances du moteur et respecter les normes d'émissions.
- **Système de freinage antiblocage (ABS)** : Le MPC contrôle individuellement la pression de freinage de chaque roue pour optimiser la force de freinage, maintenir

l'adhérence des pneus et éviter le blocage des roues, améliorant ainsi la sécurité et la stabilité du véhicule.

- **Système de contrôle de la suspension active :** Le MPC ajuste la suspension en temps réel en fonction des conditions de route et du style de conduite pour maximiser le confort et la tenue de route du véhicule.

### IV.2.4.Aéronautique :

- **Contrôle du pilote automatique :** Le MPC guide l'avion en suivant une trajectoire préplanifiée, en tenant compte des conditions météorologiques, du trafic aérien et des restrictions de vol, assurant ainsi un vol sûr et efficace.
- **Stabilisation de l'avion :** Le MPC contrôle les ailerons, le gouvernail et la profondeur pour maintenir la stabilité et l'attitude de l'avion en cas de perturbations externes ou de changements de configuration de vol.
- **Optimisation de la consommation de carburant :** Le MPC optimise la trajectoire et la vitesse de vol pour minimiser la consommation de carburant tout en respectant les contraintes de temps et de performance.

### IV.2.5.Autres domaines d'application :

- **Robotique :** Le MPC permet de contrôler des robots complexes avec plusieurs articulations et degrés de liberté, en réalisant des mouvements précis et coordonnés pour accomplir des tâches spécifiques.
- **Sidérurgie :** Le MPC optimise le processus de production de l'acier, en contrôlant la température des fours, la composition chimique du métal et le laminage, pour obtenir des produits de haute qualité.
- **Industrie agroalimentaire :** Le MPC contrôle les processus de fermentation, de séchage et de conditionnement des aliments pour garantir la qualité, la sécurité et la conservation des produits alimentaires.

### IV.3.Les concepts :

**IV.3.1.Modèle mathématique :** Le fondement du MPC réside dans la construction d'un modèle mathématique précis du système à contrôler. Ce modèle peut être obtenu à partir de données expérimentales, d'équations physiques ou d'une combinaison des deux. La qualité du modèle est cruciale pour la performance du MPC, car il permet de prédire le comportement du système avec précision.

**IV.3.2.Horizon de prédiction :** L'horizon de prédiction définit la période de temps sur laquelle le MPC optimise les actions de commande. Il représente le nombre de pas de temps futurs pour lesquels le modèle est utilisé pour prédire la sortie du système en réponse aux actions de commande prévues.

**IV.3.3.Fonction de coût :** La fonction de coût définit l'objectif que le MPC cherche à atteindre. Elle est généralement représentée par une expression mathématique qui quantifie l'écart entre le comportement souhaité du système et sa trajectoire prédite. Le MPC minimise cette fonction de coût en calculant la séquence d'actions de commande optimale.

**IV.3.4.Optimisation :** Le cœur du MPC réside dans l'algorithme d'optimisation utilisé pour déterminer la séquence d'actions de commande optimale sur l'horizon de prédiction. Cet algorithme prend en compte la fonction de coût, le modèle du système et les contraintes imposées pour identifier la séquence d'actions qui minimise l'erreur de prédiction tout en respectant les limites du système.

**IV.3.5.Contraintes :** Le MPC permet d'intégrer des contraintes dans le processus d'optimisation, garantissant ainsi que le système fonctionne dans des limites sûres et admissibles. Ces contraintes peuvent concerner des variables physiques, telles que la température, la pression ou la vitesse, ou des limitations opérationnelles, comme la consommation d'énergie ou le respect de normes de sécurité.

**IV.3.6.Retour d'information :** Le MPC fonctionne en boucle fermée, ce qui signifie qu'il utilise en permanence des mesures du système réel pour mettre à jour le modèle et recalculer la séquence d'actions de commande. Cette boucle de rétroaction permet au MPC de s'adapter aux changements du système et aux perturbations en temps réel, garantissant ainsi un contrôle robuste et efficace.

**IV.3.7.Résolution en ligne :** Le MPC est conçu pour être implémenté en temps réel, ce qui signifie que les calculs d'optimisation doivent être effectués suffisamment rapidement pour générer les actions de commande à la fréquence requise par le système. Cela nécessite des algorithmes d'optimisation efficaces et des implémentations logicielles optimisées.

**IV.3.8.Gestion des perturbations :** Le MPC est capable de gérer les perturbations et les incertitudes en mettant continuellement à jour le modèle avec de nouvelles données du système et en recalculant la séquence de commande. Cela permet au système de maintenir ses performances malgré des changements inattendus dans l'environnement ou le comportement du système.

**IV.3.9.Contrôle multivariable :** Le MPC est parfaitement adapté au pilotage de systèmes multivariables complexes avec plusieurs entrées et sorties. Il permet de coordonner efficacement les actions de commande sur l'ensemble des variables pour atteindre les objectifs de performance souhaités.

**IV.3.10.Applications :** Le MPC trouve des applications dans une large gamme de domaines, notamment l'industrie chimique, la production d'énergie, l'automobile, l'aéronautique, la robotique et bien d'autres encore. Sa capacité à gérer des systèmes complexes, à respecter des contraintes strictes et à s'adapter aux perturbations en fait un outil précieux pour les ingénieurs et les chercheurs dans divers secteurs d'activité.

## **IV.4.Principe de la commande prédictive :**

L'algorithme de commande prédictive se distingue par sa capacité à anticiper le comportement futur du système afin d'élaborer une commande qui assure un suivi optimal d'une trajectoire définie.

Son principe repose sur la création d'un effet anticipatif pour le système à commander. Pour ce faire, il s'appuie sur une trajectoire de référence connue à l'avance et sur la prédiction du comportement futur du système. L'objectif est de minimiser l'écart entre les prédictions et la trajectoire de référence en s'appuyant sur une fonction de coût. Tout cela se déroule dans le respect des contraintes de fonctionnement du système.

Prenons l'exemple d'un conducteur au volant de son véhicule. La trajectoire de référence désirée est matérialisée par la route, connue à l'avance sur une distance correspondant à son champ

visuel. En tenant compte des caractéristiques de la voiture (modèle mental du comportement du véhicule), le conducteur choisit les actions à effectuer (accélérer, freiner, tourner) pour se rapprocher au maximum de la trajectoire souhaitée. Seule la première action est exécutée à chaque instant, puis la procédure est répétée pour déterminer les actions suivantes. [23]

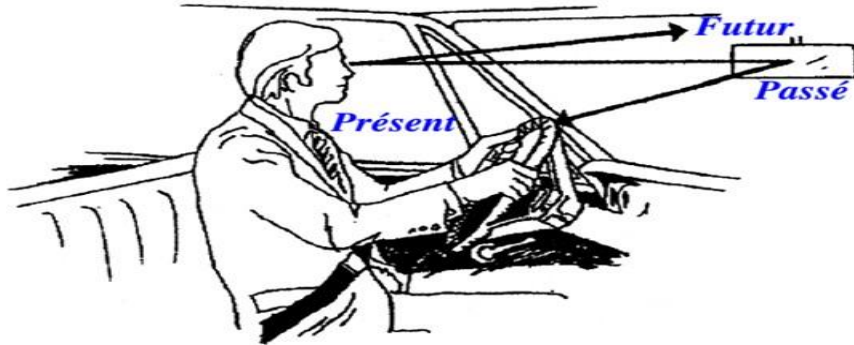


Figure IV.1 : Philosophie de la commande prédictive. [24]

La **figure IV.2** offre une représentation synthétique du principe de la commande prédictive appliqué à un problème général de commande optimale sous contraintes, avec un horizon glissant.

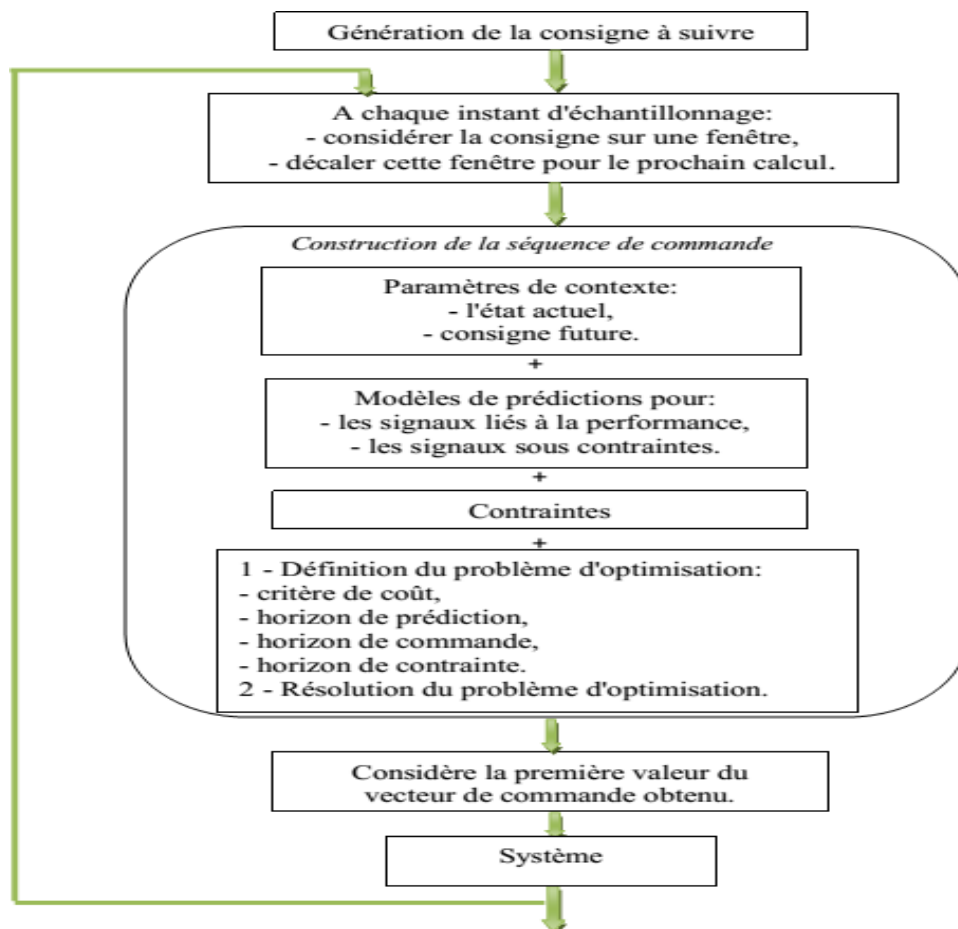


Figure IV.2 : Schéma du principe de la commande prédictive. [25]

## IV.5.Eléments d'une commande prédictive :

Si tous les algorithmes de commande prédictive (MPC) partagent les mêmes éléments de base illustrés dans la **figure IV.2**, des choix variés peuvent être faits pour chaque élément, donnant naissance à une multitude d'algorithmes spécifiques. Ces éléments clés sont les suivants :

### IV.5.1.Le modèle du système :

Ce composant crucial sert à prédire le comportement futur du système. Sa précision est fondamentale pour l'efficacité globale de l'algorithme MPC.

### IV.5.2.Le critère de performance :

Le critère de performance, également appelé fonction de coût, définit l'objectif à optimiser pour le système MPC. Il quantifie l'écart entre le comportement réel et le comportement souhaité, en tenant compte des priorités et des objectifs spécifiques de l'application.

### IV.5.3.L'algorithme d'optimisation :

Ce composant joue un rôle central dans le calcul de la séquence de commandes optimale. Il minimise le critère de performance tout en respectant les contraintes imposées au système. Divers algorithmes d'optimisation peuvent être utilisés, chacun ayant ses avantages et ses inconvénients selon l'application.

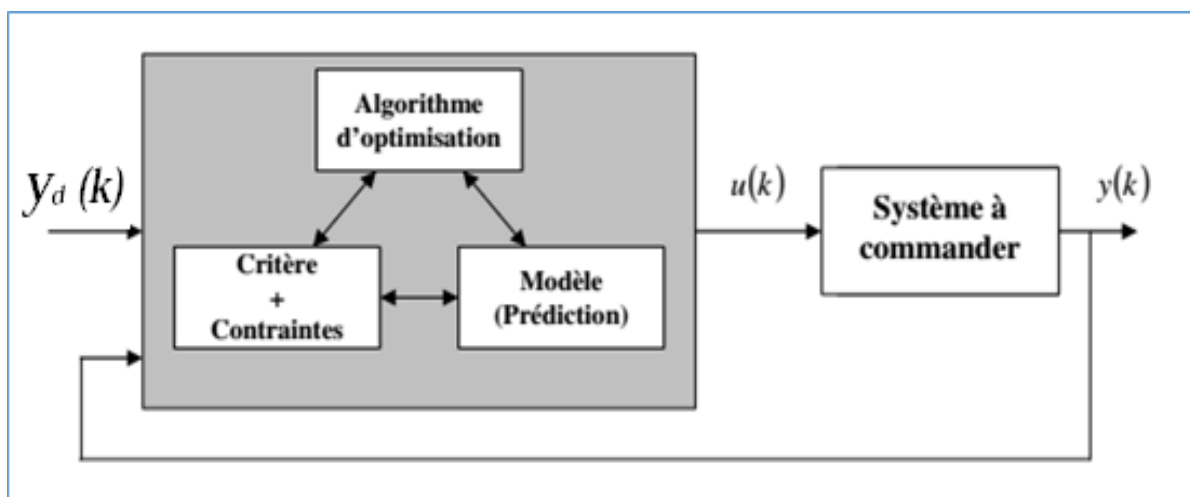


Figure IV.3 : Schéma de la stratégie du commande prédictive. [26]



La mise en œuvre de la stratégie de commande prédictive repose sur la structure de base illustrée dans la **figure IV.3**. Cette structure met en jeu un modèle pour prédire les sorties futures du système. La prédiction s'effectue en se basant sur les valeurs actuelles et passées des commandes ainsi que sur les commandes optimales futures. Les commandes optimales futures sont déterminées à l'aide d'une méthode d'optimisation. Cette méthode prend en compte la fonction de coût, qui dépend également des consignes futures, et intègre éventuellement des contraintes à respecter. Le modèle du système à commander joue un rôle crucial dans la commande prédictive. La qualité du modèle est déterminante pour la précision des prédictions des sorties futures et, par conséquent, pour l'efficacité globale de la stratégie MPC. Le modèle doit être capable de capturer fidèlement la dynamique du processus afin de permettre une prise de décision optimale.[23]

## **IV.6.Les différents types d'algorithmes prédictifs :**

La famille des algorithmes prédictifs est vaste et regroupe diverses approches qui visent à anticiper le comportement futur d'un système ou d'un phénomène. Parmi les types les plus courants, on trouve :

### **IV.6.1.Régression linéaire :**

La régression linéaire est une méthode statistique classique qui établit une relation linéaire entre une variable cible (à prédire) et une ou plusieurs variables explicatives. Elle s'appuie sur un ensemble de données historiques pour ajuster un modèle linéaire simple qui permet d'estimer les valeurs futures de la variable cible.

### **IV.6.2.K-Nearest Neighbors (KNN) :**

L'algorithme KNN (K plus proches voisins) est une méthode non paramétrique qui prédit la valeur d'un nouveau point en se basant sur les valeurs des K points les plus proches dans l'espace des caractéristiques. Il s'agit d'une approche simple et efficace pour la classification et la régression.

### **IV.6.3.Arbres de décision :**

Les arbres de décision sont des structures arborescentes qui représentent des règles de décision pour prédire une variable cible. Ils permettent de capturer des relations non linéaires complexes entre les variables et sont faciles à interpréter.

#### IV.6.4.Forêts aléatoires :

Les forêts aléatoires constituent un ensemble d'arbres de décision construits de manière indépendante à partir de sous-ensembles aléatoires des données. Elles combinent les prédictions de chaque arbre pour obtenir une estimation plus robuste et précise.

#### IV.6.5.Réseaux de neurones artificiels :

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont des modèles inspirés du cerveau humain, composés de neurones artificiels interconnectés. Ils apprennent à partir de données et sont capables de capturer des relations complexes et non linéaires, ce qui les rend puissants pour la prédiction dans divers domaines.

#### IV.6.6.Machines à vecteurs de support (SVM) :

Les SVM sont des algorithmes d'apprentissage supervisé utilisés pour la classification et la régression. Ils cherchent à trouver un hyperplan qui sépare au mieux les points de données appartenant à différentes classes.

#### IV.6.7.Algorithmes génétiques :

Les algorithmes génétiques s'inspirent de l'évolution naturelle pour optimiser une solution. Ils simulent la sélection naturelle, la reproduction et la mutation pour faire évoluer une population de solutions vers une solution optimale pour un problème donné.

### IV.7.La commande prédictive à base d'un modèle d'état :

#### IV.7.1.Calcul des prédictions :

Les prédictions sont calculées à l'aide d'un modèle d'état discret, décrit par l'équation suivante :

$$\begin{cases} x_m(k+1) = A_m x_m(k) + B_m u(k) \\ y(k) = C_m x_m(k) \end{cases} \quad (IV.1)$$

$x_m$  est le vecteur Variable d'état,  $u(k)$  est la variable manipulée ou la variable d'entrée,  $y(k)$  est la sortie du système,  $k$  l'instant d'échantillonnage, alors tout ce que nous pouvons faire est de prédire à partir des équations ci-dessus, nous obtenons le prédicteur sous forme matricielle.

En appliquant une opération de différence sur (1) on obtient :

$$x_m(k+1) - x_m(k) = A_m[x_m(k) - x_m(k-1)] + B_m[u(k) - u(k-1)] \quad (IV.2)$$

En notant :

$$\begin{cases} \Delta x_m(k+1) = x_m(k+1) - x_m(k) \\ \Delta x_m(k) = x_m(k) - x_m(k-1) \\ \Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \end{cases} \quad (IV.3)$$

En appliquant (3) sur (2) on obtient :

$$\Delta x_m(k+1) = A_m \Delta x_m(k) + B_m \Delta u(k) \quad (IV.4)$$

L'objectif maintenant est de ressortir la relation entre  $\Delta X_m$  et  $Y$

$$\begin{aligned} y(k+1) - y(k) &= C_m[x_m(k+1) - x_m(k)] = C_m \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) - y(k) &= C_m A_m \Delta x_m(k) + C_m B_m \Delta u(k) \end{aligned} \quad (IV.5)$$

En combinant (4) et (5) on forme alors le nouveau modèle d'état appelé modèle d'état renforcé :

$$\begin{pmatrix} x_m(k+1) \\ \Delta x_m(k+1) \\ y(k+1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_m & 0_m^T \\ C_m A_m & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_m(k) \\ \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_m \\ C_m B_m \end{pmatrix} \Delta u(k) \quad (IV.6)$$

$$y(k) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_m(k) \\ \Delta x_m(k) \\ y(k) \end{pmatrix}$$

#### IV.7.1.1. Calcul des prédictions des états et de la sortie :

Ce calcul se réalise dans une fenêtre de prédiction ou fenêtre d'optimisation (intervalle de temps). La longueur de cette fenêtre est notée  $N_p$  ( $N_2$ ).

En supposant que les états  $X(k_i)$  sont mesurables à l'instant courant  $k_i$ , les futures commandes à appliquer au système pour obtenir les états et la sortie désirés sont :

Où  $N_c$  ( $N_u$ ) est l'horizon de commande (le nombre de commande à envoyer au système pour le contrôler)

$$\Delta u(k_i), \Delta u(k_i + 1), \Delta u(k_i + 2), \dots, \Delta u(k_i + N_c - 1) \quad (IV.7)$$

A partir de la mesure  $X(k_i)$ , les variables d'état futures sont alors prédites pour  $N_p$  nombre d'échantillons futures :

$$x(k_i + 1 | k_i), x(k_i + 2 | k_i), \dots, x(k_i + N_p | k_i) \quad (IV.8)$$

En se basant sur le modèle d'état augmenté, les expressions des futurs états prédits sont :

$$\begin{aligned} x(k_i + 1 | k_i) &= Ax(k_i) + B\Delta u(k_i) \\ x(k_i + 2 | k_i) &= Ax(k_i + 1 | k_i) + B\Delta u(k_i + 1) \\ &= A^2x(k_i) + AB\Delta u(k_i) + B\Delta u(k_i + 1) \end{aligned} \quad (IV.9)$$

$$x(k_i + N_p | k_i) = A^{N_p}x(k_i) + A^{N_p-1}B\Delta u(k_i) + A^{N_p-2}B\Delta u(k_i + 1) + \dots + A^{N_p-N_c}B\Delta u(k_i + N_c - 1)$$

(IV.10)

En multipliant ces états prédits par la matrice augmentée  $C$ , on obtient les sorties :

$$\begin{aligned} y(k_i + 1 | k_i) &= CAx(k_i) + CB\Delta u(k_i) \\ y(k_i + 2 | k_i) &= CAx(k_i + 1 | k_i) + CB\Delta u(k_i + 1) \\ &= CA^2x(k_i) + CAB\Delta u(k_i) + CB\Delta u(k_i + 1) \end{aligned} \quad (IV.11)$$

On conclut

$$y(k_i + N_p | k_i) = CA^{N_p}x(k_i) + CA^{N_p-1}B\Delta u(k_i) + CA^{N_p-2}B\Delta u(k_i + 1) + \dots + CA^{N_p-N_c}B\Delta u(k_i + N_c - 1) \quad (IV.12)$$

On remarque donc que les prédictions dépendent de l'état courant et des futures commandes. En les regroupant, on peut les mettre sous une forme matricielle :

$$Y = [y(k_i + 1 | k_i), y(k_i + 2 | k_i), \dots, y(k_i + N_p | k_i)]^T \quad (IV.13)$$

$$\Delta U = [\Delta u(k_i), \Delta u(k_i + 1), \Delta u(k_i + 2), \dots, \Delta u(k_i + N_c - 1)]^T \quad (IV.14)$$

Alors :

$$Y = Fx(k_i) + \phi \quad (IV.15)$$

$$F = \begin{pmatrix} CA \\ CA^2 \\ CA^3 \\ \vdots \\ CA^{N_p} \end{pmatrix}; \quad \phi = \begin{pmatrix} CB & 0 & 0 & \dots & 0 \\ CAB & CB & 0 & \dots & 0 \\ CA^2B & CAB & CB & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ CA^{N_p-1}B & CA^{N_p-2}B & CA^{N_p-3}B & \dots & CA^{N_p-N_c}B \end{pmatrix} \quad (IV.16)$$

### IV.7.2.Optimisation :

Lorsqu'un signal de consigne spécifique  $e(k_i)$  est défini à un instant donné ( $k_i$ ), la commande prédictive vise à rapprocher le plus possible la sortie anticipée de ce signal de référence. Pour ce faire, elle détermine le "meilleur" ensemble d'actions de commande, représenté par le vecteur  $\Delta U$ . Ce choix optimal permet de minimiser une fonction d'erreur qui mesure l'écart entre la valeur de consigne et la sortie prédite.

$$R_s^T = \overbrace{[111 \dots \dots 1]}^{N_p} r(k_i) \quad (IV.17)$$

On définit la fonction de coût :

$$J = (R_s - Y)^T (R_s - Y) + \Delta U^T R \Delta U \quad (IV.18)$$

$$R = r_w \times I_{N_c \times N_c} \quad (IV.19)$$

En combinant (16) et (18) on obtient la forme de la fonction de coût :

$$J = (R_s - Fx(k_i))^T (R_s - Fx(k_i)) - 2\Delta U^T \phi^T (R_s - Fx(k_i)) + \Delta U^T (\phi^T \phi + \bar{R}) \Delta U \quad (IV.20)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \Delta U} = 2\phi^T (R_s - Fx(k_i)) + 2(\phi^T \phi + \bar{R}) \Delta U \quad (IV.21)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \Delta U} = 0 \rightarrow \Delta U = (\phi^T \phi + \bar{R})^{-1} \phi^T (R_s - Fx(k_i)) \quad (IV.22)$$

## IV.8.Avantages et inconvénients du MPC :

### IV.8.1.Avantages du MPC :

- **Performance améliorée :** Le MPC permet d'obtenir une meilleure précision de suivi, des temps de réponse plus rapides et une réduction des erreurs en régime permanent par rapport aux schémas de commande classiques. Cela s'explique par sa capacité à anticiper le comportement du système et à optimiser les actions de commande en conséquence.
- **Respect des contraintes :** Le MPC intègre explicitement les contraintes dans l'optimisation, garantissant que le système fonctionne dans des limites sûres et admissibles. Cela est particulièrement important pour les systèmes critiques où la sécurité et la fiabilité sont primordiales.
- **Gestion des perturbations :** Le MPC peut s'adapter aux perturbations et aux incertitudes en mettant continuellement à jour le modèle avec de nouvelles données du

système et en recalculant la séquence de commande. Cela permet au système de maintenir ses performances malgré des changements inattendus dans l'environnement ou le comportement du système.

- **Contrôle multivariable :** Le MPC est parfaitement adapté au pilotage de systèmes multivariables complexes avec plusieurs entrées et sorties. Il permet de coordonner efficacement les actions de commande sur l'ensemble des variables pour atteindre les objectifs de performance souhaités.
- **Adaptabilité :** Le MPC peut s'adapter à des changements dans le système ou l'environnement en temps réel, ce qui le rend robuste face aux perturbations.
- **Applications larges :** Le MPC trouve des applications dans une large gamme de domaines, notamment l'industrie chimique, la production d'énergie, l'automobile, l'aéronautique, la robotique et bien d'autres encore.

#### IV.8.2. Inconvénients du MPC :

- **Complexité :** Le MPC nécessite un modèle mathématique précis du système à contrôler, ce qui peut être difficile à obtenir pour des systèmes complexes ou non linéaires.
- **Calculs intensifs :** Les calculs d'optimisation requis par le MPC peuvent être gourmands en ressources informatiques, ce qui peut limiter son application à des systèmes à temps de cycle lent ou à des implémentations matérielles dédiées.
- **Sensibilité au bruit :** Le MPC peut être sensible au bruit de mesure, car les erreurs de mesure peuvent conduire à des prédictions inexactes et à des actions de commande suboptimales.
- **Difficulté de mise en œuvre :** La mise en œuvre du MPC peut être complexe et nécessiter une expertise en modélisation, optimisation et contrôle.
- **Coût :** Le développement et l'implémentation d'un système MPC peuvent s'avérer coûteux, en particulier pour des systèmes complexes ou à grande échelle.

Malgré ces inconvénients, le MPC reste une méthode de commande puissante et polyvalente qui offre de nombreux avantages pour une large gamme d'applications. Son adoption continue

de croître à mesure que les techniques de modélisation et d'optimisation évoluent, permettant de relever des défis de commande de plus en plus complexes dans divers secteurs d'activité.

Il est important de noter que les avantages et les inconvénients du MPC peuvent varier en fonction de l'application spécifique et des exigences du système à contrôler. Une analyse approfondie des besoins et des contraintes du système est nécessaire pour déterminer si le MPC est la méthode de commande la plus appropriée.

#### IV.9. Commande prédictive (MPC) d'un robot pendule inversée :

L'algorithme MPC algorithmique a été appliqué sur le robot à pendule inversé dans. Le chariot avec pendule inversé est donné par la figure IV.4. Le pendule du système est de longueur  $l$  et de masse  $m$  dont l'axe de suspension est lié au robot de masse  $M$  mobile. Initialement, le système est au repos. Ce système a une entrée  $F(t)$  et deux sorties  $x(t)$  la position  $\theta(t)$  l'angle.

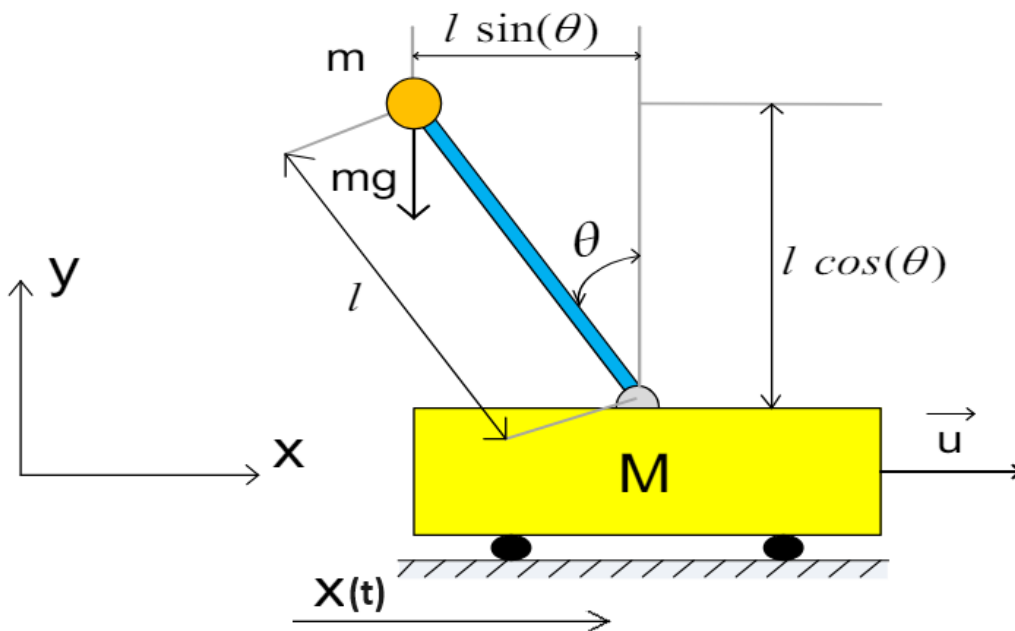


Figure IV.4 : Schéma de robot pendule inverse sur un chariot système.

**Paramètres :**

**m** : masse du pendule

**x(t)** : position du chariot

**M** : masse du chariot

**θ(t)** : angle du pendule

**l** : longueur du pendule

**g** : la pesanteur

**u** : force exercée sur le chariot

La fonction de transfert de ce système, après une discrétisation à la période d'échantillonnage de 0.5s, est donnée par :

$$H(z) = \frac{Y(z)}{F(z)} = \frac{x(z)}{F(z)} = \frac{1.208 z + 1.208}{z^2 - 7.255z + 1}$$

L'algorithme MPC a été appliqué sous environnement Matlab, dont l'objectif est de commander la position du robot selon une trajectoire de référence désirée .

Pour simuler fidèlement le comportement du robot pendule inversé, des paramètres numériques précis sont utilisés :

Paramètre	Symbol	Valeur	Unité
Mass du chariot	M	0.2	KG
Mass du pendule	m	0.5	KG
Longueur du pendule	l	0.3	m
La pesanteur	g	9.81	M/s <sup>2</sup>

**TableauIV.1 : Nouveau paramètre physique du robot pendule inverse.**



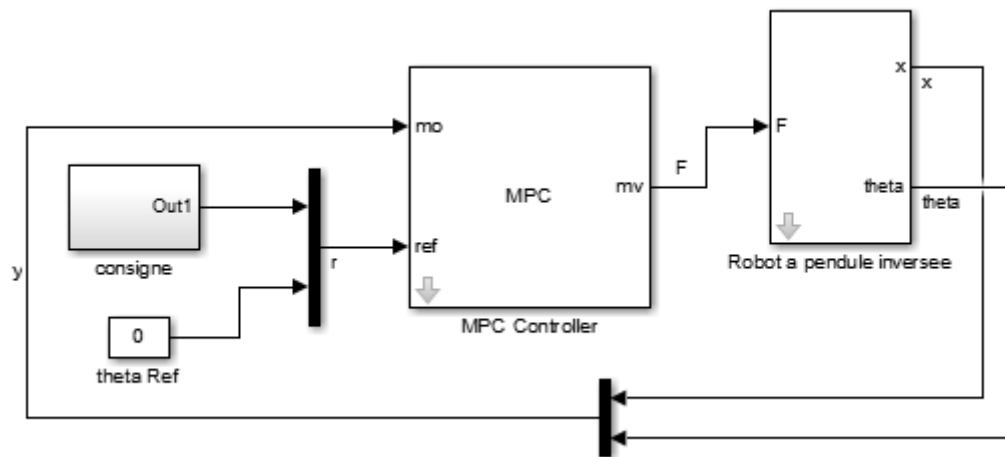


Figure IV.5 : Bloc SIMULINK robot pendule inversée.

Et les résultats ont été les suivants :

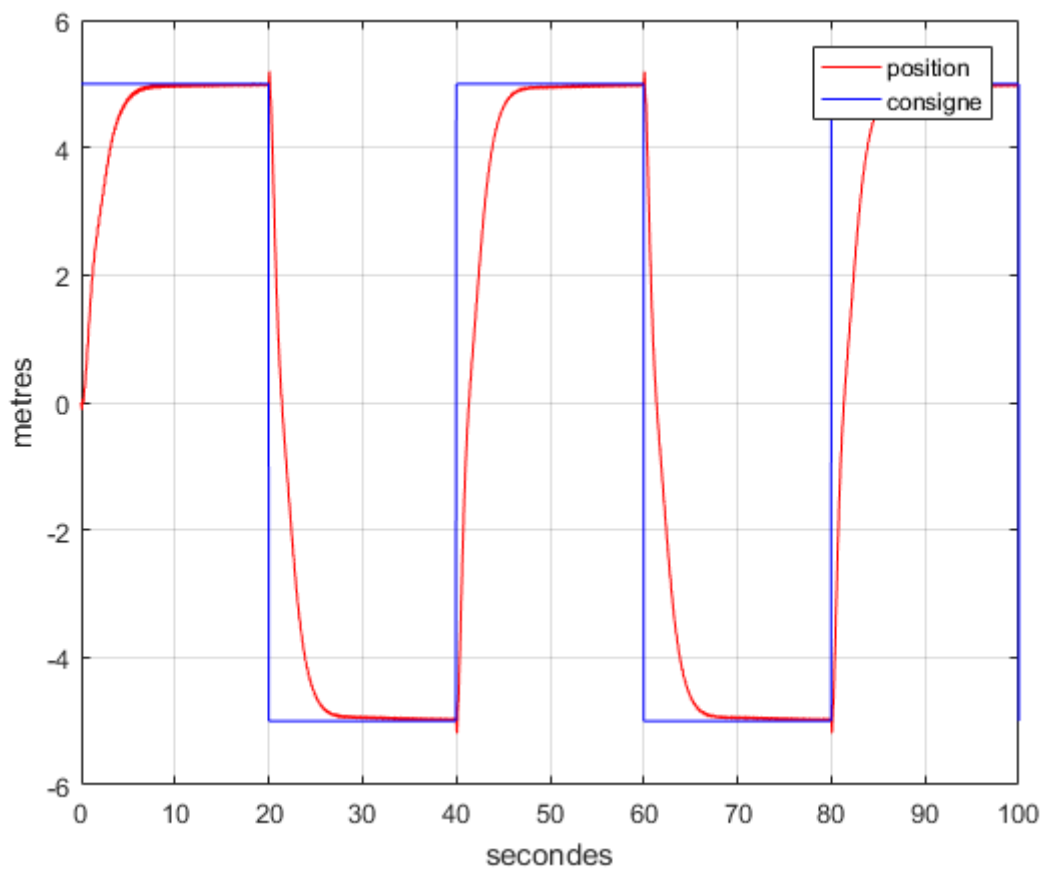
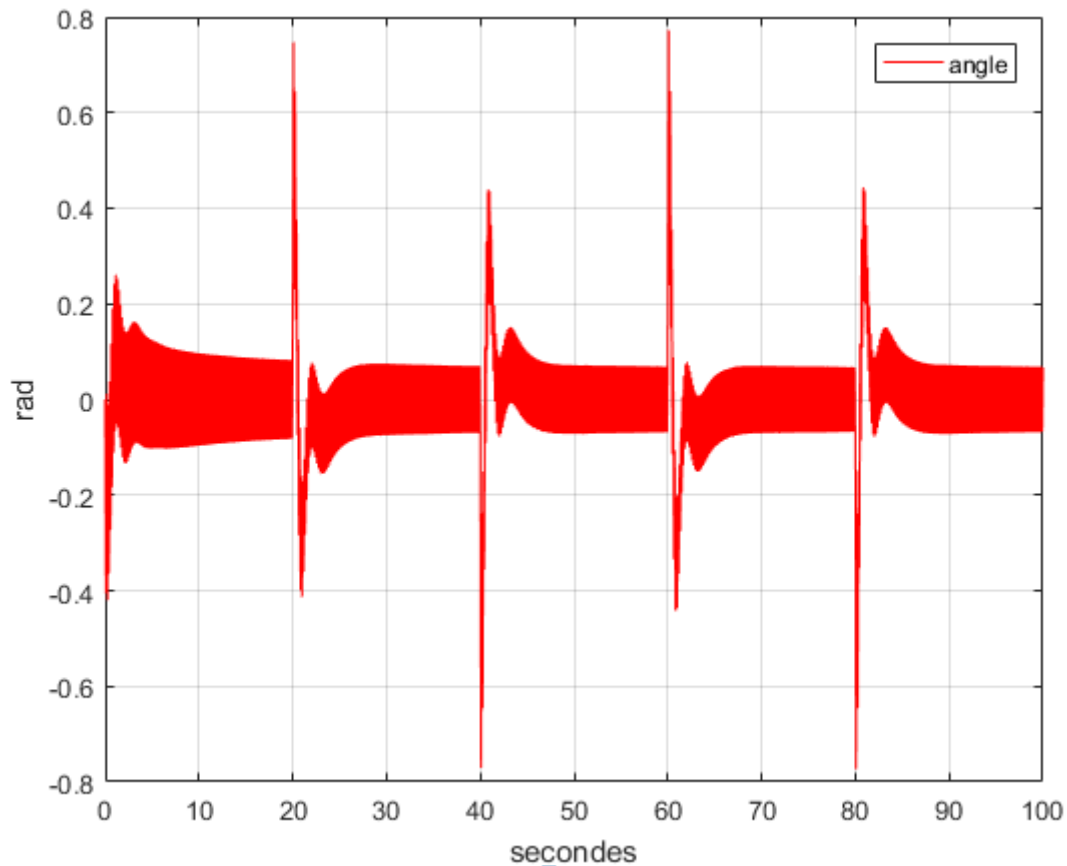


Figure IV.6 : Simulation du positionnement du robot et de la consigne.

En ce qui concerne l'angulation :



**Figure IV.7 : Simulation de l'angulation du pendule par rapport à la consigne.**

Les courbes présentées dans les figures IV.6, IV.7 et IV.8, issues de la simulation, illustrent la réponse du système en termes de position du robot. En comparant le signal de consigne (valeur de référence souhaitée) à l'allure de la réponse obtenue, on observe clairement l'aspect anticipatif de la commande prédictive. Cette caractéristique permet au système de réagir de manière proactive aux changements de consigne, anticipant ainsi le comportement futur et optimisant la performance, avec un dépassement et un retour presque nulle sans oublier un temps de réponse satisfaisant.

## IV.10. Analyse comparative des contrôleurs MPC et FLC pour un robot à pendule inversé mobile :

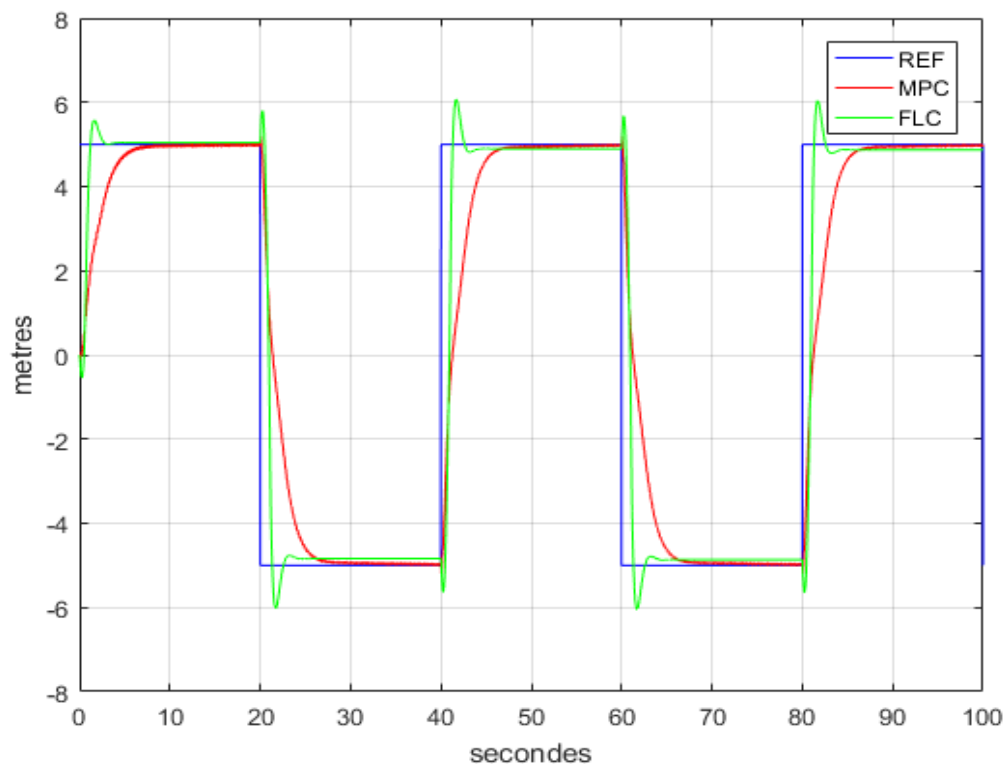


Figure IV.8 : Comparaison du positionnement du robot mobile entre un contrôleur MPC et FLC

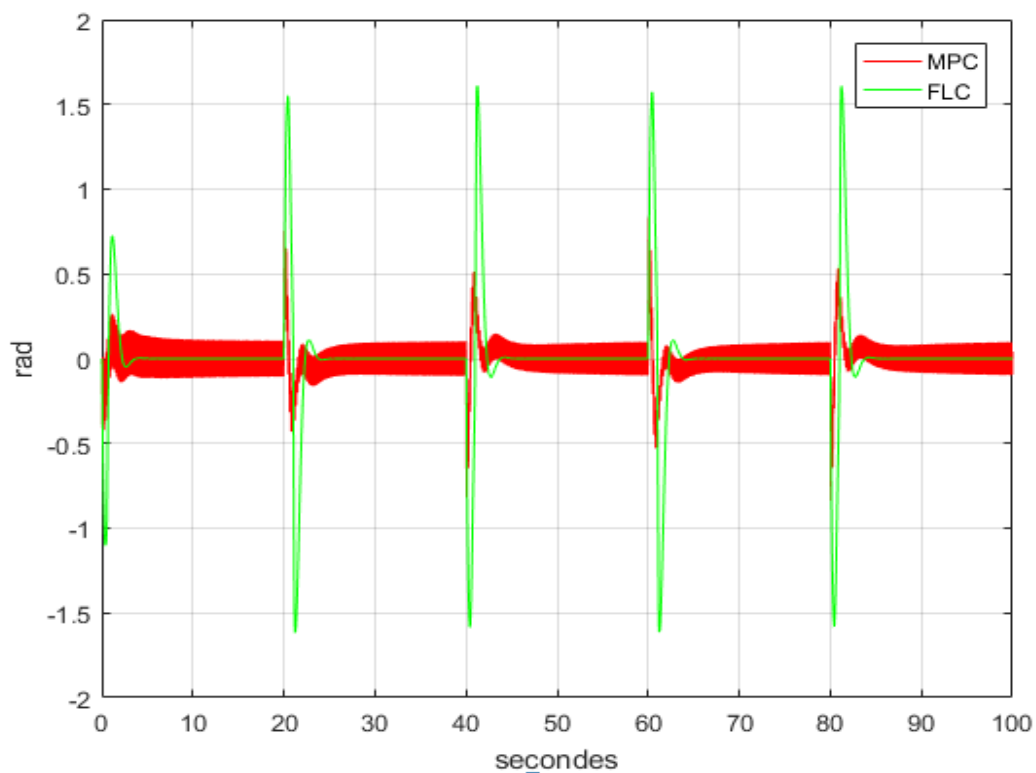


Figure IV.9 : Comparaison de l'angulation du robot mobile entre un contrôleur MPC et FLC

Dans le domaine de la robotique, le contrôle d'un robot à pendule inversé mobile (RPIM) représente un défi de taille en raison de son instabilité inhérente et de sa dynamique non linéaire. Pour contrôler efficacement un tel système, des stratégies de contrôle avancées telles que le contrôle prédictif par modèle (MPC) et le contrôle par logique floue (FLC) se sont imposées comme des choix majeurs. Dans ce contexte, nous avons fourni deux figures illustrant les réponses d'un robot à pendule inverse mobile contrôlé à la fois par MPC et FLC sous un signal de référence comprenant une série d'impulsions variant de 5 à -5 avec une période de 40 secondes. Cette analyse vise à comparer les performances de ces contrôleurs en se basant sur les caractéristiques de leurs réponses.

### IV.10.1.Comparaison des réponses :

La figure du positionnement fournie présente les réponses du robot à pendule inverse mobile sous l'influence des contrôleurs MPC et FLC. Sur la base du graphique, on peut faire les observations suivantes :

#### Réponse MPC :

- La réponse MPC présente une trajectoire lisse et bien amortie, indiquant un rejet efficace des perturbations et une convergence rapide vers le signal de référence souhaité.
- L'absence de dépassement ou d'oscillations suggère que le contrôleur MPC équilibre efficacement la performance de suivi avec la stabilité.
- Le temps de montée, qui représente le temps nécessaire pour atteindre la valeur de référence, semble être légèrement plus long par rapport à la réponse FLC.

#### Réponse FLC :

- La réponse FLC démontre également une performance de suivi satisfaisante, s'approchant progressivement du signal de référence.
- Cependant, la réponse FLC présente un léger dépassement, indiquant une déviation transitoire au-delà de la valeur de consigne avant de se stabiliser avec un recul imputable par rapport au MPC.
- Le temps de stabilisation, qui représente le temps nécessaire pour atteindre et maintenir la valeur de consigne dans une tolérance spécifiée, semble être légèrement plus court par rapport à la réponse MPC.

### IV.10.2. Analyse comparative des caractéristiques de contrôle :

#### Contrôleur MPC :

- **Points forts**
  - Excellente capacité de rejet des perturbations
  - Convergence rapide vers le signal de référence
  - Dépassement ou oscillations minimales
  - Convient aux systèmes avec une dynamique et des contraintes complexes
- **Points faibles**
  - Complexité computationnelle plus élevée
  - Peut nécessiter un modèle système détaillé
  - Convergence plus lente par rapport au FLC

#### Contrôleur FLC :

- **Points forts**
  - Simple à mettre en œuvre et à comprendre
  - Robuste aux incertitudes des paramètres
  - Efficace pour gérer les systèmes non linéaires
- **Points faibles**
  - Peut présenter un dépassement ou des oscillations
  - Repose sur les connaissances d'experts pour la conception de règles floues

Le choix entre MPC et FLC dépend des exigences spécifiques de l'application. Pour les systèmes exigeant une précision de suivi élevée, un dépassement minimal et une convergence rapide, le MPC est souvent le choix privilégié. Cependant, sa complexité computationnelle et sa dépendance à un modèle système détaillé peuvent poser des limites. En revanche, le FLC offre la simplicité, la robustesse et l'efficacité dans le traitement des systèmes non linéaires, ce qui le rend adapté aux scénarios où les ressources computationnelles sont limitées ou la modélisation du système est difficile.

### IV.11.Conclusion :

La commande prédictive s'impose comme une technologie de pointe dans le domaine du contrôle automatique. Sa capacité à anticiper, optimiser et contraindre le comportement des systèmes, tout en s'adaptant en permanence aux changements, lui ouvre de vastes perspectives d'application dans des domaines aussi variés que l'industrie, l'énergie, la robotique et l'aéronautique.

La recherche continue d'explorer de nouvelles applications et d'améliorer les performances de la commande prédictive, promettant des avancées majeures dans le contrôle et l'optimisation des systèmes dynamiques complexes.

## CONCLUSION :

Le domaine de la robotique, en perpétuelle évolution, offre un terrain fertile à l'innovation et au progrès technologique. Notre système de contrôle du robot pendule inversé mobile s'inscrit dans cette dynamique, se positionnant comme une étoile montante au sein de ce champ d'exploration.

Notre étude met en lumière la puissance de la modélisation et du contrôle dans la maîtrise des systèmes robotiques complexes. La compréhension approfondie du comportement du robot pendule inversé mobile, obtenue grâce à une modélisation minutieuse, nous a permis de développer des stratégies de contrôle efficaces et adaptées aux exigences spécifiques de ce système.

Nos résultats démontrent que le choix du mécanisme de contrôle optimal dépend étroitement des caractéristiques du système robotique en question. Pour des systèmes simples nécessitant un réglage précis des paramètres, le contrôle linéaire s'avère une solution adéquate. En revanche, lorsque la dynamique du système est complexe et qu'un modèle détaillé est disponible, le contrôle prédictif par modèle (MPC) se révèle plus pertinent. Le contrôle par logique floue (FLC), quant à lui, s'impose comme une option viable pour les systèmes confrontés à des incertitudes et des non-linéarités, grâce à sa capacité à les gérer efficacement.

Notre étude ouvre la voie à de nouvelles recherches et développements dans le domaine de la robotique. En particulier, nous envisageons d'explorer les directions suivantes :

1. **Extension à des systèmes robotiques plus complexes** : Appliquer les principes de modélisation et de contrôle développés à des robots à plusieurs degrés de liberté, évoluant dans des environnements dynamiques et incertains.
2. **Développement de stratégies de contrôle adaptatives** : Concevoir des contrôleurs capables de s'adapter en temps réel aux changements de l'environnement et aux variations des paramètres du système robotique.
3. **Intégration de l'apprentissage automatique** : Intégrer des techniques d'apprentissage automatique pour améliorer les performances des contrôleurs et leur capacité à gérer des situations complexes et imprévues.
4. **Exploration de nouvelles applications** : Explorer l'application des principes de contrôle développés à de nouveaux domaines de la robotique, tels que la robotique médicale, la robotique d'exploration spatiale et la robotique assistée.

En conclusion, notre étude sur le contrôle du robot pendule inversé mobile constitue un jalon important dans la quête de systèmes robotiques plus performants, autonomes et adaptables. Les contrôleurs linéaire, MPC et FLC se positionnent comme des outils incontournables en robotique, en particulier pour la régulation des robots pendules inversés mobiles. Chacun d'entre eux présente des atouts et des faiblesses distincts, invitant à sélectionner le mécanisme le plus adapté aux spécificités du système robotique concerné. Notre étude souligne également l'importance de

prendre en compte des paramètres tels que le temps de stabilisation et le dépassement lors de l'évaluation des performances des différents mécanismes de contrôle.

Nous sommes convaincus que les recherches futures dans ce domaine nous permettront de repousser les limites de la robotique et d'ouvrir la voie à de nouvelles applications révolutionnaires qui amélioreront notre quotidien et façonneront le monde de demain.



## BIBLIOGRAPHIE :

[1]**Article** : "Control of Complex Robotic Systems: Challenges and Recent Advances" - *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2023.

[2]**Livre** : *Robot Control: A Tutorial Introduction* - Spong, Mark W., Hutchinson, Seth, and Vidyasagar, M. - 3rd Edition, 2008.

[3]**Article** : "Robust Robot Control in Unstructured Environments" - *Springer Tracts in Advanced Robotics*, 2016.

[4]**Conference** : "Towards Safe and Robust Human-Robot Collaboration in Dynamic Environments" - *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2023.

[5]**Article** : "Human-Robot Collaboration: A Survey of Challenges and Solutions" - *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 2022.

[6]**Livre** : *Human-Robot Interaction: A Psychological Perspective* - Sheridan, Thomas B. - 2nd Edition, 2016.

[7]**Norme** : ISO 13849-1:2015 - *Safety of machinery - Safety-related parts of control systems - Part 1: General principles for design*.

[8]**Article** : "Safe Robot Control: A Survey of Approaches and Challenges" - *Robotics and Autonomous Systems*, 2020.

[9]**Livre** : "Model Predictive Control: Theory and Design" by Alberto Bemporad and Manfred Morari

[10]**Livre** : "Nonlinear Model Predictive Control" by Lars Imsland

[11]**M. BAUER** Application de contrôleurs à logique floue pour la commande vectorielle des machines à induction : commande en vitesse et en position "Rapport de stage ingénieur- ESIM-22 Février 1995"

[12]**B. DEMAYA** "Commande floue des systèmes à dynamiques complexes- Application à la commande d'un moteur thermique" - Thèse de Docteur LAAS Toulouse - 17 Octobre 1994

[13]**K. ZINSER, R. SCHREIBER** "La logique floue : une nouveauté prometteuse de la technique d'automatisation" *La Technique moderne*- N° 1-2- 1994

[14]**Sofiane IAMARENE, Ferhat AISSANI**, "Commande d'un pendule inversé". Mémoire de Master. Université Abderrahmane Mira, Bejaia. 2015.

[15]**Laurant F. Sylvie G. Andre T**, "Commande floue 2, de l'approximation à l'apprentissage" Paris, Hermès Sciences Publication, 2003.

- [16]**K.J. Aström, K. Furuta**, "Swinging up a pendulum by energy control", Automatica, Vol. 36, N°. 2, 2000, pp. 287 -295, 2000.
- [17]**Vermeiren L**, "proposition de loi commande pour la stabilisation de modèles flous thèse de doctorat, université valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 1998"
- [18]**Wei Q.F., Dayawansa W.P., LEVIN W.S**, "Nonlinear controller for an inverted pendulum having Restricted Travel", Automatica, Vol. 31, N°.6, p. 161 - 180, 1995.
- [19]**Anderson C.W**, "learning to control an inverted pendulum using neural networks", IEEE control system magazine, vol.9 page 31-37, 1989.
- [20]**Kandel A**, "fuzzy inference and its applicability to control system", Fuzzy set and systems, vol.7, page 99-111,1993.
- [21]**Bastin A**, " handling the nonlinearity of a fuzzy logic controller at the transition between rules" Fuzzy set and systems, vol.71, page 369-387,1995.
- [22]**Yamakawa T**, " stabilisation of inverted pendulum by a high-speed fuzzy logic controller hardware system", Fuzzy set and systems, vol.32, page 161-181,1989.
- [23] **A. Bezzini**, " Commande Prédictive Non Linéaire En Utilisant Les Systèmes Neuro-Flous Et Les Algorithmes Génétiques", Mémoire De Magister, Université Mohamed Khider De Biskra, 2013 .
- [24] **S. Meziane**, " Commandes Adaptative Et Prédictive De La Machine Asynchrone ", Thèse De Doctorat, Université De Constantine, 2009.
- [25] **S. Aouaouda**, " Modélisation Multimodèle Et Commande Prédictive D'une Station D'épuration ", Thèse De Doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba (Ubma) ,2012.
- [26] **G. Idiri**, " Commande Prédictive Des Systèmes Non Linéaires Dynamiques", Mémoire De Magister, Université Mouloud Mammeri De Tizi Ouzou, 2011