

Ministère de l'Enseignement  
Supérieur Et de la Recherche Scientifique

\*\*\*\*\*

Université de Carthage

\*\*\*\*\*

**Institut National des Sciences  
Appliquées et de Technologie**



# **Conception Assistée par Ordinateur Fascicule de TP : Travaux Personnalisés**

**4<sup>ème</sup> Année Informatique Industrielle et Automatique**

par

**Haifa Mehdi & Olfa Boubaker**

Edition 2020-2021©

## Table des matières

Syllabus du Module CAO.....	2
Objectif du module /Acquis d'apprentissage attendus.....	2
Plan du cours.....	3
Objectifs des travaux personnalisés.....	3
Projets proposés.....	4
Projet 1. Inverted Pendulum on a Car.....	5
Projet 2. Inertia Wheel Pendulum.....	7
Projet 3. TORA system.....	10
Projet 4. Ball and Beam system.....	12
Projet 5. Quarter car suspension system.....	14
Projet 6. Two-Tank liquid level system.....	16
Projet 7. Three-Tank liquid level system.....	18
Projet 8. Double Inverted Pendulum on a Cart system.....	21
Projet 9. Wheeled Inverted Pendulum.....	24
Projet 10. VTOL system.....	27

## Syllabus du Module CAO

<b>Année Universitaire</b>		<b>Semestre</b>
<b>2021/2022</b>		<b>2<sup>ème</sup></b>

<b>Module</b>		<b>Filière</b>
<b>CAO (Préparation à une certification)</b>		<b>IIA4</b>

Volume Horaire Semestriel			
<b>Cours</b>	<b>TD</b>	<b>TP</b>	<b>Travaux Personnalisés</b>
<b>15</b>	<b>7.5</b>	<b>24</b>	<b>30</b>

<b>Modalités Pédagogiques</b>	<b>Évaluation des connaissances</b>
<input type="checkbox"/> Cours <input checked="" type="checkbox"/> CI <input type="checkbox"/> TD <input checked="" type="checkbox"/> TP	<input checked="" type="checkbox"/> Examen <input checked="" type="checkbox"/> DS. <input checked="" type="checkbox"/> Ex.TP <input checked="" type="checkbox"/> <b>Projet</b>

### Objectif du module /Acquis d'apprentissage attendus :

L'objectif principal de ce module est la préparation de l'étudiant à la certification « Certified LabVIEW Associate Developer » (CLAD) qui constitue le premier échelon à gravir dans la pyramide de certification LabVIEW. Il s'agit aussi de lui permettre de développer sa capacité à manipuler les principales fonctions du logiciel, d'apprendre à gérer la communication avec une interface graphique et de concevoir des instruments virtuels complexes. Néanmoins, l'objectif ultime de ce cours reste d'inciter l'étudiant à réaliser et à présenter, devant une audience, un projet complet dans son domaine d'expertise incluant une partie software et une partie hardware et impliquant un protocole de communication entre une interface graphique et un certain nombre de périphériques.

## Plan du cours

Le plan du cours est conforme aux références de certification [1, 2]. Les travaux pratiques sont fournis selon la référence [3]. Les travaux dirigés sont fournis selon la référence [4].

Le présent manuel présente les travaux pratiques sous forme de travaux personnalisés. L'étudiant est invité ainsi à choisir un système parmi les **10 Benchmarks** fournis dans la section projets proposés.

## Objectifs des travaux personnalisés :

L'objectif des travaux pratiques sous formes de travaux personnalisés est d'inciter l'étudiant à réaliser un projet complet dans son domaine d'expertise incluant une partie software et une partie hardware et impliquant un protocole de communication. A la fin du projet, l'étudiant doit être capable de poser clairement et résoudre une problématique d'ingénierie dans son domaine d'expertise en utilisant une démarche scientifique rigoureuse. Le projet doit d'une part nécessiter l'utilisation de plusieurs logiciels de conception assistée par ordinateur (LabVIEW, Solidworks, Proteus, Matlab...). D'autre part, l'étudiant doit fournir une maquette réelle ou virtuelle qui répond à sa problématique en justifiant le choix et le dimensionnement de tous les composants. un rapport synthétique d'une dizaine de page est remis à la fin du projet. Une présentation orale doit clôturer le projet. L'étudiant est très encouragé à utiliser la langue anglaise pour la rédaction de son rapport et la présentation de son projet devant une audience. La philosophie de cette démarche pédagogique est clairement expliquée dans la référence [5].

## Références

- [1] LabVIEW Basics, I. (2003), Development course manual, National Instruments Corporation, Austin, Texas.
- [2] LabVIEW Basics II. (2003), Development course manual, National Instruments Corporation, Austin, Texas.
- [3] Amira Aloulou & Olfa Boubaker, Conception assistée par Ordinateur : Préparation à une certification LabVIEW, Fascicule de travaux pratiques, Institut National des Sciences Appliquées et de Technologie, 2012.
- [4] Abir Lassoued & Olfa Boubaker, Conception assistée par Ordinateur : Préparation à une certification LabVIEW, Fascicule de travaux dirigés, Institut National des Sciences Appliquées et de Technologie, 2019.
- [5] Olfa Boubaker, National Instruments® LabVIEW (TM): Ultimate Software for Engineering Education. In Proceedings of the International Conference on Frontiers in Education: Computer Science and Computer Engineering (FECS). The Steering Committee of The World Congress in Computer Science, Computer Engineering and Applied Computing (WorldComp), Las Vegas, Nevada, USA, 18-21 Juillet, 2011.

## **Projets Proposés**

## Projet 1. Inverted Pendulum on a Car

### A- Description du benchmark

Le système considéré est un pendule simple monté sur un chariot roulant sur une piste sans frottement (Figure A1). Le mouvement du chariot doit maintenir le pendule dans sa position d'équilibre instable. [1,2]

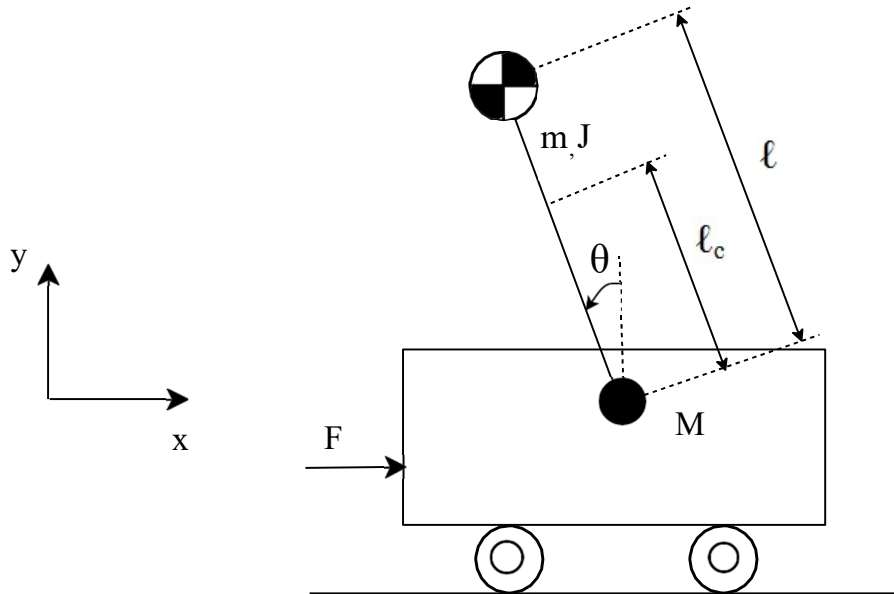


Figure A1. Inverted Pendulum on a Car

Les paramètres du système ainsi que ses variables sont cités dans le Tableau A1.

Tableau A1. Paramètres et variables du système

Notation	Designation	unité
$M$	Masse du chariot	Kg
$m$	Masse du pendule	Kg
$l$	Longueur du pendule	m
$l_c$	$l / 2$	m
$J$	Moment d'inertie angulaire du pendule	Kg.m <sup>2</sup>
$F$	Force d'extraction	N
$\theta$	Position angulaire du pendule	rad
$\dot{\theta}$	Vitesse angulaire du pendule	rad.s <sup>-1</sup>
$\ddot{\theta}$	Accélération angulaire	rad.s <sup>-2</sup>
$x$	Position du chariot	m
$\dot{x}$	Vitesse du chariot	m.s <sup>-1</sup>
$\ddot{x}$	Accélération du chariot	m.s <sup>-2</sup>
$J$	Moment d'inertie du pendule	Kg.m <sup>2</sup>

## B- Travail demandé

1. Expliquez les **motivations** et l'intérêt porté à un tel benchmark dans l'industrie ou dans le domaine de l'ingénierie en général.
2. En utilisant la méthode de Lagrange, montrer que la dynamique du système est représentée par le modèle mathématique suivant :

$$\begin{bmatrix} ml \cos \theta & (ml^2 + J) \\ m + M & ml \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} mgl \sin \theta \\ ml \dot{\theta}^2 \sin \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} F$$

3. Etablir, suite à une linéarisation du système autour de sa position d'équilibre, le modèle d'état du système.
4. Présenter la méthodologie de dimensionnement du matériel pour la mise en place d'une maquette du benchmark.
5. Réaliser le benchmark sur une maquette réelle en utilisant des composants non couteux et disponibles.
6. Concevoir :
  - Une interface **LaBVIEW** pour piloter la maquette.
  - La carte électronique nécessaire sous **Proteus** pour établir une communication entre la maquette et le logiciel **LabVIEW** qui vous permet de résoudre la problématique posée.
7. Proposer une commande PID pour ce système afin :
  - de stabiliser le pendule dans sa position haute ;
  - d'atteindre la position désirée du chariot.
8. Affiner les paramètres du régulateur afin d'améliorer la dynamique du système.
9. Tester le comportement du robot en simulation et présenter les résultats obtenus sous forme de courbes réalisées sous **LabVIEW**
10. Implémenter la commande en temps réel sur le robot. Tester.
11. Analyser les résultats expérimentaux obtenus.
12. Conclure et définir une liste de perspectives.

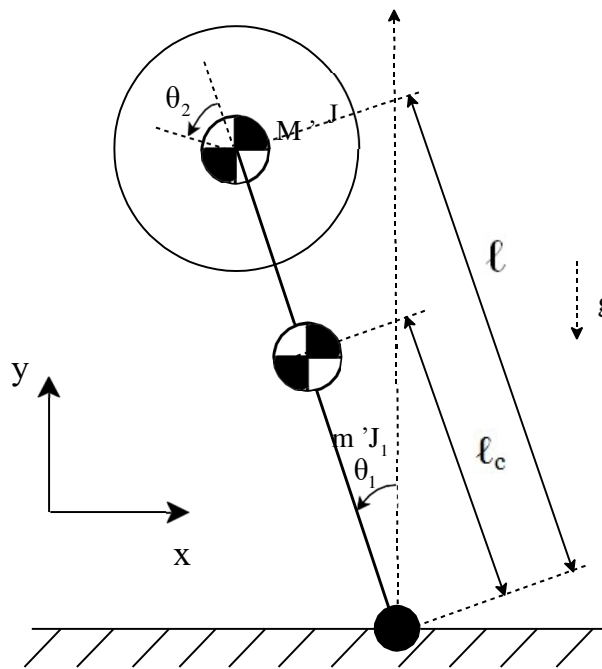
## Références

- [1]M. Kuczmam, "Comprehensive Survey of PID Controller Design for the Inverted Pendulum", Acta Technica Jaurinensis, 2019 vol. 12(1), pp. 55-81.
- [2]Lijuan Zhang and Yaqing Tu, "Research of Car Inverted Pendulum Model Based on Lagrange Equation," 2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2006, pp. 820-824.

## Projet 2. Inertia Wheel Pendulum

### A- Description du benchmark

Le système « Inertia Wheel Pendulum » est représenté sur la figure A2. Il s'agit d'un système planaire sous-actionné à 2 DDL composé d'un pendule inversé avec une roue tournante à l'extrémité. [1,2]



**Figure A2. Inertia Wheel Pendulum**

Les paramètres du système ainsi que ces variables sont cités dans le Tableau A2.

**Tableau A2. Paramètres et variables du système**

Paramètre	Description	unité
$l$	Longueur du pendule	m
$l_c$	Position du centre de masse du pendule	m
$m$	Masse du pendule	Kg
$M$	Masse de la roue	Kg
$J_1$	Moment d'inertie du pendule	Kg.m <sup>2</sup>
$J_2$	Moment d'inertie de la roue	Kg.m <sup>2</sup>
$g$	Coefficient de gravitation	m.s <sup>-2</sup>
$\theta_1$	Position angulaire du pendule	rad
$\dot{\theta}_1$	Vitesse angulaire du pendule	rad.s <sup>-1</sup>



$\ddot{\theta}_1$	Accélération angulaire	rad.s <sup>-2</sup>
$\theta_2$	Position angulaire de la roue	rad
$\dot{\theta}_2$	Vitesse angulaire de la roue	rad.s <sup>-1</sup>
$\ddot{\theta}_2$	Accélération angulaire de la roue	rad.s <sup>-2</sup>
u	Couple moteur	Nm

## B- Travail demandé

1. Expliquez **les motivations** et l'intérêt porté à un tel benchmark dans l'industrie ou dans le domaine de l'ingénierie en général.
2. Montrer que le modèle dynamique du système est représenté par le modèle de Lagrange suivant :

$$\begin{bmatrix} m l_c^2 + M l^2 + J_1 + J_2 & J_2 \\ J_2 & J_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (m l_c + M l) g \sin(\theta_1) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u$$

3. Identifier les paramètres du processus à partir de mesures réelles ;
4. Proposer une :
  - Commande du système par **un régulateur LQR**.
  - Commande du système par **un régulateur PID**.
 afin de:
  - conserver la stabilité locale du système autour de sa position d'équilibre
  - contrôler le balancement du pendule de sa position de repos vers la position verticale (Swing up Control).
5. Présenter la méthodologie du dimensionnement du matériel pour la mise en place d'une maquette du benchmark.
6. Réaliser le benchmark soit :
  - sur une **maquette réelle** en utilisant des composants non coûteux et disponibles ;
  - par une **maquette virtuelle** sous *Solidworks* ou *LabVIEW*.
7. Concevoir :
  - Une interface **LaBVIEW** pour piloter la maquette.

- La carte électronique nécessaire sous **Proteus** pour établir une communication entre la maquette et le logiciel **LabVIEW** qui vous permet de résoudre la problématique posée.
8. Présenter les résultats obtenus sous forme de courbes réalisées sous **LabVIEW**.
  9. Analyser les résultats expérimentaux obtenus.
  10. Conclure et définir une liste de perspectives.

## Références

- [1] C. A. Merlo-Zapata *et al.*, "Modeling and Construction of an Inertia Wheel Pendulum Test-Bed," *2014 International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering*, 2014, pp. 116-121, doi: 10.1109/ICMEAE.2014.24.
- [2] SANTIBANEZ, Victor, KELLY, Rafael, et SANDOVAL, Jesus. Control of the inertia wheel pendulum by bounded torques. In: *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control*. IEEE, 2005. p. 8266-8270.

### Projet 3. TORA system

#### A- Description du benchmark

Le système TORA représenté sur la figure A3, est un système mécanique sous-actionné, composé d'un oscillateur translationnel non actionné (on peut avoir deux oscillateurs) et d'un pendule actionné [1,2].

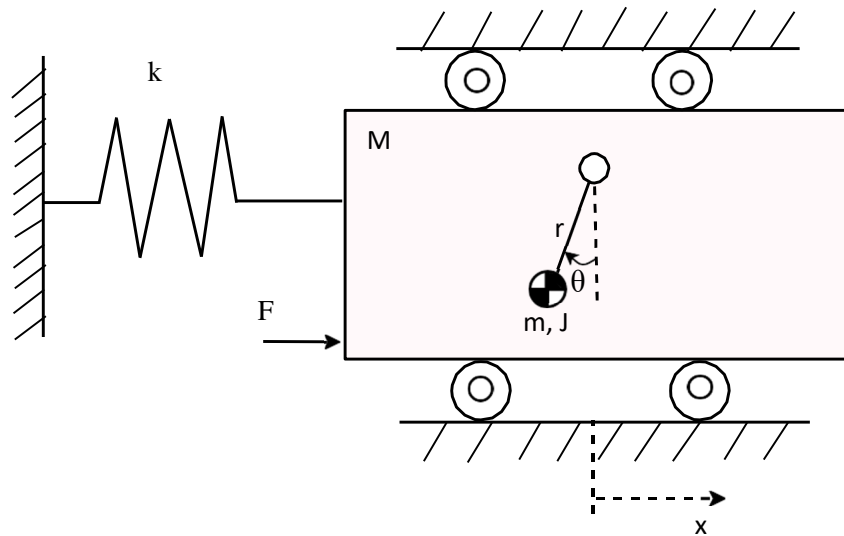


Figure A3. TORA

Les paramètres du système ainsi que ses variables sont cités dans le Tableau A3.

Tableau A3. Paramètres et variables du système

Paramètre	Description	unité
$r$	Rayon de rotation	m
$m$	Masse du pendule	Kg
$M$	Masse du chariot	Kg
$J$	Moment d'inertie du pendule	$\text{Kg.m}^2$
$g$	Force de gravitation	$\text{m.s}^{-2}$
$\theta$	Position angulaire du pendule	rad
$\dot{\theta}$	Vitesse angulaire du pendule	$\text{rad.s}^{-1}$
$\ddot{\theta}$	Accélération angulaire du pendule	$\text{rad.s}^{-2}$
$x$	Position du chariot	m
$\dot{x}$	Vitesse du chariot	$\text{m.s}^{-1}$
$\ddot{x}$	Accélération du chariot	$\text{m.s}^{-2}$
$u$	Couple moteur	Nm
$F$	Force de perturbation appliqué au chariot en mouvement	N
$k$	Raideur du ressort	$\text{Nm}^{-1}$

## B- Travail demandé

1. Expliquer les motivations et l'intérêt porté à un tel benchmark dans l'industrie ou dans le domaine de l'ingénierie en général.
2. Montrer que le modèle dynamique du système est représentée par le modèle de Lagrange suivant :

$$\begin{bmatrix} M + m & m r \cos(\theta) \\ m r \cos(\theta) & m r^2 + J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} m r \sin(\theta) \dot{\theta}^2 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k x \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -F \\ u \end{bmatrix}$$

3. Définir une problématique claire à résoudre parmi les suivantes :
  - Identification des paramètres du processus à partir de mesures réelles ;
  - Mise en évidence de **signatures non-linéaires** (non-vérification du principe de superposition, apparition de sous-harmonique, apparition de cycles limites, présence de plusieurs points d'équilibre...).
4. Présenter la méthodologie du dimensionnement du matériel pour la mise en place d'une maquette du benchmark.
5. Réaliser le benchmark soit :
  - sur une **maquette réelle** en utilisant des composants non couteux et disponibles ;
  - par une **maquette virtuelle** sous *Solidworks* ou *LabVIEW*.
6. Concevoir :
  - Une interface *LaBVIEW* pour piloter la maquette.
  - La carte électronique nécessaire sous *Proteus* pour établir une communication entre la maquette et le logiciel *LabVIEW* qui vous permet de résoudre la problématique posée.
7. Présenter les résultats obtenus sous forme de courbes réalisées sous *LabVIEW*.
8. Analyser les résultats expérimentaux obtenus.
9. Conclure et définir une liste de perspectives.

## Références

- [1] Liu Diantong, Guo Weiping Nonlinear backstepping design for the underactuated TORA system. Journal of Vibroengineering, Vol. 16, Issue 2, 2014, p. 552-559.
- [2] B. Gao, X. Zhang, H. Chen and J. Zhao, "Energy-based control design of an underactuated 2-dimensional TORA system," 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2009, pp. 1296-1301, doi: 10.1109/IROS.2009.5353948.

## Projet 4. Ball and Beam System

### A- Description du benchmark

Le système Ball & Beam, représenté par la figure A4, est composé d'une longue barre motorisée qui peut s'incliner sur laquelle une bille roule d'un sens ou de l'autre.

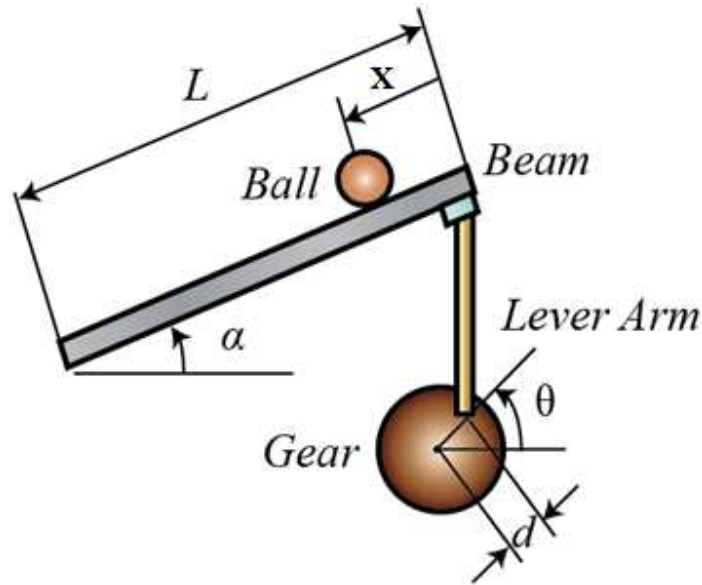


Figure A4. Ball and Beam

Les paramètres du système ainsi que ses variables sont cités dans le tableau A4.

Tableau A4. Paramètres et variables du système

Paramètre	Description	unité
$\alpha$	Position angulaire de la barre	rad
$\dot{\alpha}$	Vitesse angulaire de la barre	rad.s <sup>-1</sup>
$\ddot{\alpha}$	Accélération angulaire de la barre	rad.s <sup>-2</sup>
$M$	Masse de la barre	Kg
$J$	Moment d'inertie de la barre	Kg.m <sup>2</sup>
$r$	Rayon de la bille	m
$m$	Masse de la bille	Kg
$J_b$	Moment d'inertie de la bille	Kg.m <sup>2</sup>
$d$	Distance entre le centre de l'engrenage et le bras de levier	m
$x$	Position de la bille	m
$\dot{x}$	Vitesse de la bille	m.s <sup>-1</sup>
$\ddot{x}$	Accélération de la bille	m.s <sup>-2</sup>
$\theta$	Angle de rotation de l'engrenage	rad
$\tau$	Couple appliqué à la barre	Nm

## B- Travail demandé

1. Présenter le système Ball & Beam et montrer les avantages de l'utilisation un tel benchmark.
2. Montrer que le modèle dynamique du système est représenté par :

$$(m\alpha^2 + J + J_b)\ddot{\alpha} + 2m\dot{x}\dot{\alpha} + \left(\frac{1}{2}M + m\dot{x}\right)g\cos(\alpha) = \tau$$
$$\left(\frac{J_b}{r^2} + m\right)\ddot{x} + mg\sin(\alpha) - m\dot{x}\dot{\alpha}^2 = 0$$

en se basant sur :

- a. la méthode de Lagrange
  - b. la mécanique newtonienne
3. Donner une représentation d'état du système non linéaire puis linéaire.
  4. Choisir une commande pour le modèle trouver.
  5. Réaliser le benchmark sur une maquette réelle et/ou virtuelle.
  6. Concevoir :
    - Une interface **LaBVIEW** pour piloter la maquette.
    - La carte électronique nécessaire sous **Proteus** pour établir une communication entre la maquette et le logiciel **LabVIEW** qui vous permet de résoudre la problématique posée.
  7. Donner la réponse en boucle ouverte de système ball & beam
  8. Présenter les résultats de système commandé : couple, position et vitesse de la bille
  9. Comparer les résultats Réel/Simulé
  10. Faire une étude des effets de linéarisation, d'hypothèses et d'erreurs de modèles

## Références

- [1] Mohammad Keshmiri, Ali Fellah Jahromi, Abolfazl Mohebbi, Mohammad Hadi Amoozgar, Wen-Fang Xie, "Modeling and control of ball and beam system using model based and non-model based control approaches", *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems* 5(1):14, 2012, pp.14-35, DOI: 10.21307/ijssis-2017-468
- [2] Wen Yu and F. Ortiz, "Stability analysis of PD regulation for ball and beam system," *Proceedings of 2005 IEEE Conference on Control Applications, 2005. CCA 2005.*, 2005, pp. 517-522, DOI: 10.1109/CCA.2005.1507178.

## Projet 5. Quarter Car Suspension System

### A- Description du benchmark

Le système Quarter Car (Figure A5) est un système à deux degrés de liberté, où il y a deux corps : masse suspendue (voiture) et non suspendue (suspension, roue, pneu).

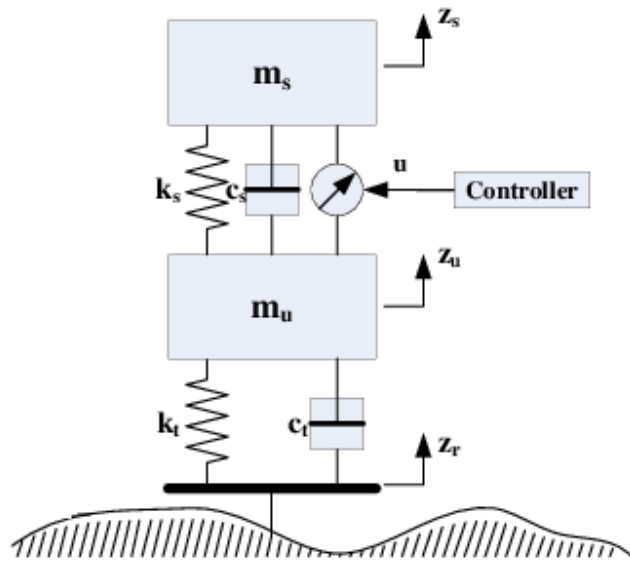


Figure A5. Quarter Car Suspension System

Les paramètres du système ainsi que Ses variables sont cités dans le tableau A5.

Tableau A5. Paramètres et variables du système

Paramètre	Description	unité
$m_s$	Masse de corps suspendu (châssis de voiture)	Kg
$m_u$	Masse de corps non suspendu (roue)	Kg
$K_s$	Raideur du système suspendu	$\text{Nm}^{-1}$
$K_t$	Raideur du système non suspendu	$\text{Nm}^{-1}$
$C_s$	Coefficient d'amortissement du système suspendu	-
$C_t$	Coefficient d'amortissement du système non suspendu	-
$z_s$	Déplacement de la voiture	m
$z_u$	Déplacement de la roue	m
$z_r$	Profil de la route	m
$u$	Force de contrôle	N

## B- Travail demandé

1. Qu'elle est l'intérêt de l'utilisation du système de suspension dans l'industrie automobile.
2. En se basant sur les lois de Newton, montrer que le modèle du système de suspension active peut être décrit par les équations suivantes :

$$m_s \ddot{Z}_s + K_s (Z_s - Z_u) + C_s (\dot{Z}_s - \dot{Z}_u) = u$$

$$m_u \ddot{Z}_u + K_t (Z_u - Z_r) + C_t (\dot{Z}_u - \dot{Z}_r) - K_s (Z_s - Z_u) - C_s (\dot{Z}_s - \dot{Z}_u) = -u$$

3. Réaliser le benchmark sur une maquette réelle et/ou virtuelle.
4. Concevoir :
  - Une interface **LaBVIEW** pour piloter la maquette.
  - La carte électronique nécessaire sous **Proteus** pour établir une communication entre la maquette et le logiciel **LabVIEW** qui vous permet de résoudre la problématique posée.
5. Acquérir de mesures en boucle ouverte
6. Vérifier que la non linéarité du modèle mathématique permet de vérifier que :
  - Le principe de superposition ne s'applique pas ;
  - L'Apparition des sous-harmoniques.
7. Présenter la réponse  $Z_s$  en boucle ouverte (suspension passive) suite à :
  - une variation de signal d'entrée ( $Z_r$ ) ;
  - une variation des masses .
8. Présenter la réponse (déplacement et vitesse) du corps suspendu dans le cas d'une suspension active ;
9. Analyser les résultats expérimentaux obtenus, conclure et définir une liste de perspectives.

## Références

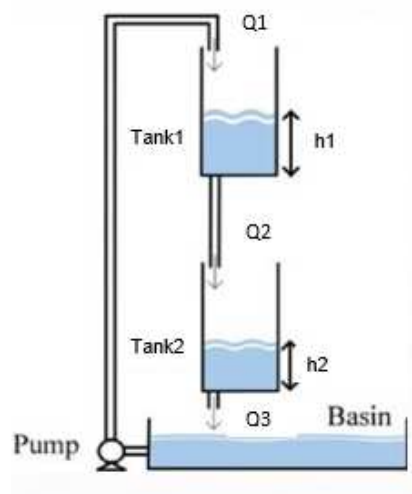
- [1] Ervin Alvarez-Sánchez "A Quarter-Car Suspension System: Car Body Mass Estimator and Sliding Mode Control", *Procedia Technology* 7 ( 2013 ), pp.208 – 214
- [2] Fateh, M.M., Alavi, S.S. "Impedance control of an active suspension system", *Mechatronics* 2009; 19, pp.134-140



## Projet 6. Two-Tank Liquid Level System

### A- Description du benchmark

Le système à deux réservoirs "Two-Tank Liquid Level system" représenté par la Figure A6 se compose de deux réservoirs avec des orifices et des capteurs de niveau de liquide au fond de chaque réservoir, une pompe et un bassin de liquide. Les deux réservoirs sont équipés d'orifices d'évacuation de diamètres différents.



**Figure A6. Two-Tank Liquid Level System**

Les paramètres du système ainsi que ses variables sont cités dans le tableau A6.

**Tableau A6. Paramètres et variables du système**

Paramètre	Description	unité
$Q$	Débit de l'eau	$\text{m}^3/\text{s}$
$Q_{in}$	Débit de l'eau entrant au réservoir	$\text{m}^3/\text{s}$
$Q_{out}$	Débit de l'eau sortant du réservoir	$\text{m}^3/\text{s}$
$V_p$	Voltage du moteur	V
$S$	Section du réservoir	$\text{m}^2$
$a$	Section de l'orifice	$\text{m}^2$
$v$	Vitesse de l'écoulement	$\text{m/s}$
$h$	Hauteur de l'eau dans le réservoir	m
$k_p$	Constante relative à la tension de commande	

## B- Travail demandé

1. Présenter les motivations portées à un tel benchmark dans l'industrie.
2. Montrer que le modèle du système peut être décrit par les équations suivantes :

$$\text{Réservoir 1 : } \dot{h}_1 = -\frac{a_1}{S_1} \sqrt{2 g h_1(t)} + \frac{k_p}{S_1} V_p(t)$$

$$\text{Réservoir 2 : } \dot{h}_2 = \frac{a_1}{S_2} \sqrt{2 g h_1(t)} - \frac{a_2}{S_2} \sqrt{2 g h_2(t)}$$

3. Expliquer physiquement les non-linéarités de ce système.
4. Réaliser le benchmark sur une maquette réelle et/ou virtuelle tout en présentant la méthodologie du dimensionnement du matériel.
5. Concevoir :
  - Une interface *LaBVIEW* pour piloter la maquette.
  - La carte électronique nécessaire sous *Proteus* pour établir une communication entre la maquette et le logiciel *LabVIEW* qui vous permet de résoudre la problématique posée.
6. Appliquer une commande PID au système et expliquer l'objectif d'une telle commande.
7. Présenter :
  - l'évolution du niveau d'eau dans le 1<sup>er</sup> réservoir
  - l'évolution du niveau d'eau dans le 2<sup>ème</sup> réservoir
8. Analyser les résultats obtenus, conclure et définir une liste de perspectives

## Références

- [1] Mohamed G. Stohy, Hossam S. Abbas, Abou-Hashema M. El-Sayed, Ayat G. Abo El-maged, "Parameter estimation and PI control for a water coupled tank system" Journal of Advanced Engineering Trends (JAET), Vol. 38(2), 2019, pp.147-159. DOI: 10.21608/JAET.2020.73062
- [2] Mostafa.A. Fellani , A.M.G., "PID Controller design for two Tanks liquid level Control System using Matlab". International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEEM), May 2015. 4(5): p. 5-10.

## Projet 7. Three-Tank Liquid Level System

### A- Description du benchmark

Le système à trois réservoirs " Three-Tank Liquid Level System" présenté sur la figure A7 est un système multi-entrées multi-sorties (MIMO) qui exhibe des caractéristiques de couplage assez forts et de non-linéarités complexes.

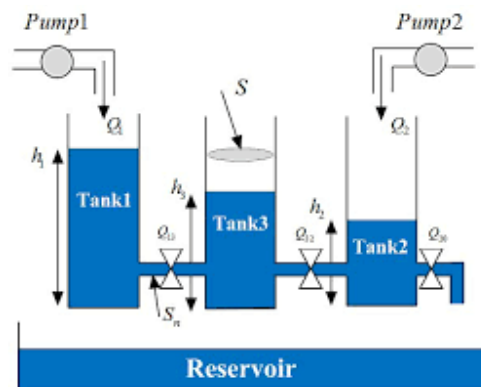


Figure A7. Three-Tank Liquid Level System

Les paramètres du système ainsi que ses variables sont cités dans le tableau A7.

Tableau A7. Paramètres et variables du système

Paramètre	Description	unité
$h_i$	Hauteur de l'eau dans le réservoir $i$ ( $i=1,2,3$ )	m
$Q_j$	Débit de la pompe $j$ vers le réservoir $j$ ( $j = 1, 2$ )	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
$Q_{13}$	Débit du réservoir 1 au réservoir 3	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
$Q_{32}$	Débit du réservoir 3 au réservoir 2	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
$Q_{20}$	Débit du réservoir 2 au Réservoir	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
$S$	Section du réservoir 1, 2, 3	$\text{m}^2$
$S_n$	Section de l'orifice	$\text{m}^2$
$a_i$	Coefficients de débit ( $i=1, 2, 3$ )	-
$g$	Coefficient de gravitation	$\text{m s}^{-2}$

## B- Travail demandé

1. Qu'elle est l'intérêt de l'utilisation de système à trois réservoirs dans l'industrie en général et au niveau de la commande de processus moderne en particulier.
2. En se basant sur les règles de Torricelli, montrer que le modèle du système peut être décrit par les équations suivantes :

$$\text{Réservoir 1 : } \dot{h}_1 = \frac{1}{S} [u_1(t) - Q_{13}(t)]$$

$$\text{Réservoir 2 : } \dot{h}_2 = \frac{1}{S} [u_2(t) - Q_{32}(t) - Q_{20}(t)]$$

$$\text{Réservoir 3 : } \dot{h}_3 = \frac{1}{S} [Q_{13}(t) - Q_{32}(t)]$$

où

$$Q_{13}(t) = a_1 S_n \operatorname{sgn}(h_1(t) - h_3(t)) \sqrt{2g |h_1(t) - h_3(t)|}$$

$$Q_{20}(t) = a_2 S_n \sqrt{2g h_2(t)}$$

$$Q_{32}(t) = a_3 S_n \operatorname{sgn}(h_3(t) - h_2(t)) \sqrt{2g |h_3(t) - h_2(t)|}$$

$$u = [Q_1 \quad Q_2]^T$$

3. Expliquer pourquoi ce système est caractérisé de non-linéarités complexes.
4. Réaliser le benchmark sur une maquette réelle et/ou virtuelle tout en présentant la méthodologie de dimensionnement du matériel.
5. Concevoir :
  - Une interface LaBVIEW pour piloter la maquette.
  - La carte électronique nécessaire sous Proteus pour établir une communication entre la maquette et le logiciel LabVIEW qui vous permet de résoudre la problématique posée.
6. Proposer une commande afin de contrôler les niveaux de liquide des réservoirs 1 et 2 en manipulant les débits des pompes 1 et 2. Affiner les paramètres de votre commande afin d'améliorer vos résultats
7. Présenter les résultats obtenus simulés et réels et les comparer :
  - l'évolution du niveau d'eau dans le 1<sup>er</sup> réservoir ;
  - l'évolution du niveau d'eau dans le 2<sup>ème</sup> réservoir ;
  - l'évolution du niveau d'eau dans le 3<sup>ème</sup> réservoir.
8. Analyser les résultats obtenus, conclure et définir une liste de perspectives

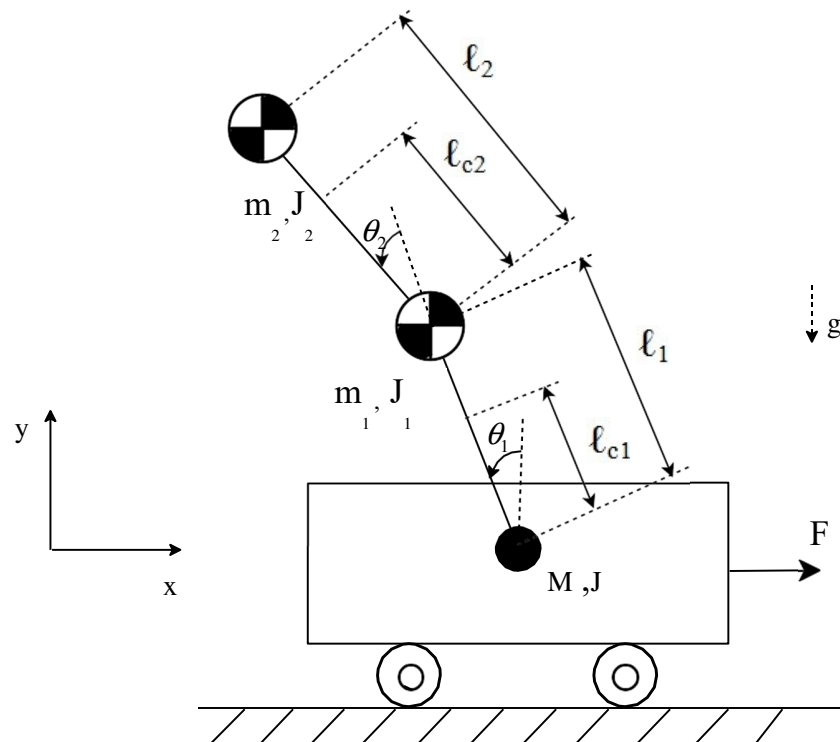
## Références

- [1] Serdar Iplikci, "Runge–Kutta model-based adaptive predictive control mechanism for non-linear processes" Transactions of the Institute of Measurement and Control 35(2) (2013), pp.166-180
- [2] Shuyou Yu, Yu Zhou, Yangyang Feng, Ting Qu, Hong Chen, " Liquid Level Tracking Control of Three-tank Systems" Proceedings of the 37th Chinese Control Conference July 25-27, 2018, Wuhan, China, pp. 3541- 3545

## Projet 8. Double inverted pendulum on a cart

### A- Description du benchmark

Le pendule inversé double sur chariot présenté par la figure A8 est un système non linéaire sous-actionné. Le système est composé d'un chariot et de deux pendules au centre qui oscillent librement autour de ses axes de la position d'équilibre instable vers la position d'équilibre stable.



**Figure A8. The double inverted pendulum on a cart System**

Les paramètres du système ainsi que ses variables sont décrits sur le Tableau A8.

**Tableau A8. Paramètres et variables du système**

Notation	Designation	unité
$M$	Masse du chariot	Kg
$J$	Moment d'inertie du chariot	$\text{Kg.m}^2$
$m_i$	Masse du pendule $i$ ( $i=1,2$ )	Kg
$l_i$	Longueur du pendule $i$ ( $i=1,2$ )	m
$l_{ci}$	$l_i / 2$	m
$J_i$	Moment d'inertie angulaire du pendule $i$ ( $i=1,2$ )	$\text{Kg.m}^2$
$F$	Force d'extraction	N

$\theta_i$	Position angulaire du pendule i (i=1,2)	rad
$\dot{\theta}_i$	Vitesse angulaire du pendule i (i=1,2)	rad.s <sup>-1</sup>
$\ddot{\theta}_i$	Accélération angulaire i (i=1,2)	rad.s <sup>-2</sup>
$x$	Position du chariot	m
$\dot{x}$	Vitesse du chariot	m.s <sup>-1</sup>
$\ddot{x}$	Accélération du chariot	m.s <sup>-2</sup>

## B- Travail demandé

1. Présenter les avantages et les motivations porté à un tel benchmark dans le domaine du contrôle et de la dynamique des systèmes industriels.
2. En se basant sur la méthode de Lagrange, montrer que la dynamique du système est représentée par le modèle mathématique suivant :

$$M(\theta)\ddot{X} = H(\theta, \dot{\theta})\dot{X} + G(\theta) + D F$$

avec

$$X = [x \quad \theta_1 \quad \theta_2]^T$$

$$M(\theta) = \begin{bmatrix} M + m_1 + m_2 & (m_1 l_{c1} + m_2 l_1) \cos(\theta_1) & m_2 l_{c2} \cos(\theta_2) \\ (m_1 l_{c1} + m_2 l_1) \cos(\theta_1) & J_1 + m_1 l_{c1}^2 + m_2 l_1^2 & m_2 l_1 l_{c2} \cos(\theta_1 - \theta_2) \\ m_2 l_{c2} \cos(\theta_2) & m_2 l_1 l_{c2} \cos(\theta_1 - \theta_2) & J_2 + m_2 l_{c2}^2 \end{bmatrix}$$

$$H(\theta, \dot{\theta}) = \begin{bmatrix} 0 & (m_1 l_{c1} + m_2 l_1) \sin(\theta_1) \dot{\theta}_1 & m_2 l_{c2} \sin(\theta_2) \dot{\theta}_2 \\ 0 & 0 & -m_2 l_1 l_{c2} \sin(\theta_1 - \theta_2) \dot{\theta}_2 \\ 0 & m_2 l_1 l_{c2} \sin(\theta_1 - \theta_2) \dot{\theta}_1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$G(\theta) = \begin{bmatrix} 0 \\ (m_1 l_{c1} + m_2 l_1) g \sin(\theta_1) \\ m_2 l_{c2} g \sin(\theta_2) \end{bmatrix}$$

$$D = [1 \quad 0 \quad 0]^T$$

3. Montrer expérimentalement que ce système est non linéaire (non-vérification du principe de superposition, apparition de sous-harmonique, apparition de cycles limites, présence de plusieurs points d'équilibre...).
4. Proposer une commande pour ce système, après linéarisation, afin de:
  - Amener le système (deux pendules) de la position d'équilibre (basse) vers la position instable (haute);
  - Stabiliser le système dans la position haute.

5. Présenter la méthodologie du dimensionnement du matériel et réaliser le benchmark soit :
  - sur une **maquette réelle** en utilisant des composants non couteux et disponibles ;
  - par une **maquette virtuelle** sous *Solidworks* ou *LabVIEW*.
6. Concevoir et présenter :
  - Une interface *LaBVIEW* pour piloter la maquette.
  - La carte électronique nécessaire sous *Proteus* pour établir une communication entre la maquette et le logiciel *LabVIEW* qui vous permet de résoudre la problématique posée.
7. Présenter les résultats de simulation réalisées sous *LabVIEW* (position et vitesse de système, positions et vitesses angulaires des pendules...)
8. Analyser les résultats expérimentaux obtenus et les comparer aux résultats de simulation.
9. Conclure et définir une liste de perspectives.

## Références

- [1] Kavirayani Srikanth, G V Nagesh Kumar "Stabilization at upright equilibrium position of a double inverted pendulum with unconstrained BAT optimization", International Journal on Computational Science & Applications (IJCSA) Vol.5(5), 2015, DOI:10.5121/ijcsa.2015.5508 87
- [2] Zdenek Neusser, Michael Valasek "Control of the double inverted pendulum on a cart using the natural motion" *Acta Polytechnica* 53(6):883–889, 2013



## Projet 9. Wheeled inverted pendulum

### A- Description du benchmark

Le système présenté par la figure A9 se compose de deux roues, d'un châssis, de moteurs à courant continu, d'un pendule inversé et d'une unité de commande. Les moteurs seront contrôlés afin de déplacer le système et de stabiliser le pendule inversé [1-3]

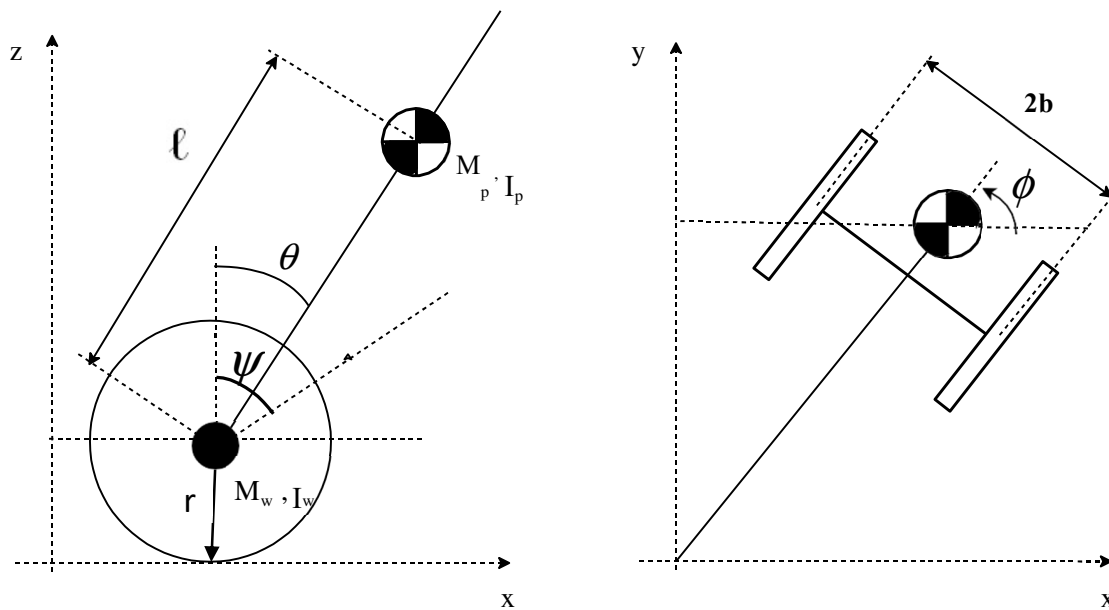


Figure A9. Wheeled inverted pendulum

Les paramètres du système ainsi que ces variables sont cités dans le tableau A9.

Tableau A9. Paramètres et variables du système

Notation	Designation	unité
$M_w$	Masse de la roue	Kg
$I_{wa}$	Moment d'inertie de la roue autour de son axe	Kg.m <sup>2</sup>
$I_{wd}$	Moment d'inertie de la roue autour de l'axe Z	Kg.m <sup>2</sup>
$r$	Rayon de la roue	m
$2b$	Distances latérales entre les deux roues	m
$M_p$	Masse du pendule	Kg
$I_{yyp}$	Moment d'inertie du pendule autour de l'axe Y	Kg.m <sup>2</sup>

$I_{zzp}$	Moment d'inertie du pendule autour de l'axe Z	Kg.m <sup>2</sup>
$l$	Longueur entre la roue et le centre de gravité du pendule	m
$u_r, u_l$	Couple de rotation généré par le moteur gauche et droit	Nm
$\theta$	Angle d'inclinaison du corps	rad
$\psi_r, \psi_l$	Angle de rotation des roues droite et gauche	rad
$\psi$	$\frac{1}{2}(\psi_r + \psi_l)$	rad
$\phi$	Angle de lacet du système	rad

## B- Travail demandé

1. Présenter les motivations et l'intérêt d'un tel benchmark dans l'industrie et expliquer les difficultés de contrôle d'un tel système.
2. En se basant sur les équations Euler-Lagrange, montrer que le modèle dynamique du système peut être représenté par [2] :

$$A_1 \ddot{\psi} + A_2 \cos(\theta) \ddot{\theta} - A_2 \sin(\theta) (\dot{\theta}^2 + \dot{\phi}^2) = u_r + u_l$$

$$A_2 \cos(\theta) \ddot{\psi} + A_3 \ddot{\theta} - A_4 \sin(\theta) \cos(\theta) \dot{\phi}^2 - M_p g l \sin(\theta) = -u_r - u_l$$

$$(A_4 \sin^2(\theta) + A_5) \ddot{\phi} + 2A_4 \sin(\theta) \cos(\theta) \dot{\phi} \dot{\theta} + A_2 \sin(\theta) \dot{\phi} \ddot{\psi} = \frac{b}{r} (u_r - u_l)$$

avec:

$$A_1 = ((M_p + 2M_w)R^2 + 2J_{wa})$$

$$A_2 = M_p l R$$

$$A_3 = (M_p l^2 + I_{yyp})$$

$$A_4 = (I_{zzp} + M_p l^2)$$

$$A_5 = 2I_{wd} + \frac{2b^2}{R^2} (I_{wa} + M_w R^2)$$

Pour développer ce modèle, on suppose que :

- Les deux roues ont le même rayon et la même masse.
- Les roues ne sont pas déformables.
- Les roues roulent sur le sol sans glisser.
- Le sol est une surface avec une certaine pente.

3. Déduire le modèle linéaire de votre système à partir du modèle trouver (Q2)
4. Proposer une commande PID et/ou LQR afin de contrôler  $\theta, \phi, \psi$
5. Présenter la méthodologie du dimensionnement du matériel pour la mise en place d'une maquette du benchmark puis le réaliser sur une maquette réelle ou virtuelle (sous Solidworks ou LabVIEW).
6. Concevoir :
  - Une interface **LaBVIEW** pour piloter la maquette.
  - La carte électronique nécessaire sous **Proteus** pour établir une communication entre la maquette et le logiciel **LabVIEW** qui vous permet de résoudre la problématique posée.
7. Présenter les résultats de simulation pour obtenir la caractéristique souhaitée:
  - Position angulaire  $\theta, \phi, \psi$
  - signal de commande
  - ...

## Références

- [1] Hazem I. Ali, Zain AlAbdeen M. Shareef, "Robust Controller Design for Two Wheeled Inverted Pendulum System", Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences (NJES) Vol.20 No.3, 2017, pp.562-569
- [2] Jian Huang, Member, IEEE, Songhyok Ri, Lei Liu, Yongji Wang, Jiyong Kim, and Gyongchol Pak " Nonlinear Disturbance Observer-Based Dynamic Surface Control of Mobile Wheeled Inverted Pendulum", IEEE Transactions on Control Systems Technology, 19(6):1-1, 2015
- [3] N. T. Phuong, H. D. Loc and T. Q. Thuan, "Control of Two Wheeled Inverted Pendulum Using Sliding Mode Technique", *International Journal of Engineering Research and Applications*, Vol. 3, No. 3, pp. 1276-1282, 2013.

## Projet 10. VTOL System

### A- Description du benchmark

Soit le benchmark avion à décollage et atterrissage vertical (VTOL system) décrit par la Figure A10.

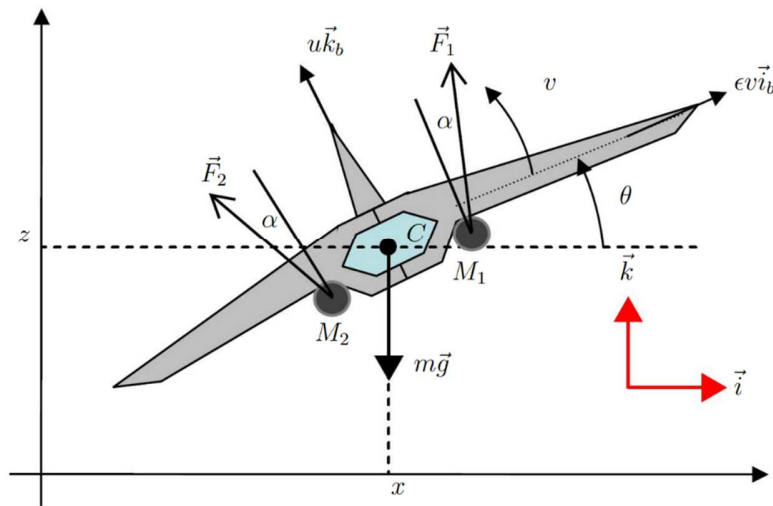


Figure A10. VTOL System

Noter que ce benchmark est à deux systèmes de coordonnées :

- Un fixe  $(\vec{i}, \vec{k})$
- Un mobile  $(\vec{i}_b, \vec{k}_b)$

Les paramètres du système ainsi que ses variables sont décrits dans le Tableau A10.

Tableau A10. Paramètres et variables du système

Paramètre	Description	unité
$\theta$	Angle de roulis	rad
$\alpha$	Angle entre $\vec{k}_b$ et $\vec{F}_1$ ou $\vec{F}_2$	rad
m	Masse de l'avion	Kg
u	Couple de poussé	N
v	Couple du moment de roulement	Nm
$\vec{F}_1$	La force de poussée générée au niveau de la narine M1	N
$\vec{F}_2$	La force de poussée générée au niveau de la narine M2	N

## B- Travail demandé

1. Quel est l'intérêt d'un tel benchmark dans l'industrie et quelles sont les difficultés qui peuvent les supporter.

2. Montrer que la dynamique simplifiée du système VTOL peut être donnée par [1]:

$$\begin{cases} \ddot{x} = -u \sin(\theta) + \varepsilon v \cos(\theta) \\ \ddot{z} = u \cos(\theta) + \varepsilon v \sin(\theta) - g \\ \ddot{\theta} = v \end{cases}$$

avec  $\varepsilon \neq 0$

3. Présenter la méthodologie du dimensionnement du matériel et réaliser le benchmark soit :

- sur une maquette réelle en utilisant des composants non coûteux et disponibles ;
- par une maquette virtuelle sous Solidworks ou LabVIEW.

4. Concevoir une interface LabVIEW pour la lecture des données du gyroscope, l'envoi de commandes aux moteurs,...

5. Synthétiser une loi de commande (PID par exemple) pour contrôler les vitesses des moteurs.

6. Affiner les paramètres du régulateur proposés afin d'atteindre des performances désirées.

## Références

- [1] Reza Olfati-Saber " Global Configuration Stabilization for the VTOL Aircraft with Strong Input Coupling" IEEE Transactions on Automatic Control, VOL. 47 (11), 2002, pp.1949-1952.