



Ball Balancing Table

Plateforme de contrôle d'équilibre à bille avec 2 degrés de liberté pour tests Temps Réel 5G

Descriptif du système

La **Plateforme didactique « Ball Balancing Table »** permet aux étudiants d'aborder les grands concepts des asservissements. Elle est réalisée avec des composants faciles d'accès et conviviaux. Une bille est positionnée sur une table tactile. Elle est stabilisée par un mécanisme à deux degrés de liberté associé à un contrôle commande. Les applicatifs Open Source permettent aux étudiants de créer, modifier et tester les propres algorithmes.

La Plateforme didactique « Ball Balancing Table » se compose d'une partie opérative (réf. **AO03**) avec deux **servomoteurs** supportant deux **mécanismes bielles manivelles** couplés à une **table tactile résistive** 4 fils. La partie commande intègre une interface électronique connectée à une carte de contrôle/commande. Celle-ci peut être choisie en fonction du langage de programmation souhaitée par l'équipe enseignante. Les cartes de contrôle/commande disponibles sont :

- ✓ **Carte MyRIO** pour programmation à partir de **LabVIEW** (réf. **AO01**)
- ✓ **Carte Arduino Mega** permettant la programmation à partir de **MATLAB Simulink** (réf. **AO02**)
- ✓ **Carte Raspberry Pi3** permettant la programmation à partir de **Python** (réf. **AC//RPI3**)

Il est possible d'acquérir une seule partie opérative et différentes cartes de contrôle/commande pour augmenter la couverture pédagogique de la plateforme d'équilibre à bille.

Ce système est accompagné de documents sous format numérique comprenant :

- ✓ Un **manuel** de montage et d'utilisation
- ✓ Un **manuel** de cours et travaux pratiques
- ✓ Une **application convoyeur de pièces** pour tablette Android
- ✓ Les programmes **LabVIEW** et **MATLAB Simulink** en fonction de la version.

Solutions techniques abordées

- Table à deux degrés de liberté montée sur un cardan central
- Deux servomoteurs analogiques 4,8V et couple 0,5 Nm
- Deux mécanismes Bielle / Manivelle avec rotules couplés aux deux servomoteurs et à la table
- Table tactile 17 pouces résistive à 4 fils avec quadrillage vertical et horizontal
- Carte électronique d'interface entre la partie opérative et les cartes de commandes (myRIO, Arduino et Raspberry)
- Entièrement compatible avec LabVIEW et MATLAB Simulink
- Structure logiciel Open Source pour personnaliser les applications souhaitées
- Les compléments de trajectoires rectangulaires et circulaires sont intégrés dans le logiciel

Contextualisation autour de la 5G

- La technologie 5G constitue une technologie révolutionnaire, jusqu'à 100 fois plus rapide que la 4G, avec des temps de latence très courts et une haute fiabilité.
- La latence désigne le temps nécessaire à un paquet de données pour passer de la source à la destination, à travers un réseau informatique.
- En 4G, la latence est d'environ 20 ms, elle est 10 fois plus petite en 5G.
- La Ball Balancing Table a été créée à la demande d'INTEL pour évaluer en utilisation « temps réel » les performances d'un réseau 5G
- Le test consiste à faire parcourir un labyrinthe par une bille le plus rapidement possible avec une commande via un réseau 5G

**Classes Préparatoires aux Grandes Ecoles
IUT - Universités – Ecoles d'ingénieurs**

Thématiques abordées

**Mécanique, Instrumentation, Asservissement
Electronique & Communication
Robotique**

En partenariat avec



Retrouvez la vidéo
sur la chaîne



Points forts

- Table didactisée « Ball Balancing Table » permettant d'appréhender les grands fondements des asservissements.
- Partie commande au choix des utilisateurs avec programmation sous **LabVIEW**, **MATLAB Simulink**, **Python**.
- Programmes Open source permettant de réaliser ses propres interfaces de commande.
- Mise en œuvre des techniques de contrôle / commande numérique avancées (Logique floue...)
- Equipée de capteurs modernes : tablette tactile et centrale inertielle
- Nombreuses caractéristiques modifiables : **entrées, trajectoires, inerties, PID, commande, latence...**



Références

AO03 : Ball Balancing Table, sans contrôle commande
AO01 : Contrôle commande avec MyRIO
AO02 : Contrôle commande avec Arduino Mega
AC//RPI3 : Contrôle commande avec Raspberry Pi 3



Logiciel de contrôle / commande Open Source

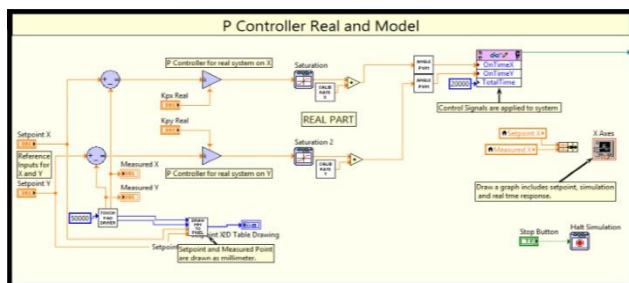
- Le logiciel fourni avec la plateforme « Ball Balancing Table » est sous LabVIEW et entièrement Open Source.
- Les étudiants peuvent créer, modifier et tester leurs propres algorithmes et les exécuter instantanément pour les valider. Ils pourront ainsi comprendre les effets des différents contrôle / commande pour en retenir les grands concepts
- Le système didactique est idéal pour les études supérieures et plus particulièrement sur le thème de la conception de contrôleurs avancés tels que le contrôle robuste, le contrôle adaptatif, le contrôle flou, etc.

Interface & Logiciel Intuitif

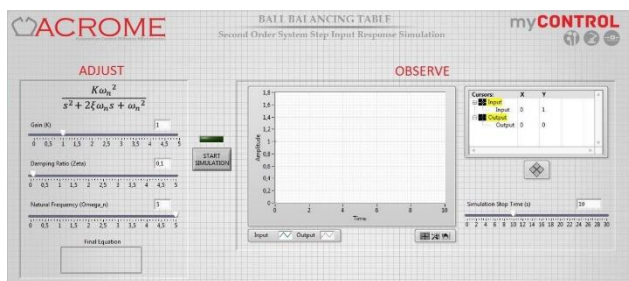
- La plateforme « Ball Balancing Table » est fournie avec une interface utilisateur « prête à l'emploi » permettant aux étudiants de comprendre les techniques de contrôle / commande avancées permettant de résoudre facilement un problème technique.
- Le logiciel permet :
 - Le contrôle en position de la balle sur la table
 - Le suivi, à la balle, de trajectoire rectangulaire et circulaire
 - La création et le suivi, à la balle, de nouvelles trajectoires (méthode breveté)

Exemples d'Activités pédagogiques envisageables

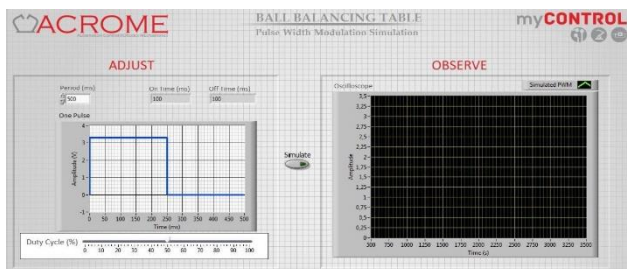
- ✓ **Etude fonctionnelle et structurelle de la plateforme « Ball Balancing Table » :**
 - Le mécanisme à une liaison rotule et deux liaisons bielle/manivelle
 - Les servomoteurs
 - La table tactile et les capteurs
 - La carte électronique d'interface
 - La carte de contrôle/commande myRIO, Arduino ou Raspberry
- ✓ **Etude de la Modulation de largeur d'impulsion (PWM) :**
 - Théorie sur les signaux PWM
 - Générer des signaux PWM avec une carte myRIO
 - Contrôler des servomoteurs avec des signaux PWM
- ✓ **Modélisation du système :**
 - Méthode Lagrangienne
 - Loi de Newton sur les mouvements
 - Modèle des servomoteurs
 - Obtention de la fonction de transfert
- ✓ **Etude de la boucle de retour dans les systèmes :**
 - Lecture de la position de la balle depuis l'écran tactile
 - Filtrage dérivé
- ✓ **Mesure des performances :**
 - Caractéristiques dans le domaine temporel
 - Réponse d'état stable et erreur d'état stable
- ✓ **Conception des correcteurs d'asservissement :**
 - Conception des correcteurs linéaires
 - Correcteur PID
 - Correcteur Logique Flou
 - Comparaison de la simulation et des réponses réelles du système pour différents types de correcteurs
- ✓ **Vérification des systèmes de contrôles**
 - Analyse de la réponse en fréquence
 - Diagramme expérimental de Bode
 - Détermination de la fréquence de coupure.



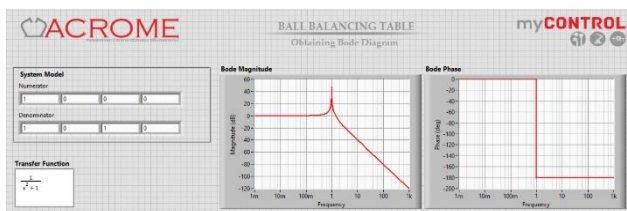
Application Ball Balancing Table Open Source sous LabVIEW



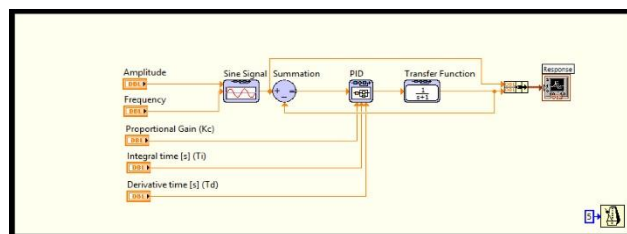
Simulation d'une réponse d'un système du second ordre



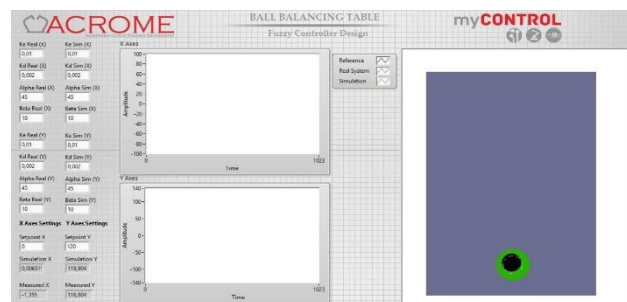
Simulation de commande PWM



Obtention d'un diagramme de Bode



Programme LabVIEW d'une excitation sinus avec correcteur PID



Correcteur avec de la Logique Flou



Curriculum Acrome disponible (En français) pour l'environnement Labview

1 Composants de la table d'équilibrage de bille

- 1.1 Servomoteurs RC
 - 1.1.1 Vue d'ensemble
 - 1.1.2 Théorie de fonctionnement
- 1.2 Écran tactile résistif 2D et contrôleur
- 1.3 NI myRIO
- 1.4 Boîte de distribution d'énergie ACROME
- 1.5 Mécanique de la table d'équilibrage à bille

2 Modulation de largeur d'impulsion et servomoteur RC

- 2.1 Comprendre la modulation de largeur d'impulsion (PWM)
 - 2.1.1 Exercice en laboratoire
- 2.2 Piloter un servomoteur RC en PWM

3 Filtrage de la dérivée

3.1 Exercice en laboratoire

4 Modélisation du système

- 4.1 Equation non linéaire du mouvement
 - 4.1.1 Equations de Lagrange
 - 4.1.2 Loi du mouvement de Newton
- 4.2 Modélisation du système de la table d'équilibrage à bille
 - 4.2.1 Linéarisation autour du point d'opération
 - 4.2.2 Obtention de la fonction de transfert du processus
- 4.3 Modélisation de l'actionneur
- 4.4 Contrôle en cascade de la table d'équilibrage à bille

5 Mesures de performance

- 5.1 Comprendre le pourcentage de dépassement, le temps de pic, le temps de réponse et l'erreur statique
 - 5.1.1 Coefficient d'amortissement (ξ)
 - 5.1.2 Pulsation naturelle (ω_n)
 - 5.1.3 Pourcentage de dépassement
 - 5.1.4 Temps de pic (t_p)
 - 5.1.5 Temps de réponse (t_s)
 - 5.1.6 Erreur statique
- 5.1.7 Exercice en laboratoire

6 Conception du système de contrôle

6.1 Contrôleur PID académique

6.2 Contrôleur PID parallèle

6.3 Lieu des racines (Lieu d'Evans)

6.4 Contrôleur P

6.4.1 Exemple de conception avec le contrôleur P

6.4.2 Exercice en laboratoire

6.4.2.1 Configuration de la boucle de contrôle et simulation

6.4.2.2 Exercice en laboratoire

6.5 Contrôleur PD

6.5.1 Exemple de conception avec contrôleur PD

6.5.2 Exercices en laboratoire

6.6 Contrôleur PV

6.6.1 Exemple de conception avec régulateur PV

6.6.2 Exercices en laboratoire

6.7 Contrôleur PID

6.7.1 Exemple de conception avec contrôleur PID

6.7.2 Exercices en laboratoire

6.8 Contrôleur à logique floue

6.8.1 Ensembles flous

6.8.2 Fonction d'appartenance

6.8.3 Opérations sur les ensembles flous

6.8.3.1 Opération d'Union

6.8.3.2 Opération complémentaire

6.8.3.3 Opération Intersection

6.8.4 Structure de contrôle floue

6.8.5 Structures de règles floues

6.8.5.1 Inférence de Mamdani

6.8.5.2 Inférence de Takagi - Sugeno

6.8.5.3 Inférence de type unique (singleton)

6.8.6 Conception du contrôleur à logique floue

6.8.6.1 Création des fonctions d'appartenance du contrôleur à logique floue

6.8.6.2 Exercice en laboratoire

7 Analyse de la réponse en fréquence

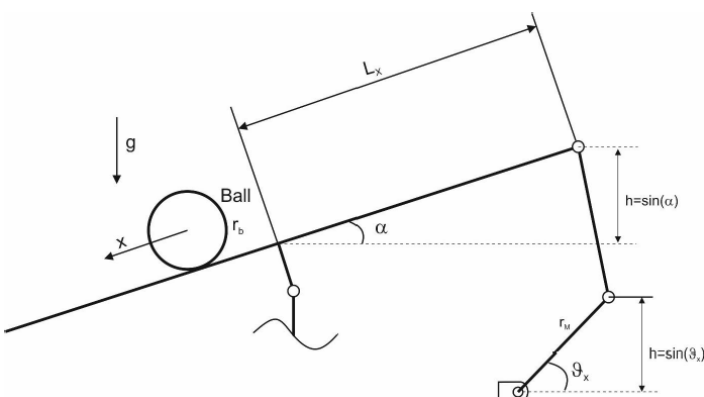
7.1 Introduction

7.2 Exercice de laboratoire : Détermination du rapport d'amplitude et de la phase

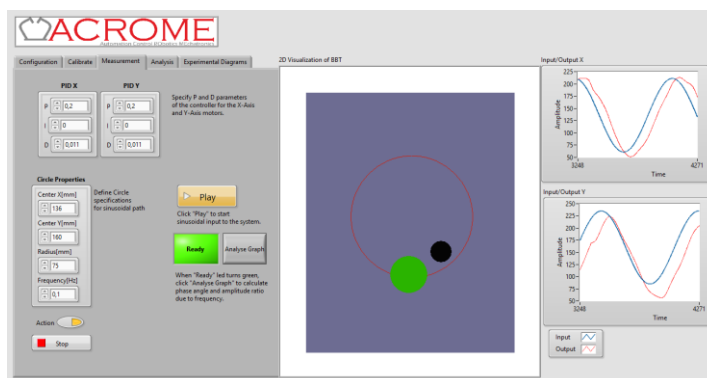
7.3 Réponse en fréquence d'un système linéaire

7.4 Exercice en laboratoire : Obtenir les diagrammes de Bode de la TEB

7.5 Exercice en laboratoire : Diagrammes de Bode expérimentaux de la TEB



Relation entre les angles moteur et les angles de table



Ecran de mesures LabVIEW de l'activité autour du diagramme de Bode



Curriculum Acrome disponible (En français) pour l'environnement MATLAB Simulink

1 Composants de la table d'équilibrage de bille

- 1.1 Servomoteurs RC
 - 1.1.1 Vue d'ensemble
 - 1.1.2 Théorie de fonctionnement
- 1.2 Écran tactile résistif 2D et contrôleur
- 1.3 Arduino Mega 2560
- 1.4 Boîte de distribution d'énergie ACROME
- 1.5 Mécanique de la table d'équilibrage à bille

2 Modulation de largeur d'impulsion et servomoteur RC

- 2.1 Comprendre la modulation de largeur d'impulsion (PWM)
 - 2.1.1 Exercice en laboratoire
- 2.2 Piloter un servomoteur RC en PWM

3 Filtrage de la dérivée

3.1 Exercice en laboratoire

4 Modélisation du système

- 4.1 Equation non linéaire du mouvement
 - 4.1.1 Equations de Lagrange
 - 4.1.2 Loi du mouvement de Newton
- 4.2 Modélisation du système de la table d'équilibrage à bille
 - 4.2.1 Linéarisation autour du point d'opération
 - 4.2.2 Obtention de la fonction de transfert du processus
- 4.3 Modélisation de l'actionneur
- 4.4 Contrôle en cascade de la table d'équilibrage à bille

5 Mesures de performance

- 5.1 Comprendre le pourcentage de dépassement, le temps de pic, le temps de réponse et l'erreur statique

5.1.1 Coefficient d'amortissement (ξ)

5.1.2 Pulsation naturelle (ω_n)

5.1.3 Pourcentage de dépassement

5.1.4 Temps de pic (t_p)

5.1.5 Temps de réponse (t_s)

5.1.6 Erreur statique

5.1.7 Exercice en laboratoire

6 Conception du système de contrôle

6.1 Contrôleur PID académique

6.2 Contrôleur PID parallèle

6.3 Lieu des racines (Lieu d'Evans)

6.4 Contrôleur P

6.4.1 Exemple de conception avec le contrôleur P

6.4.2 Exercice en laboratoire

6.4.2.1 Configuration de la boucle de contrôle et simulation

6.4.2.2 Exercice en laboratoire

6.5 Contrôleur PD

6.5.1 Exemple de conception avec contrôleur PD

6.5.2 Exercices en laboratoire

6.6 Contrôleur PV

6.6.1 Exemple de conception avec régulateur PV

6.6.2 Exercices en laboratoire

6.7 Contrôleur PID

6.7.1 Exemple de conception avec contrôleur PID

6.7.2 Exercices en laboratoire

7 Analyse de la réponse en fréquence

7.1 Introduction

7.2 Réponse en fréquence d'un système linéaire

7.3 Exercice en laboratoire : Réponse en fréquence de la TEB

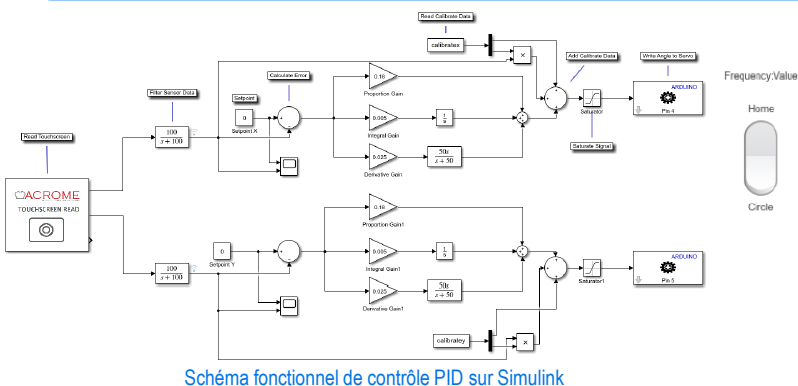


Schéma fonctionnel de contrôle PID sur Simulink

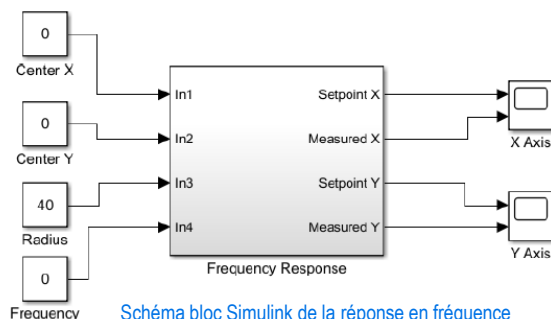
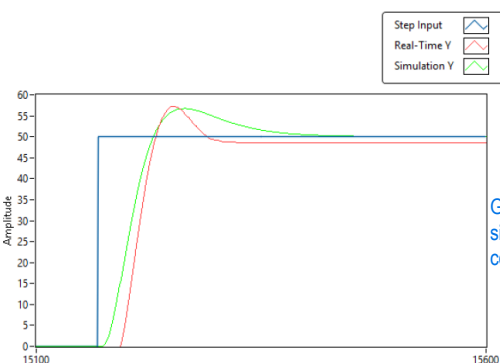
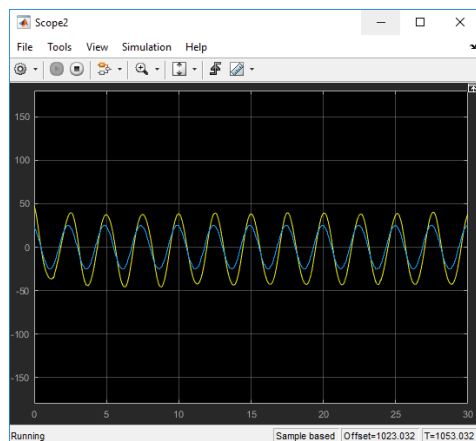


Schéma bloc Simulink de la réponse en fréquence



Graphiques du système réel, de simulation et d'entrée indicielle avec le contrôleur PD sur Y



Réponse en fréquence de l'axe X à une fréquence de 10Hz



Activités pédagogiques CPGE disponibles

TP Analyse des Correcteurs et Modélisation Causale

Objectifs:

- Comparer l'influence théorique et l'influence pratique des correcteurs Proportionnel, Intégrale et Dérivé de la table
- Construire un modèle causal de la table
- Appréhender la difficulté de stabilisation du système
- Comprendre l'intérêt de l'utilisation d'un servomoteur
- Identifier les limites de la modélisation linéaire par les SLCI

Partie 1: Réponse temporelle du système asservi en boucle fermée (Mesures de référence - Influences de K_p , K_i , K_d)

Partie 2: Création d'un modèle causal

- Modélisation de la bille sur la table
- Modélisation du système de biellettes
- Modélisation du servomoteur
- Intérêt du servomoteur

TP Identification temporelle et fréquentielle d'un système

Objectifs:

- Identifier un modèle de la table en étude temporelle
- Identifier un modèle de la table en étude fréquentielle en Boucle Ouverte
- Identifier un modèle de la table en Boucle Fermée

Partie 1: Identification en boucle fermée par la réponse temporelle

Partie 2: Identification en boucle ouverte par des réponses fréquentielles

Partie 3: Identification en boucle fermée par des réponses fréquentielles

Partie 4: Comparaison des modèles construits

TP Modélisation du système de transformation de mouvement BBT (Loi E/S) → TP avec 2 ilots

- Activité/Partie 1: Découverte de la problématique autour du test de la latence d'une transmission de donnée (Sur BBT)
- Activité/Partie 2: Découverte de la problématique, et de la nécessité de modéliser avec fiabilité le système (Sur MatLab)
- Activité/Partie 3: Mise en place du modèle de comportement à partir de relevés expérimentaux (Sur BBT)
- Activité/Partie 4: Modélisation cinématique, mise en place du modèle MECA3D, tracé de la loi E/S (Sur Meca3D)

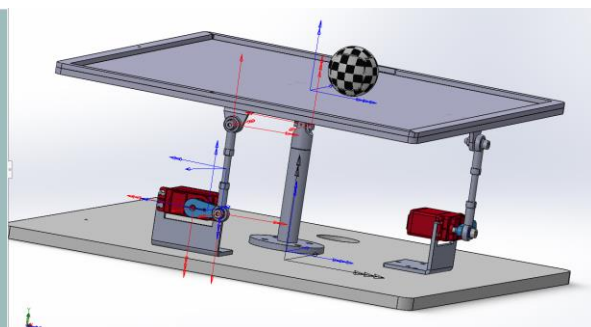
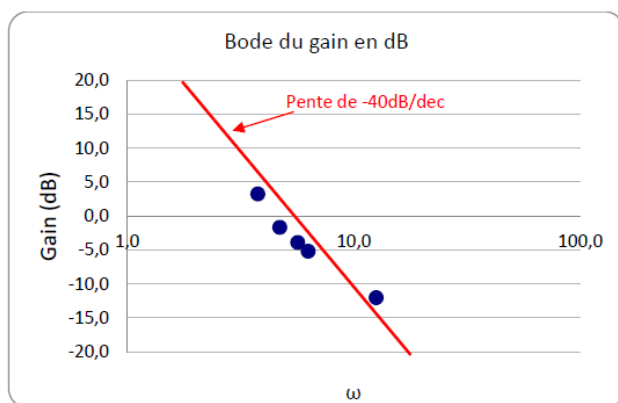
TP Résolution numérique de la loi E/S du système

- Partie 1: Détermination analytique de la loi E/S
- Partie 2: Détermination numérique de la loi E/S (Python)
- Partie 3: Détermination numérique de la loi E/S (Meca3D)
- Partie 4: Comparaison des lois E/S obtenues
- Partie 5: Conclusion sur la linéarisation

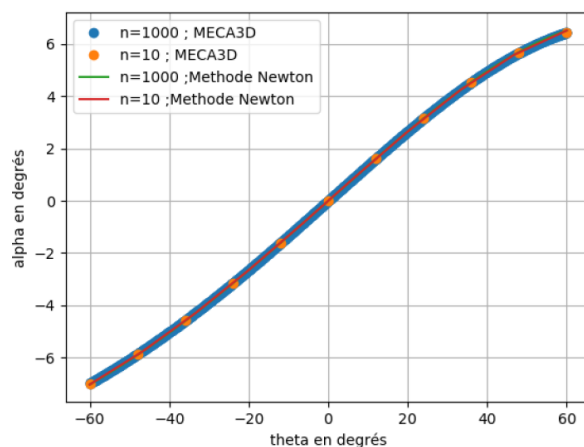
TP Comportement de la bille sur le plateau de la table

Objectifs:

- Déterminer la loi de mouvement de la bille avec un modèle simpliste
- Déterminer la loi de mouvement en prenant en compte l'inertie en rotation d'une bille
- Mesurer l'effet visible de l'inertie d'une bille en fonction de la masse et de son diamètre
- Evaluer l'effet des matériaux de la bille et de la table sur le mouvement de la bille
- Conclure sur les moyens de prendre en compte ou non les paramètres inertiels et de frottement de roulement de la bille sur le plateau



Modélisation sur Meca3D



Comparaison des lois E/S obtenues