

PRÉSENTATION PROJET CAO : **INERTIA WHEEL PENDULUM**

RÉALISÉ PAR:

MEHDI NOUNI

RAYEN BELFAYEZ

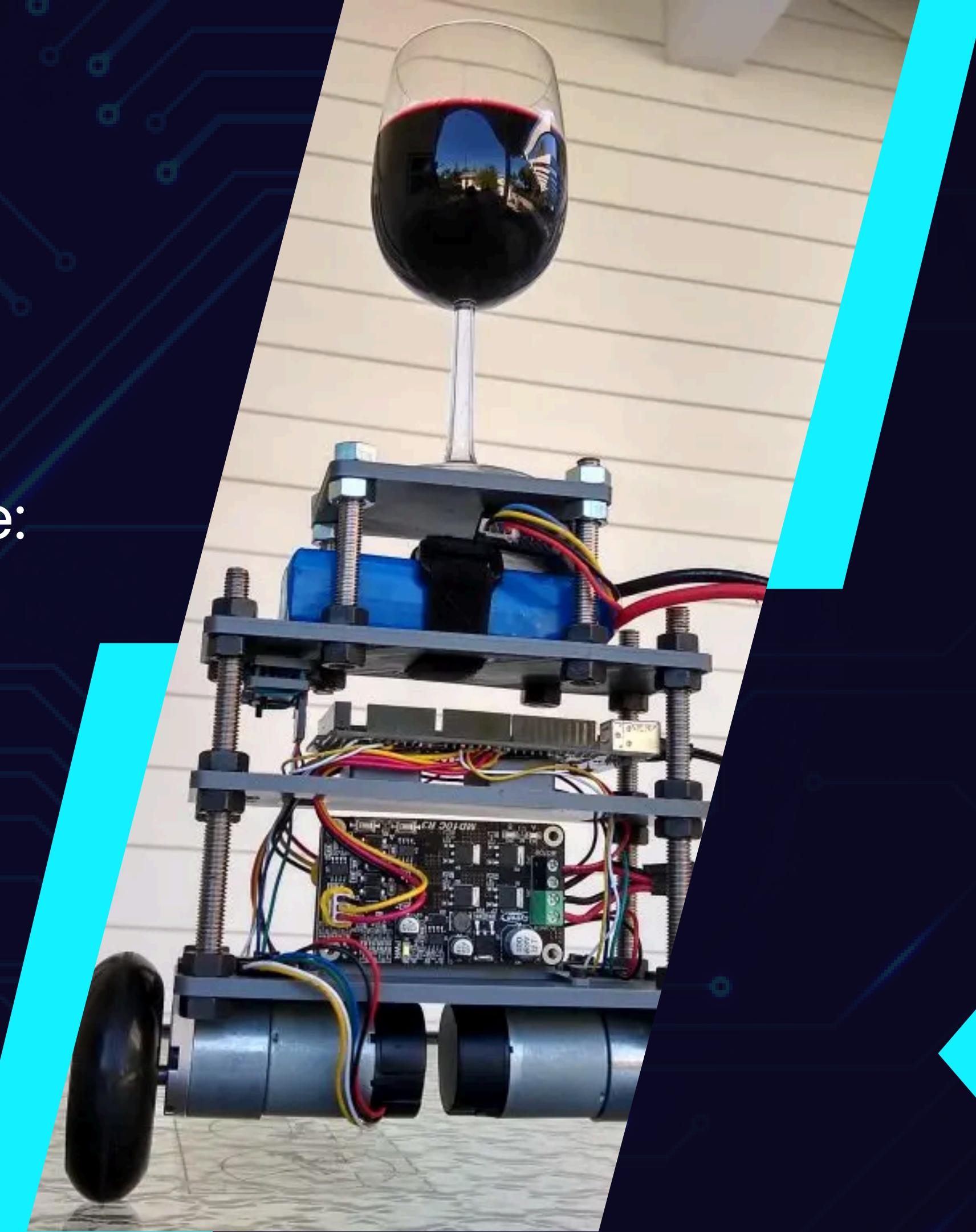
TESNIME MANNAI

NOUR BEN ROMDHANE

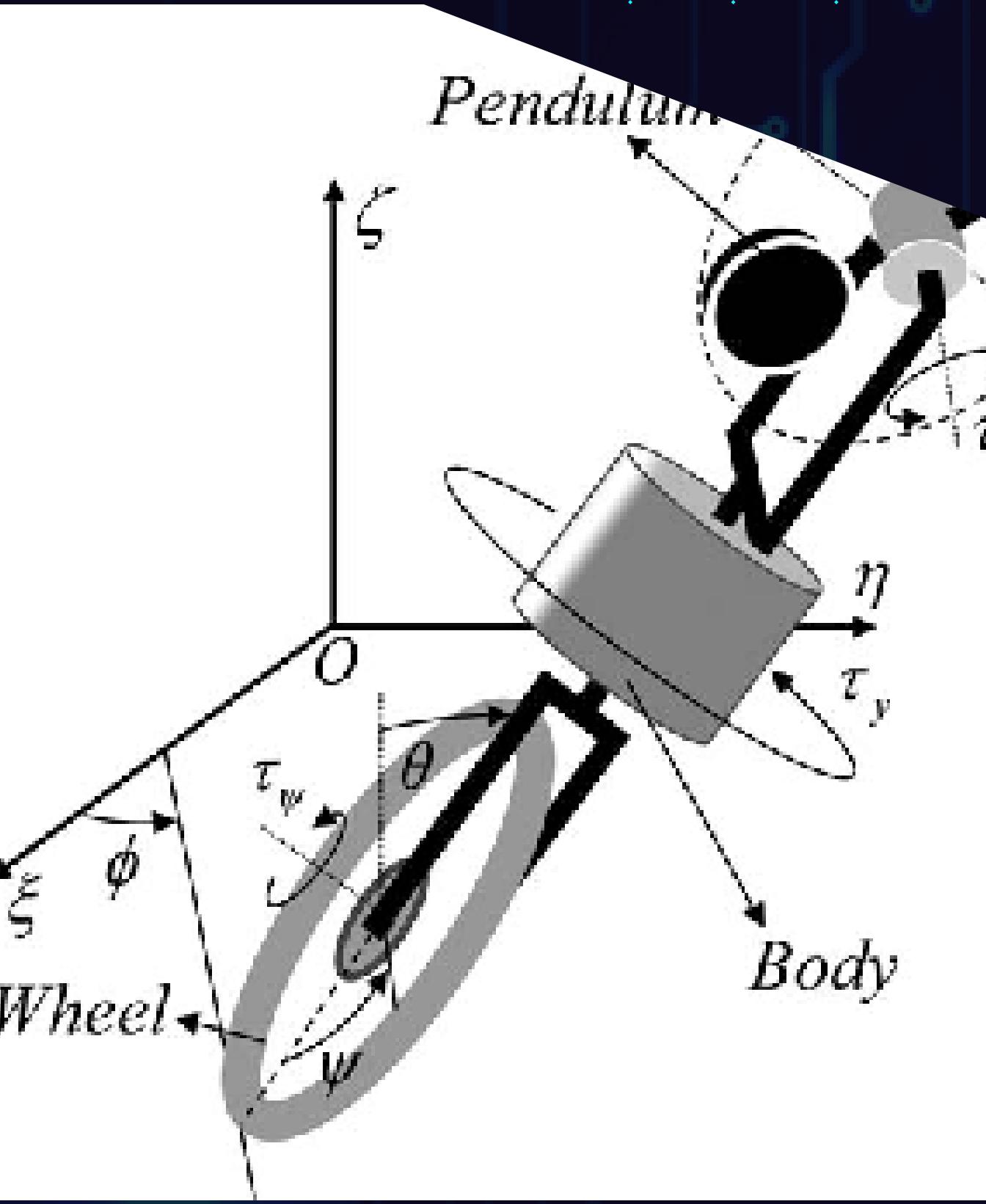
2023-2024

SOMMAIRE

- Motivation
- Présentation du benchmark
- Le modèle dynamique du système:
Modèle de Lagrange
- Modèle réel
- Commande du système
- Conception Proteus
- Labview
- Résultats



MOTIVATION



Depuis quelques décennies, les pendules à roue d'inertie sont devenus un problème de référence en dynamique et en théorie du contrôle. En raison de leur nature intrinsèque de non-linéarité, d'instabilité et de sous-actionnement, les dynamiques des systèmes de pendules à roue d'inertie ressemblent à de nombreux systèmes du monde réel.

La dynamique du pendule inversé ressemble à de nombreux systèmes en temps réel tels que les manipulateurs robotiques sous-actionnés, les robots gymnastes, les véhicules sous-marins, les avions, certains robots mobiles et les robots humanoïdes.

MOTIVATION



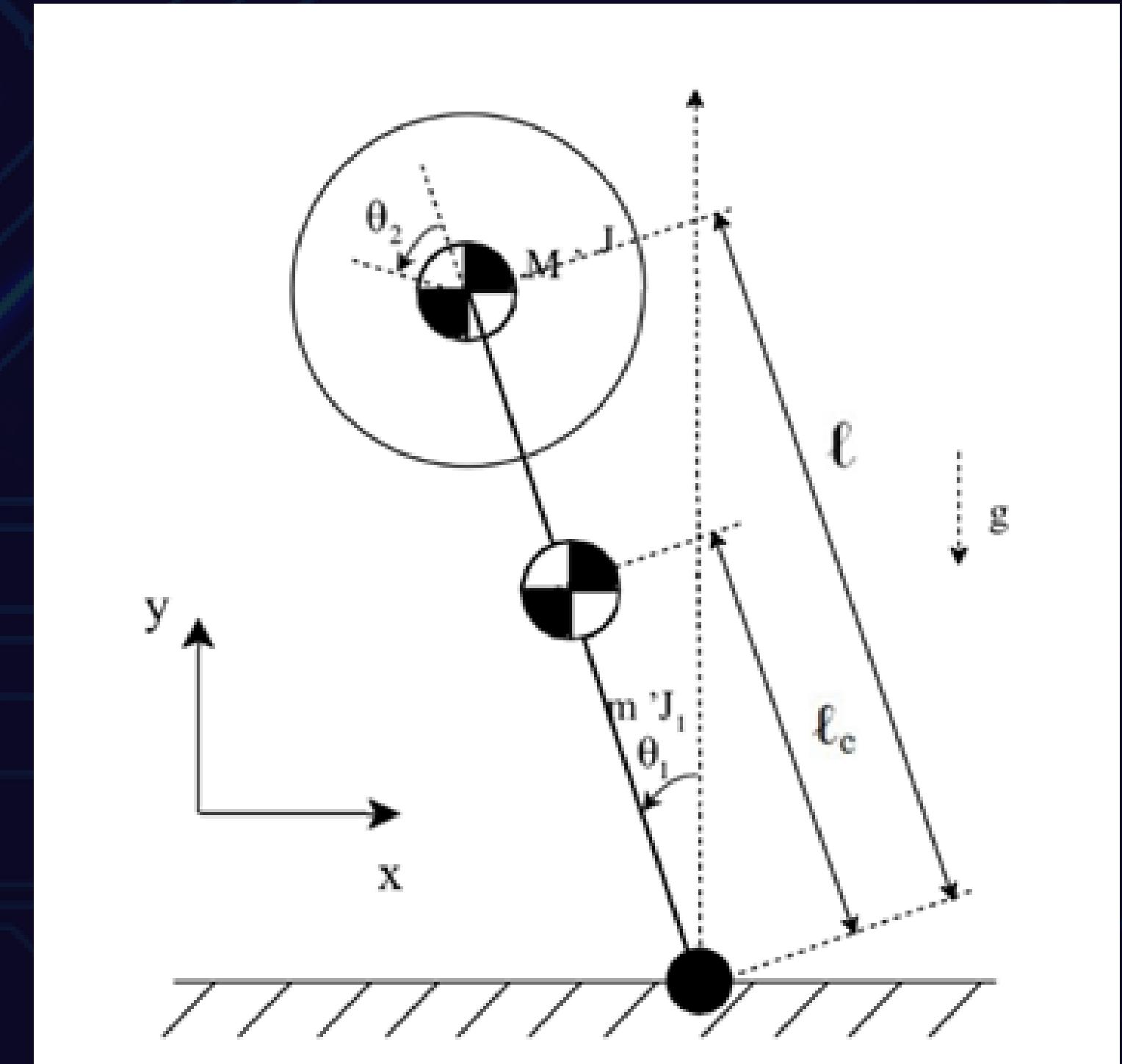
Les robots humanoïdes intègrent souvent des principes similaires d'équilibre et de stabilisation pour maintenir leur posture verticale et effectuer efficacement des tâches.

Un exemple de robot humanoïde qui utilise un contrôle d'équilibre similaire à un pendule à inertie est Atlas, développé par Boston Dynamics. Atlas est un robot humanoïde très avancé conçu pour une variété de tâches, y compris la recherche et le sauvetage, la réponse aux catastrophes et les applications industrielles.

PRÉSENTATION DU BENCHMARK

Le pendule à roue d'inertie est un système mécanique complexe. Il se compose d'un pendule inversé avec une roue tournante fixée à son extrémité. Cette roue peut être mise en mouvement grâce à un moteur à courant continu, ce qui permet de générer un couple de rotation.

Ce système planaire sous-actionné à deux degrés de liberté offre un terrain d'expérimentation idéal pour l'étude et le développement de stratégies de contrôle avancées.



DESCRIPTION DES PARAMÈTRES ET DES VARIABLES DYNAMIQUES

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 ²
J_2	Moment d'inertie de la roue	Kg.m ²
g	Coefficient de gravité	m.s ⁻²

Variable	Description	Unité
θ_1	Position angulaire du pendule	rad
$\dot{\theta}_1$	Vitesse angulaire du pendule	rad.s ⁻¹
$\ddot{\theta}_1$	Accélération angulaire du pendule	rad.s ⁻²
θ_2	Position angulaire de la roue	rad
$\dot{\theta}_2$	Vitesse angulaire de la roue	rad.s ⁻¹
$\ddot{\theta}_2$	Accélération angulaire de la roue	rad.s ⁻²
u	Couple moteur	Nm

LES PARAMÈTRES RÉELS DU SYSTÈME

Les paramètres du pendule:

masse du pendule : 0.236 kg

masse du motor + roue : 0.170 kg

longueur de centre de masse : 0.110 m dégagé à partir d'une simulation Solidworks

moment d'inertie de la roue : 0.000162231 kg · m² dégagé à partir d'une simulation Solidworks

Acceleration du pesanteur : 9.81 m/s²

Les paramètres du moteur:

couple moteur constant : 0.024 Nm

force contre electromotrice : 6.3/325 V/m/s

resistance de l'armature du moteur : 10.21 Ohm

LE MODÈLE DYNAMIQUE DU SYSTÈME : LE MODÈLE DE LAGRANGE

L'énergie cinétique du pendule:

$$K_1 = \frac{1}{2} (ml_c^2 + J_1) \dot{\theta}_1^2$$

L'énergie cinétique de la roue:

$$K_2 = \frac{1}{2} Ml^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} J_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2$$

D'où l'énergie cinétique totale :

$$K = K_1 + K_2 = \frac{1}{2} (ml_c^2 + Ml^2 + J_1 + J_2) \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} J_2 \dot{\theta}_2^2 + J_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2$$

LE MODÈLE DYNAMIQUE DU SYSTÈME : LE MODÈLE DE LAGRANGE

L'énergie potentielle du système est :

$$P = (ml_c + Ml)g \cos(\theta_1)$$

Le Lagrangien est donné par : $L = K - P$

$$\rightarrow L = \frac{1}{2}(ml_c^2 + Ml^2 + J_1 + J_2)\dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2}J_2\dot{\theta}_2^2 + J_2\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 - (ml_c + Ml)g \cos(\theta_1)$$

Euler-Lagrangien :

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}}(q, \dot{q}) \right) - \frac{\partial L}{\partial q}(q, \dot{q}) = u$$

LE MODÈLE DYNAMIQUE DU SYSTÈME : LE MODÈLE DE LAGRANGE

D'où on a :

$$\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} \right) = (ml_c^2 + Ml + J_1 + J_2)\ddot{\theta}_1 + J_2\ddot{\theta}_2$$

$$\left(\frac{\partial L}{\partial \theta_1} \right) = (ml_c + Ml)g \sin(\theta_1)$$

$$\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} \right) = J_2\ddot{\theta}_1 + J_2\ddot{\theta}_2$$

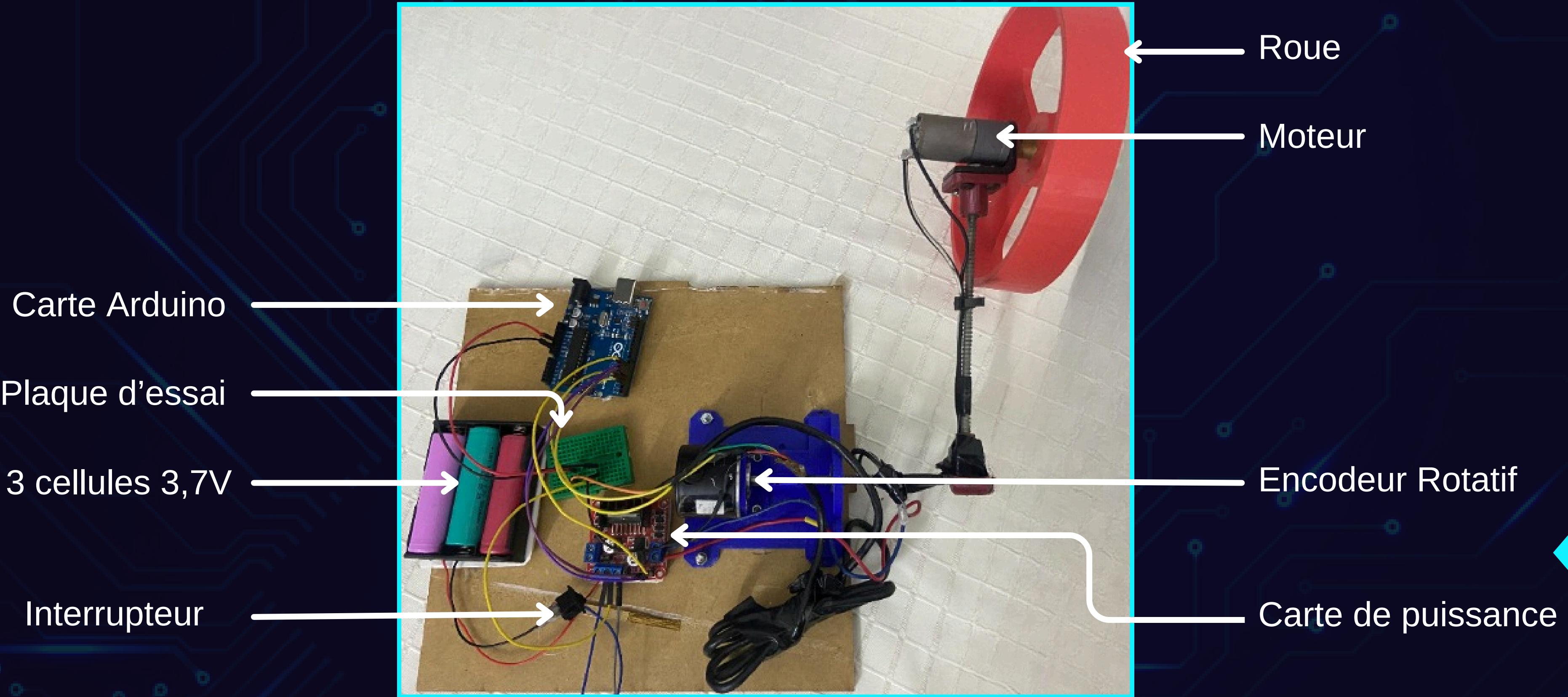
$$\left(\frac{\partial L}{\partial \theta_2} \right) = 0$$

LE MODÈLE DYNAMIQUE DU SYSTÈME : LE MODÈLE DE LAGRANGE

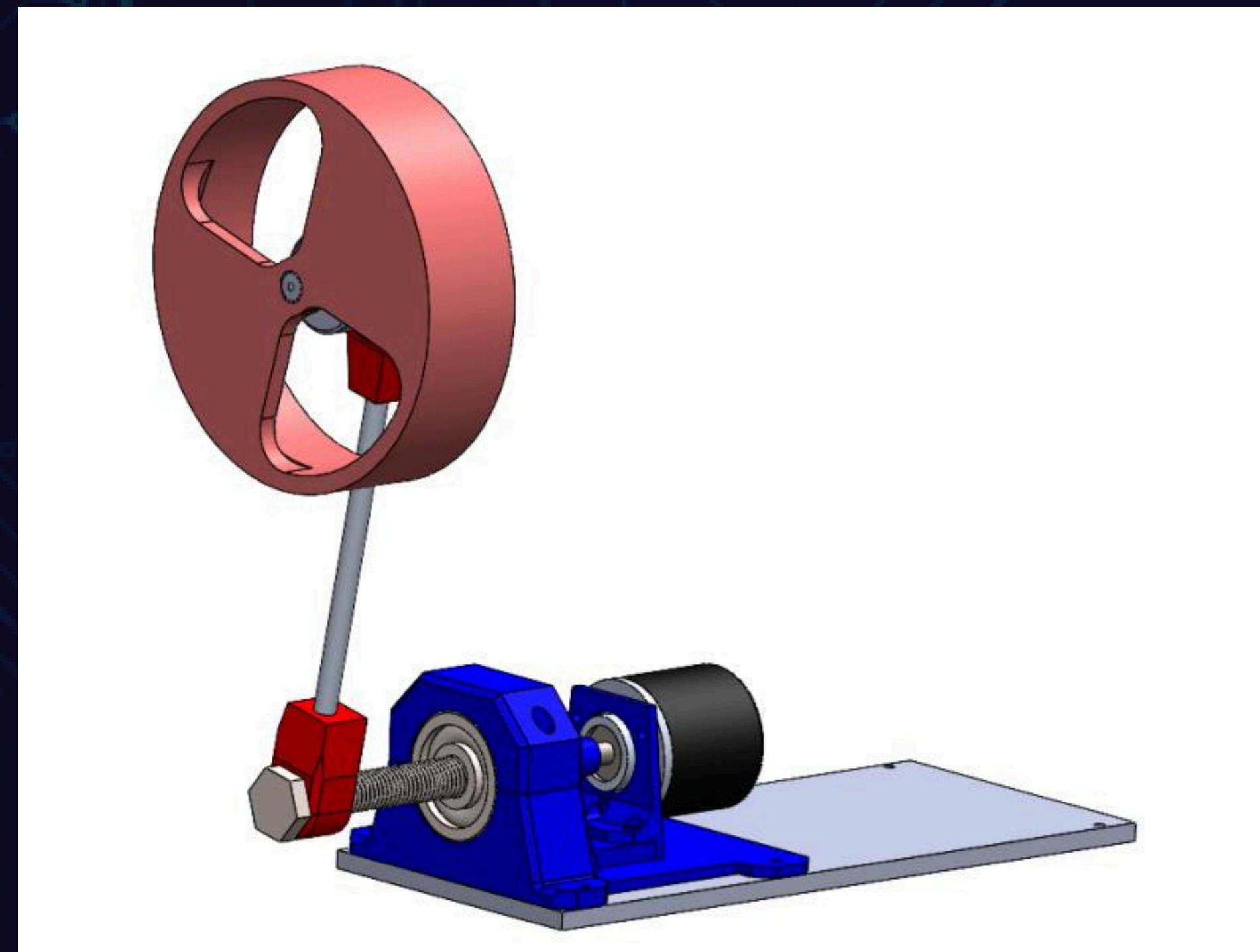
D'où le modèle dynamique du système représenté par le modèle de Lagrange :

$$\begin{bmatrix} ml_c^2 + Ml^2 + J_1 + J_2 & J_2 \\ J_2 & J_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (ml_c + Ml)gsin(\theta_1) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u$$

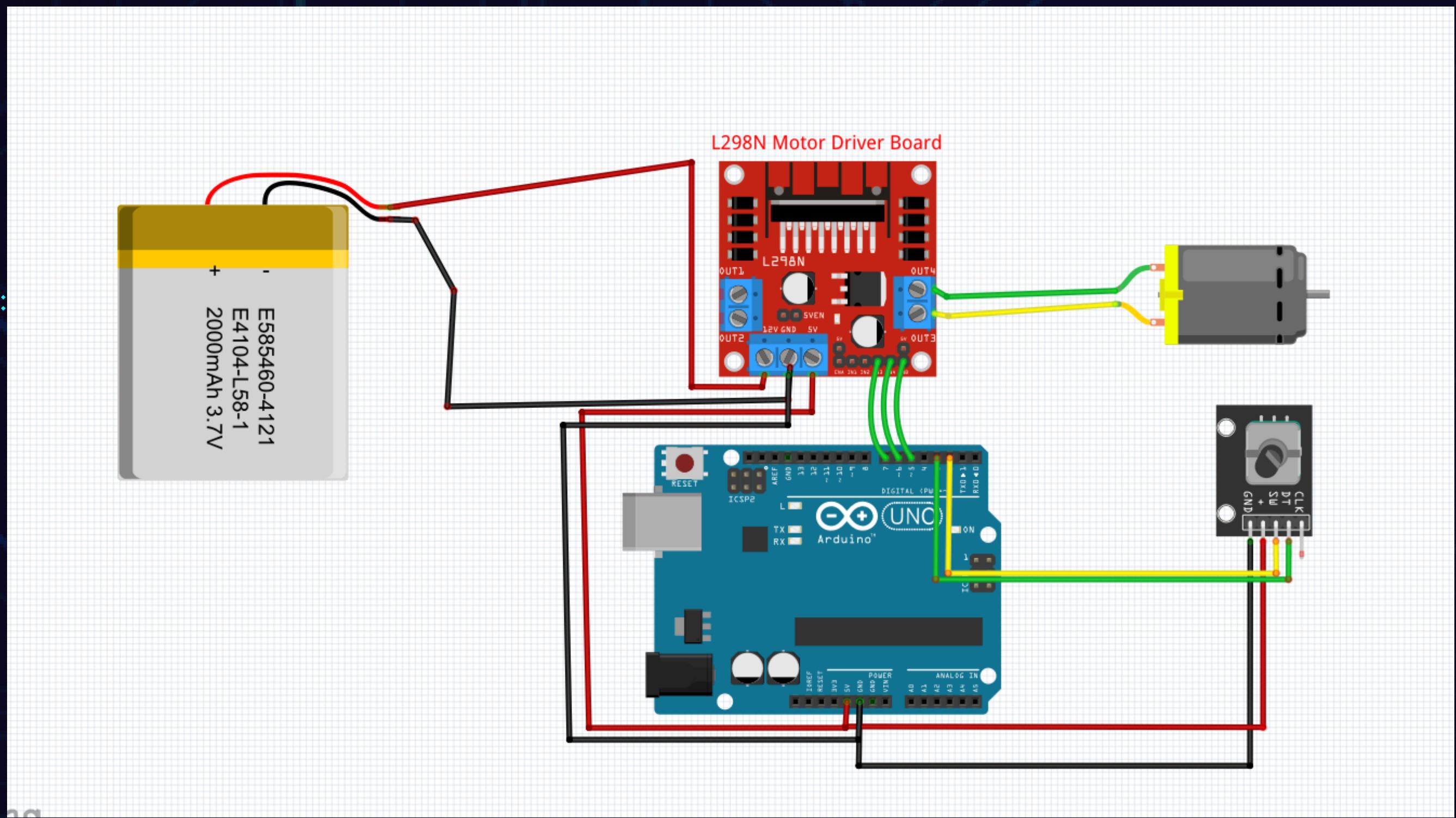
MODÈLE RÉEL



CONCEPTION SOLIDWORKS



MODÉLISATION FRITZING



COMMANDÉ DU SYSTÈME

COMMANDÉ DU SYSTÈME PAR UN RÉGULATEUR PID

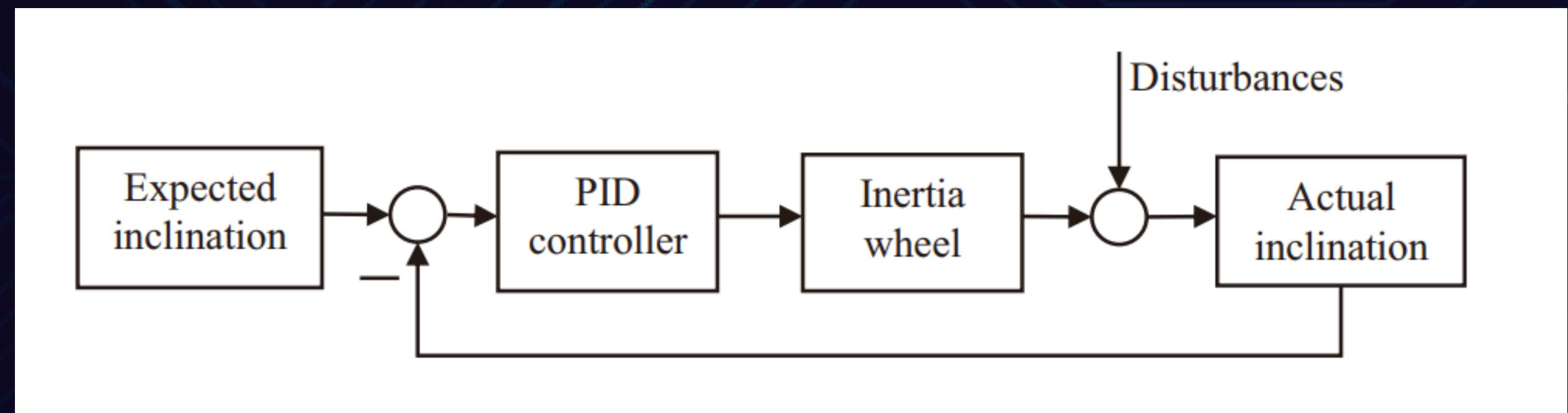
Le régulateur proportionnel-intégral-dérivé (PID) est une méthode de commande classique largement utilisée dans l'industrie. Il est également adapté pour conserver la stabilité locale du système et pour contrôler le balancement du pendule vers la position verticale.

Le PID se compose de trois termes : proportionnel, intégral et dérivé, qui sont ajustés pour obtenir une réponse optimale.

Le terme proportionnel est utilisé pour réagir à l'erreur actuelle

Le terme intégral pour corriger l'erreur accumulée au fil du temps

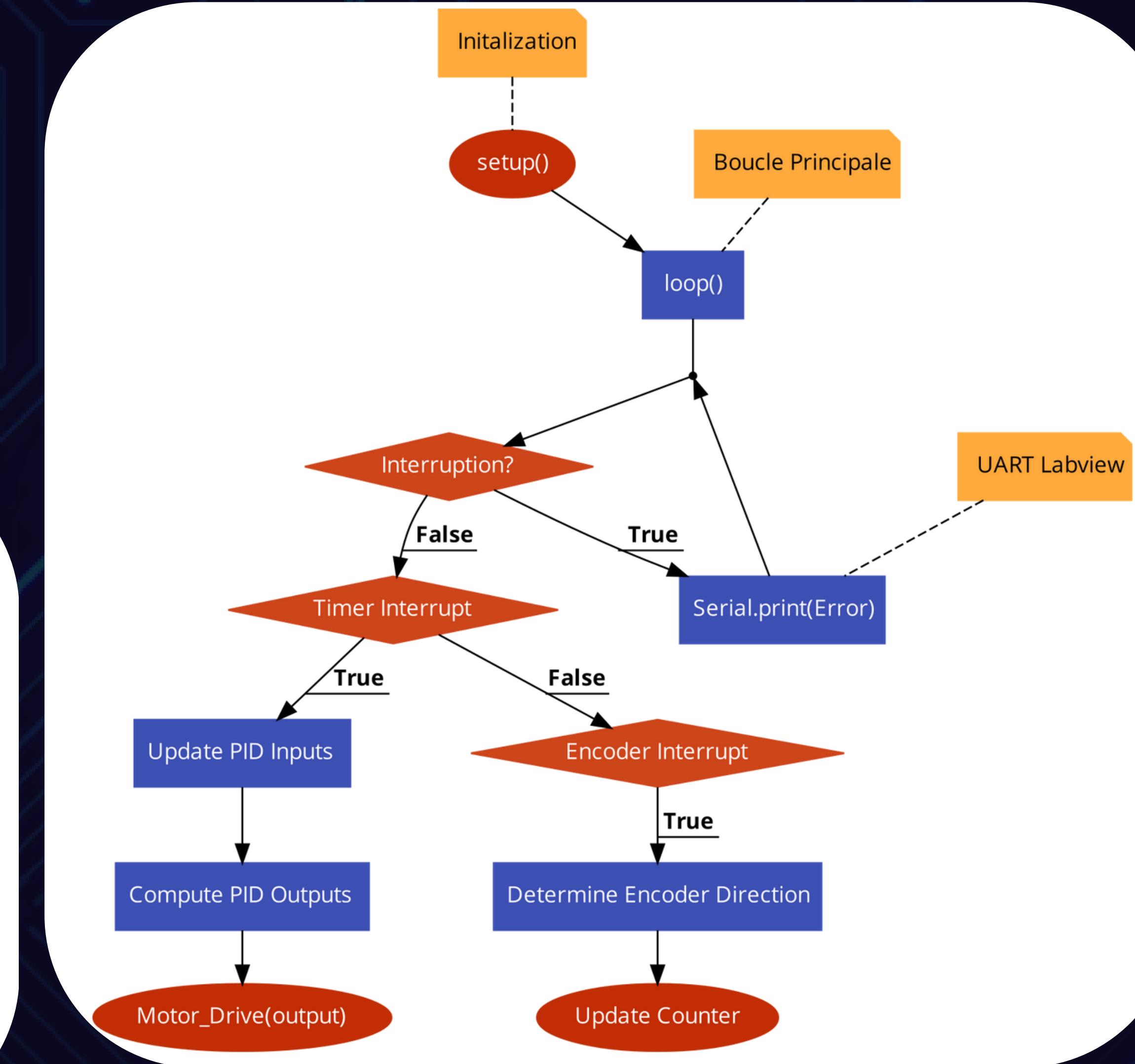
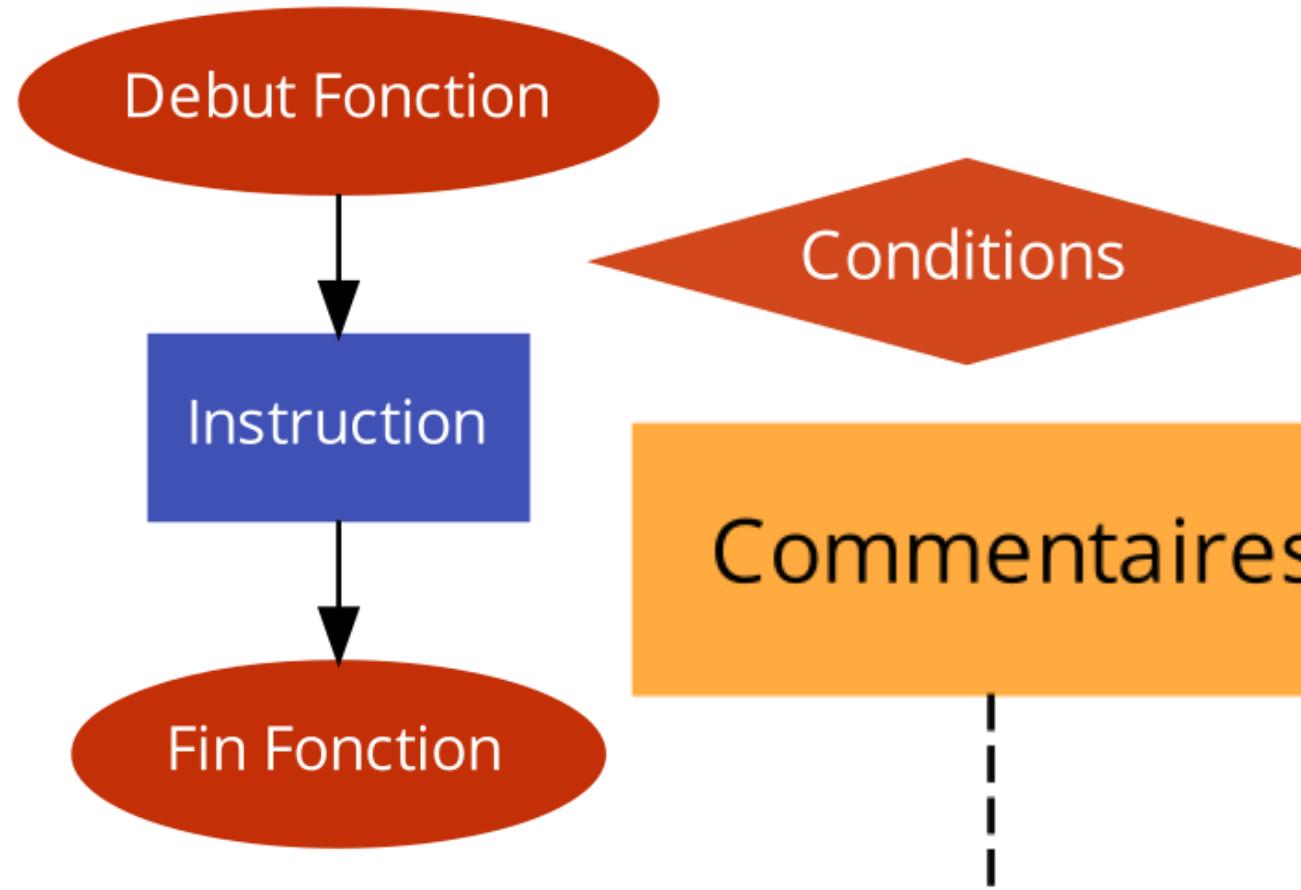
Le terme dérivé pour anticiper les changements futurs de l'erreur.



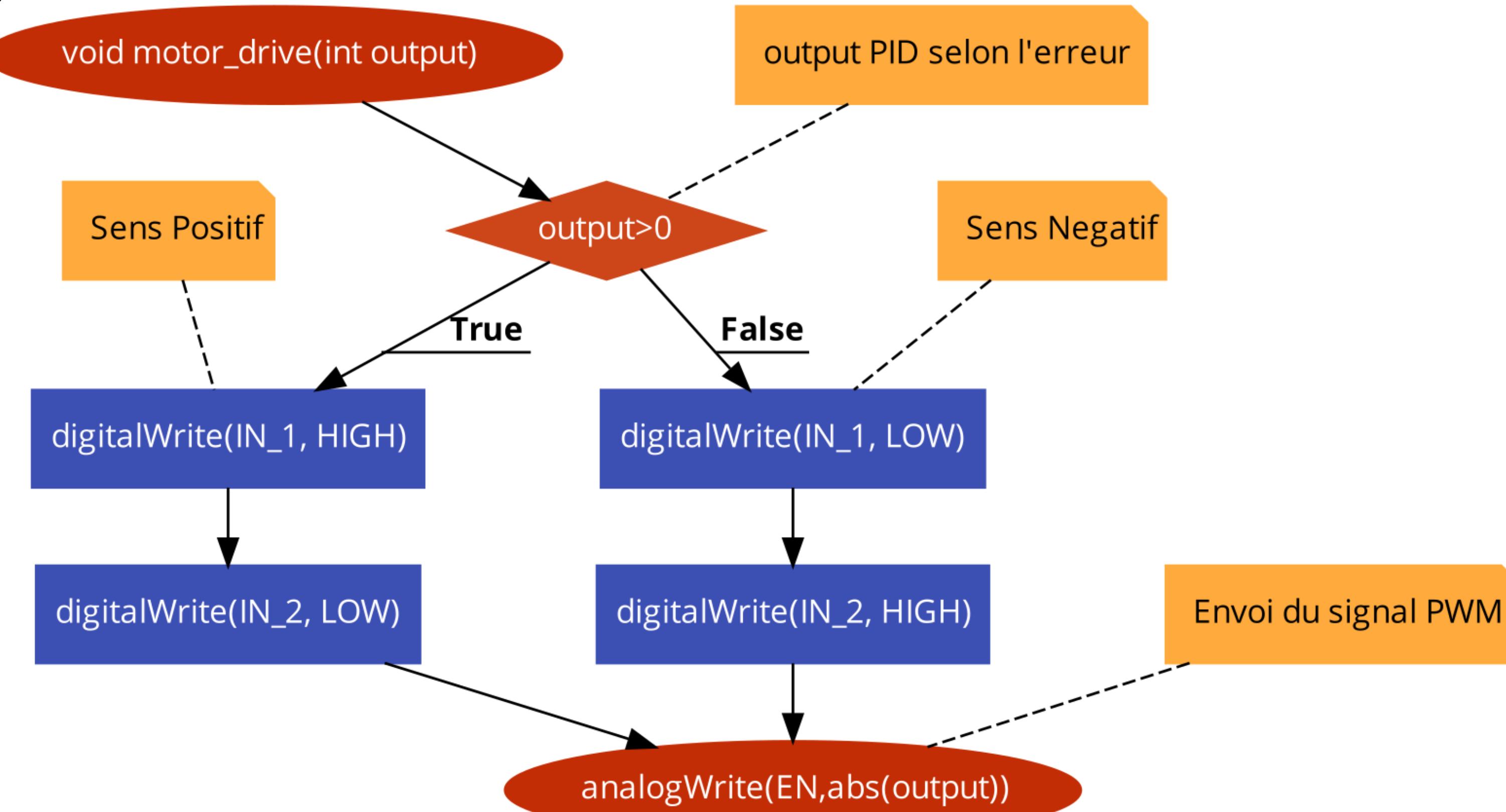
ORGANIGRAMMES ARDUINO

CODE PRINCIPAL

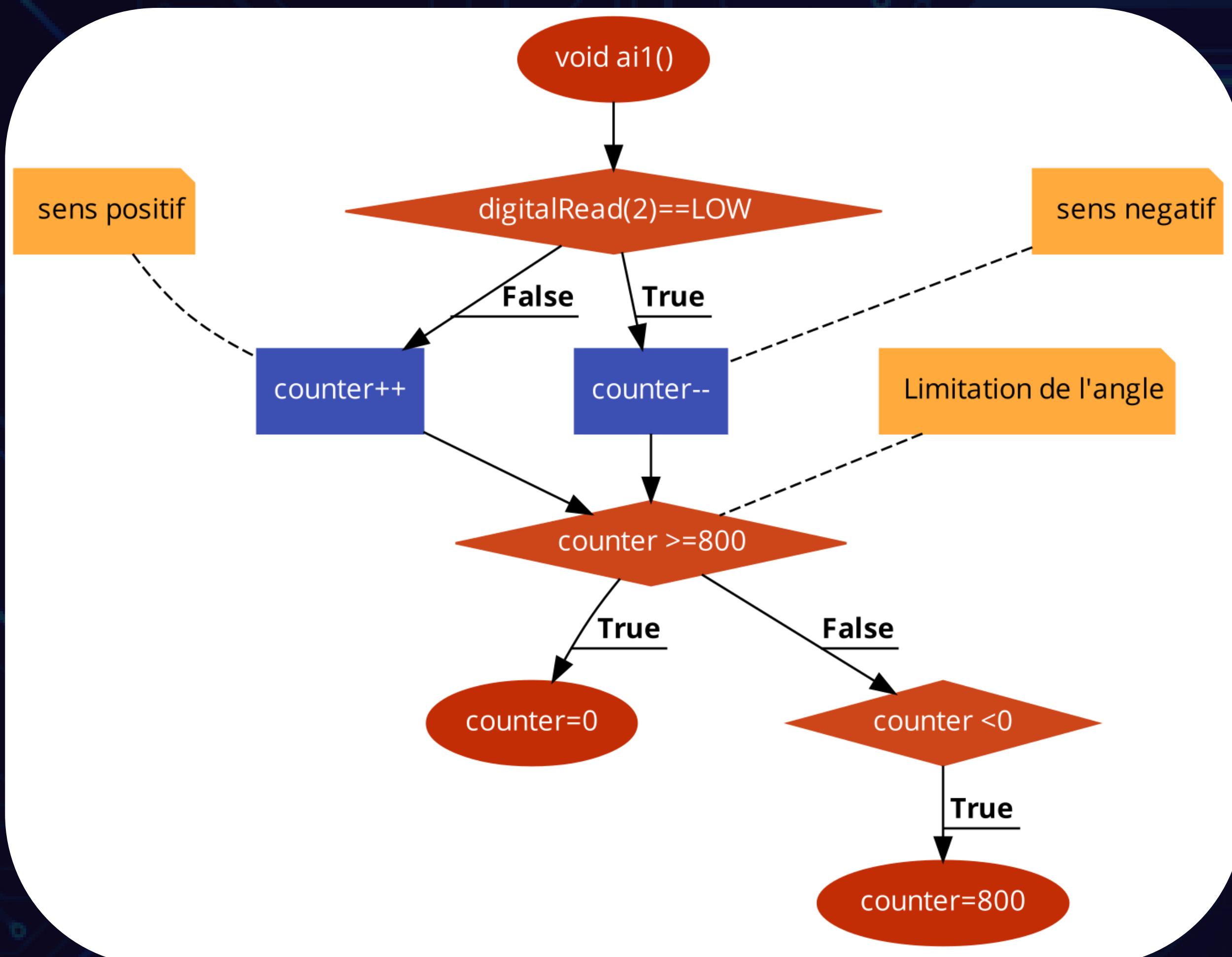
LÉGENDE:



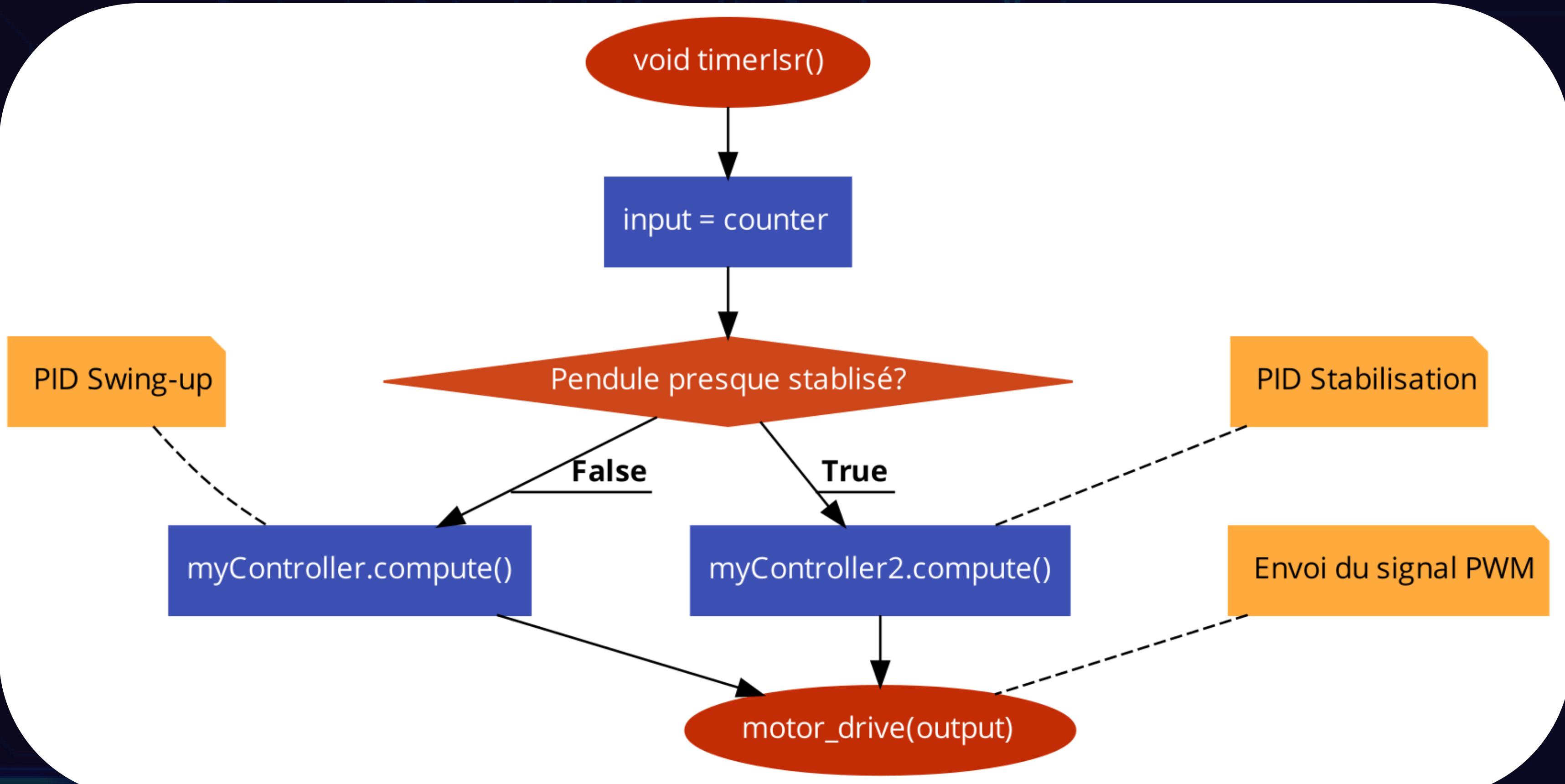
FONCTION SIGNAL DE SORTIE



FONCTION D'INTERRUPTION ENCODEUR



FONCTION D'ECHANTILLONAGE



COMMANDÉ DU SYSTÈME PAR UN RÉGULATEUR LQR

Le régulateur linéaire quadratique (LQR) est une méthode de commande qui permet de concevoir un gain de retour d'état optimal pour minimiser une fonction de coût quadratique. Il est bien adapté pour conserver la stabilité locale et stabiliser le système autour de son équilibre, tout en fournissant un contrôle précis pour effectuer le balancement du pendule.

Le LQR est basé sur les équations de Riccati.

Le principe d'utilisation cette méthode est d'obtenir un signal de contrôle optimal à partir de la rétroaction d'état.

$$u = -K_{lqr}x \quad [2]$$

où K est le vecteur de gain de rétroaction. Le contrôleur peut stabiliser le système en choisissant un gain K qui minimise la fonction de coût quadratique (J).

$$J = \int (x^T Q x + u^T R u + 2x^T N u) dt \quad [3]$$

COMMANDÉ DU SYSTÈME PAR UN RÉGULATEUR LQR

Il faut d'abord déterminer la représentation d'état du système

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{g}{l_{cm}} & 0 & \frac{c_e * c_m}{J_p * R_a} \\ \frac{-g}{l_{cm}} & 0 & -\frac{c_e * c_m}{J_w * R_a} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ -c_m \\ J_p * R_a \\ c_m \\ -J_w * R_a \end{bmatrix}$$

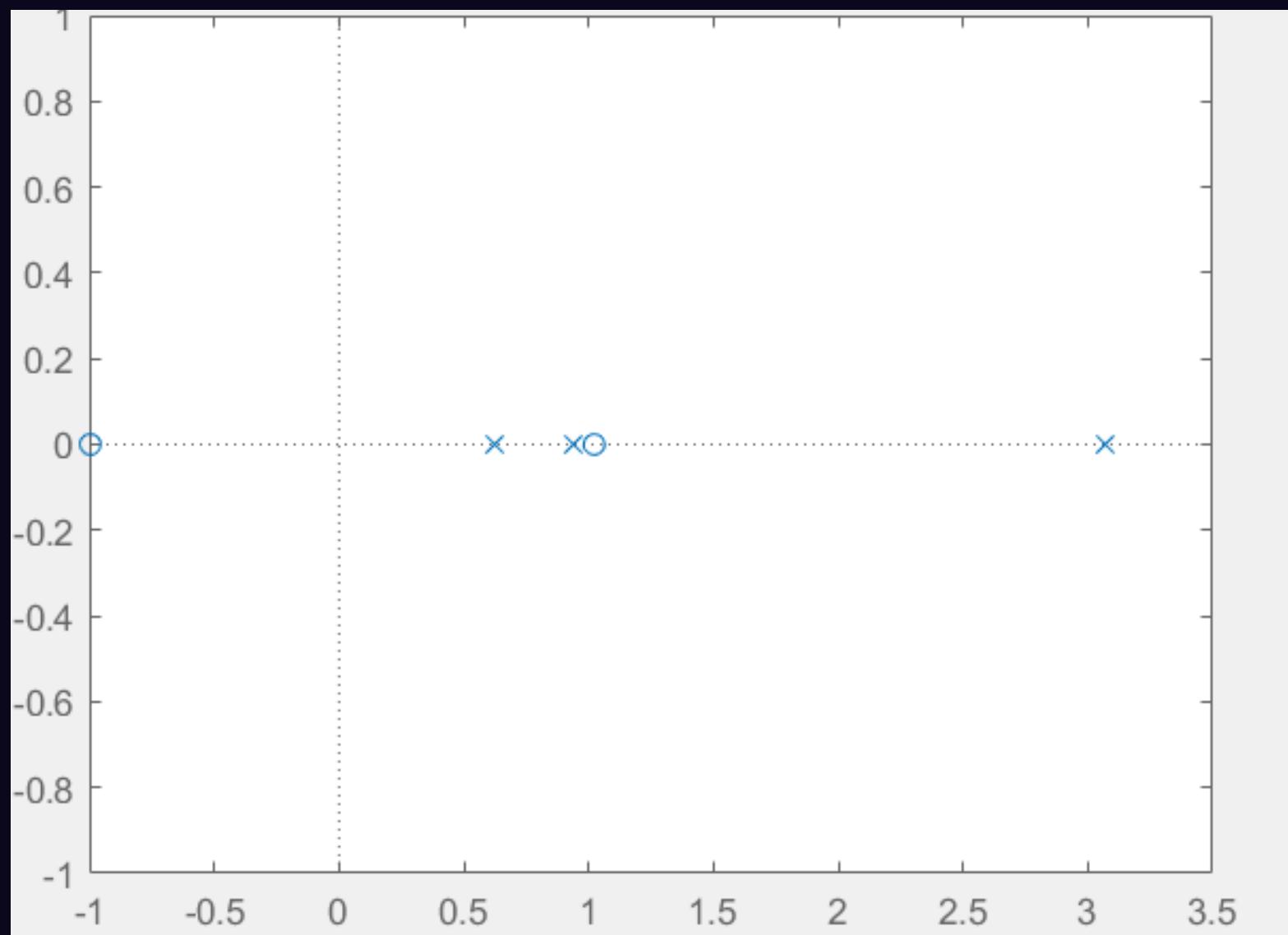
$$C = [1 \quad 0 \quad 0]$$

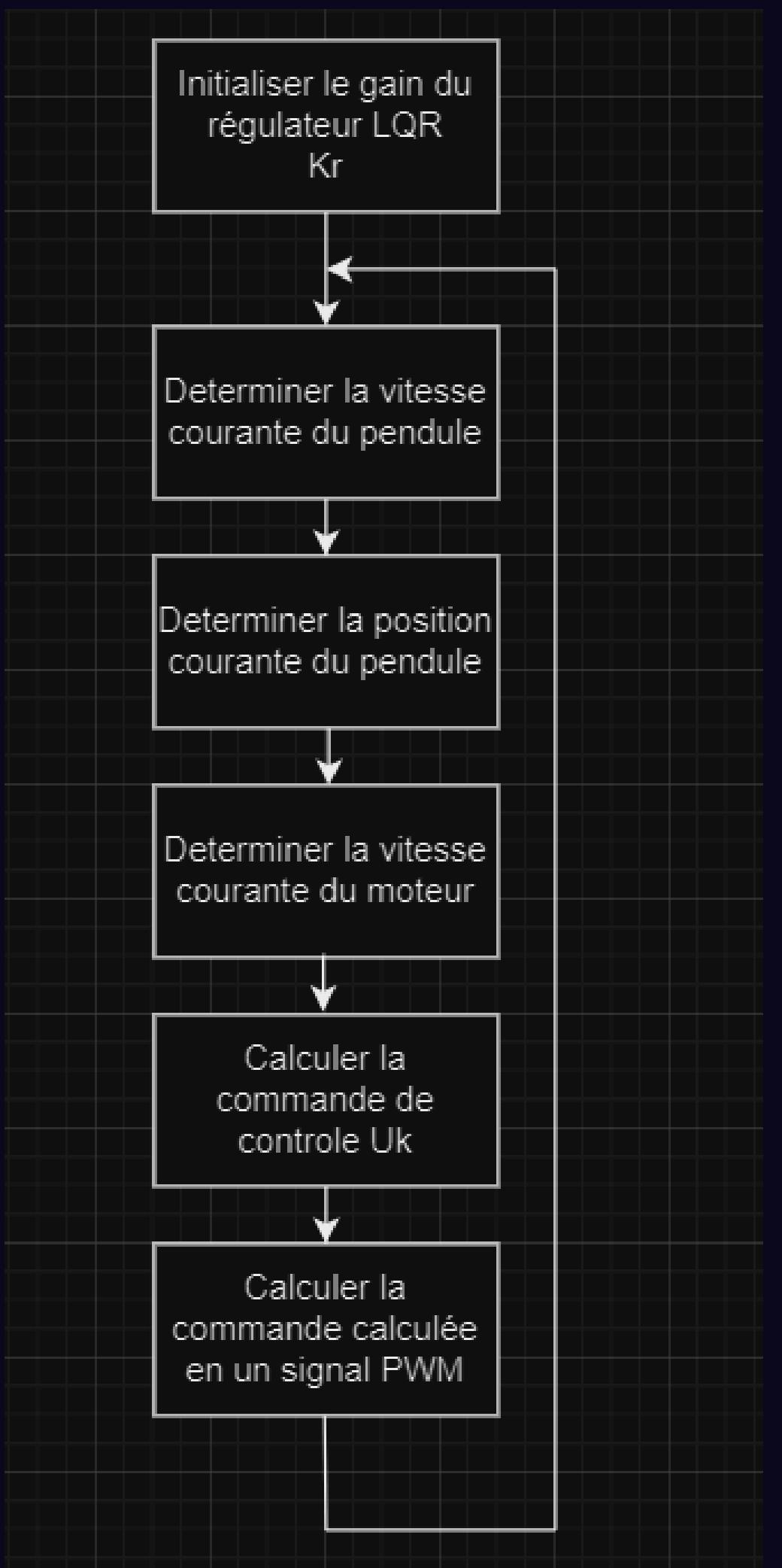
$$D = [0]$$

on injecte ces matrices dans notre code Matlab pour déterminer le gain du régulateur Kr.

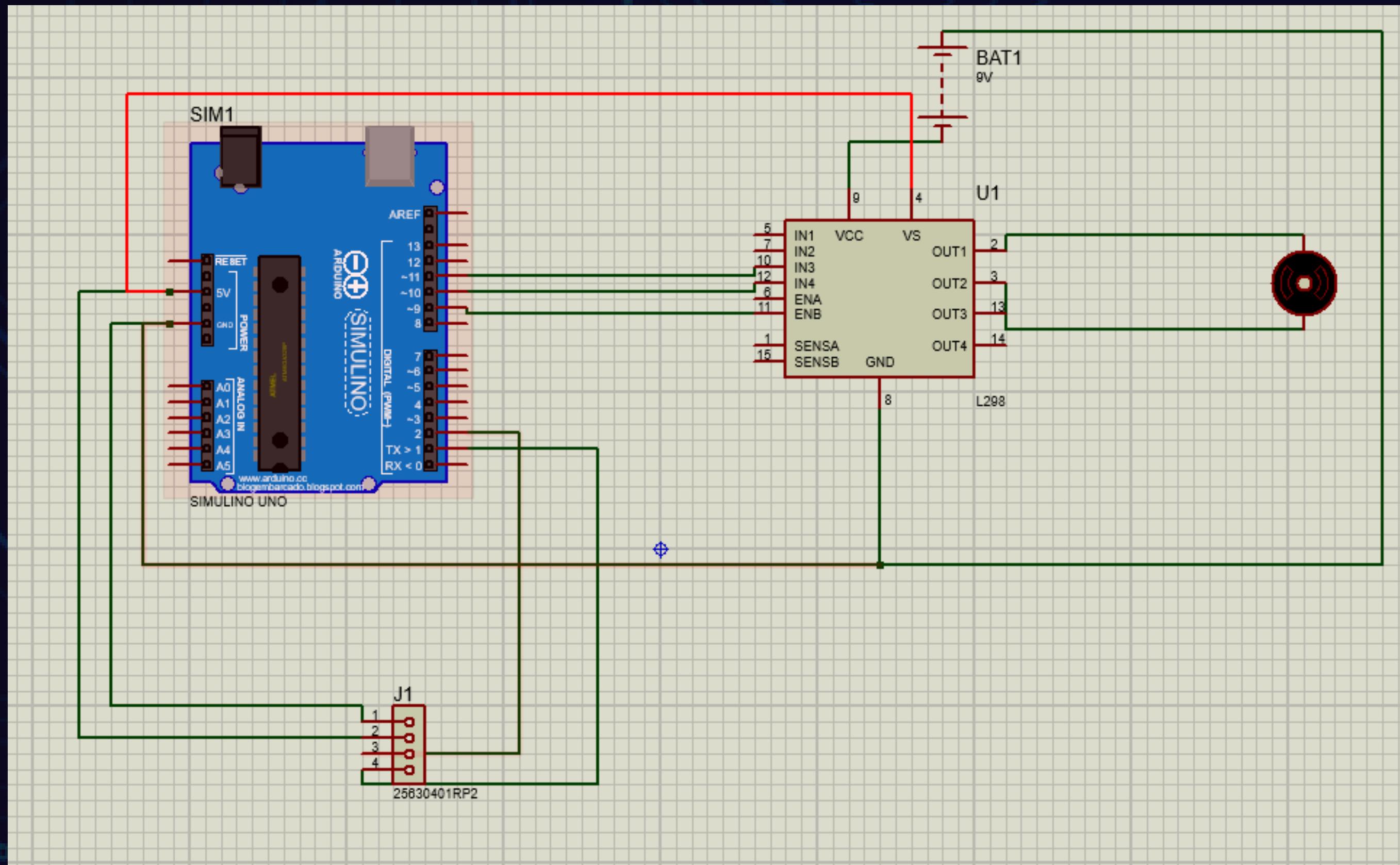
```
Optimal Control Gain (Kr) :  
207.1411    22.5873    0.5742
```

On peut bien voir nos poles injectés :



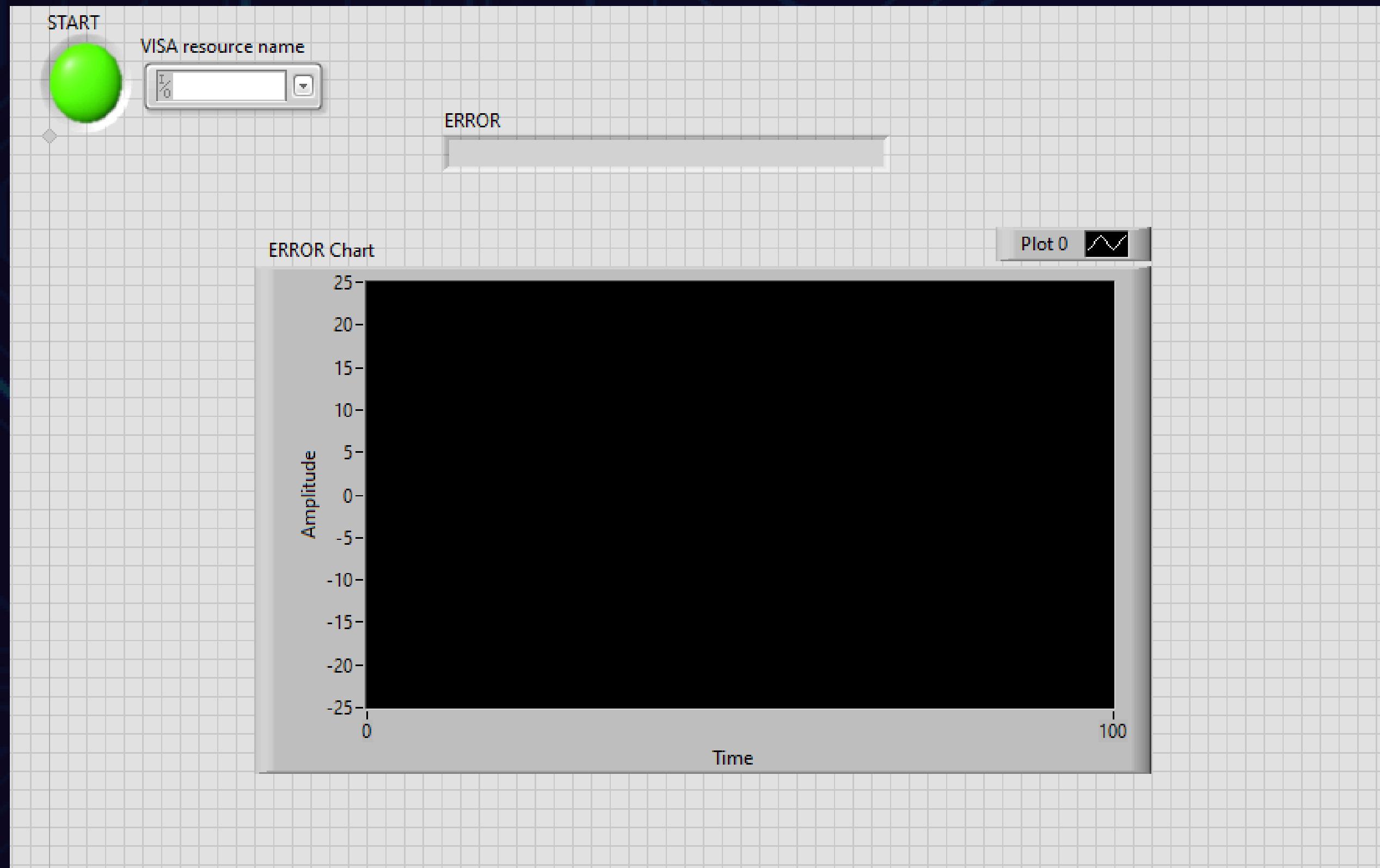


CONCEPTION PROTEUS



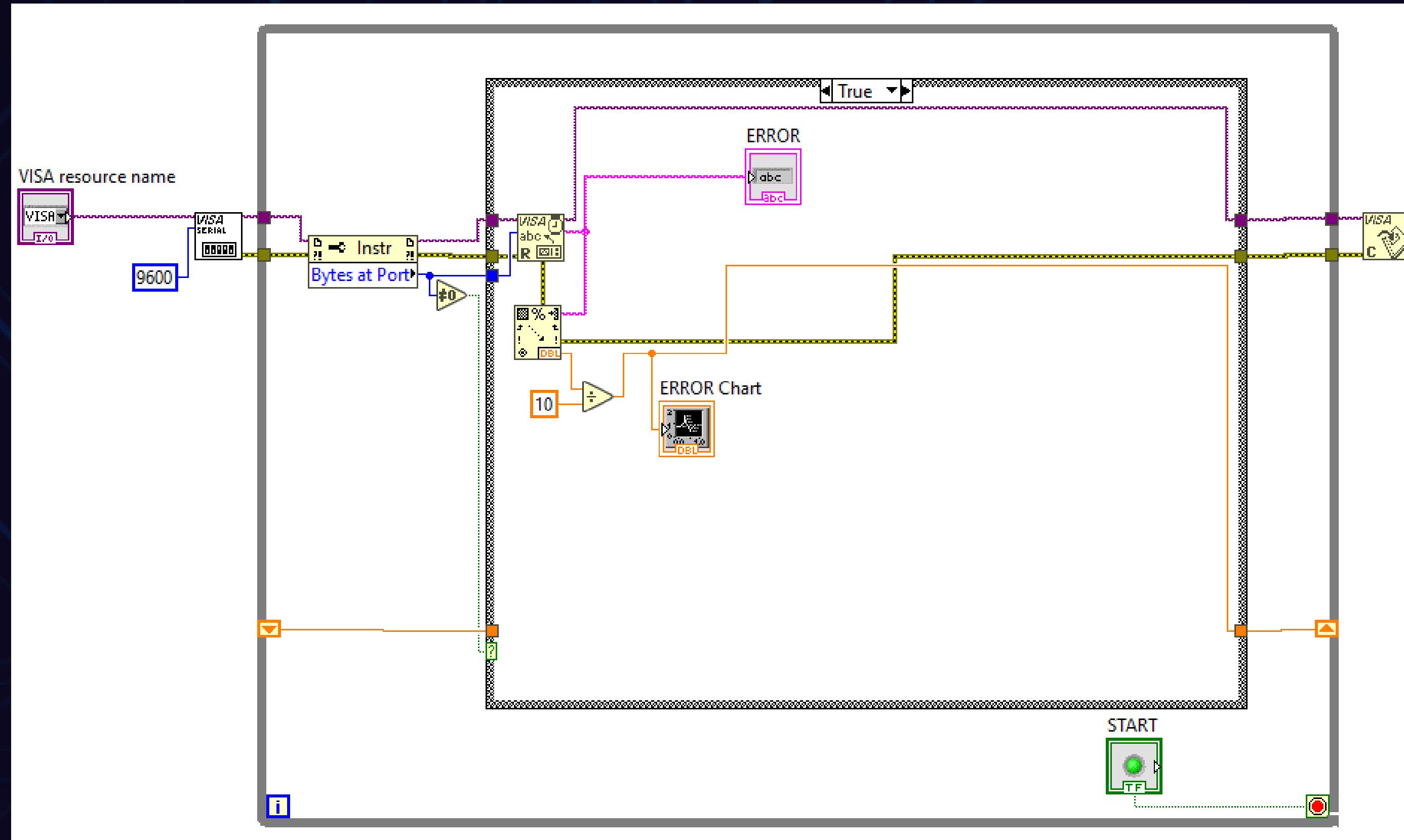
LABVIEW

FRONT PANEL:



LABVIEW

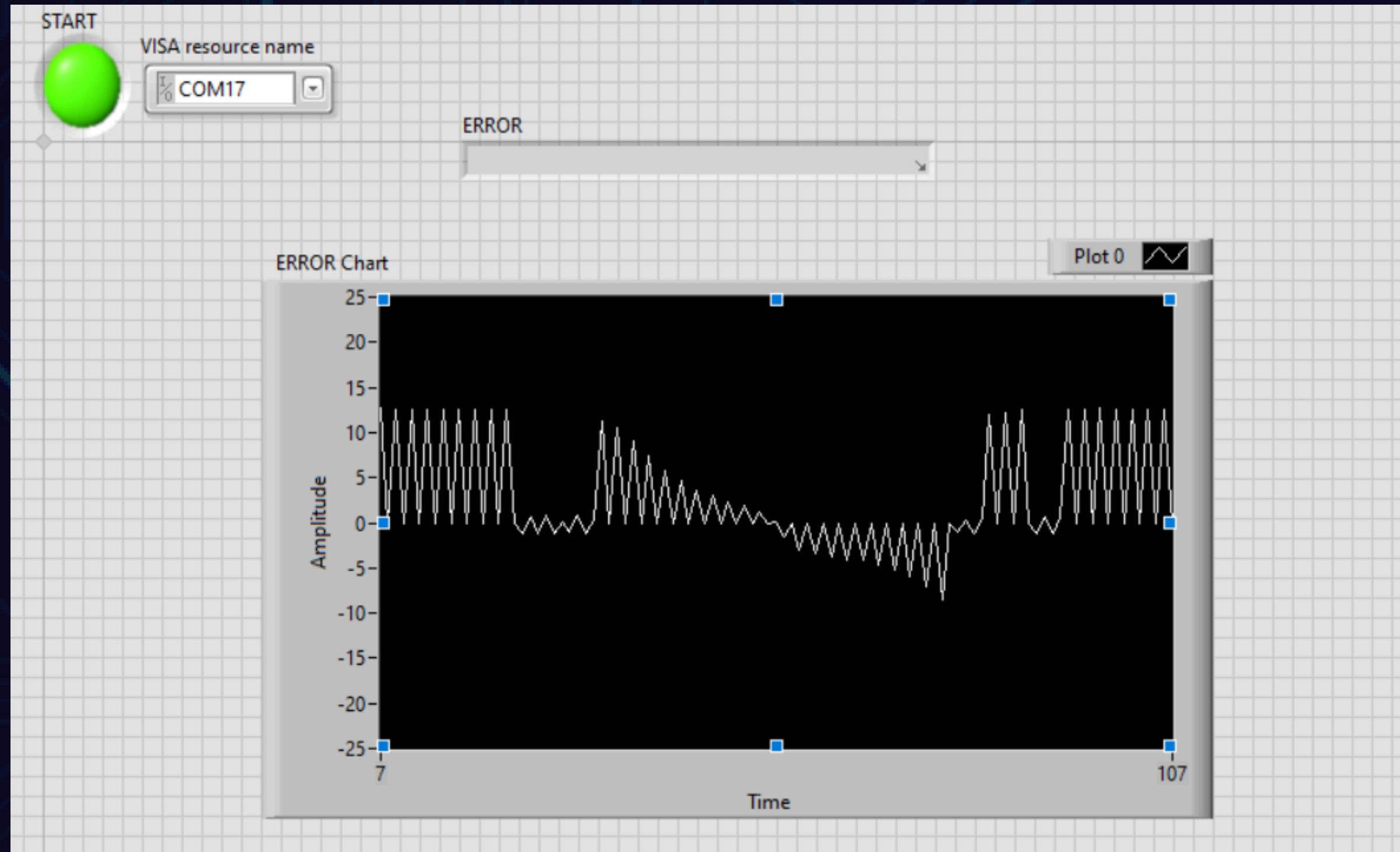
Block Diagram:



RÉSULTATS

RÉSULTATS

Cette charte présente l'erreur: variation entre l'angle de point d'équilibre de pendule 90 degrés (setpoint) (tick 400 pour l'encodeur) et toute autre position du pendule au cours du temps.



CONCLUSION

- Notre projet de pendule à roue d'inertie a été une expérience enrichissante et instructive.
- L'implémentation et l'utilisation d'un régulateur PID sur Arduino nous ont permis d'observer le fonctionnement dynamique du système et d'expérimenter avec différents paramètres de contrôle pour atteindre un équilibre satisfaisant.
- L'intégration de LabVIEW pour la visualisation des données en temps réel a été un outil précieux pour l'analyse et le débogage du système, nous permettant de comprendre les performances du régulateur PID et d'identifier les zones d'amélioration.

- Malgré nos efforts pour réaliser le swing-up et stabiliser le pendule, nous avons rencontré des difficultés pour maintenir un équilibre parfait, soulignant ainsi la complexité du système et les défis réels des projets de contrôle en temps réel.
- Cette expérience nous a également permis de développer nos compétences en matière de conception mécanique et électrique grâce à l'utilisation de logiciels comme SolidWorks et Proteus.

PERSPECTIVES

- Optimisation du Contrôle : Explorer des algorithmes de contrôle avancés pour améliorer la stabilité et la précision.
- Intégration de Capteurs : Ajouter des capteurs pour une meilleure perception de l'environnement.
- Interface Utilisateur Conviviale : Créer une interface graphique conviviale pour la configuration et le contrôle.
- Étude de la Dynamique Non Linéaire : Approfondir la compréhension de la dynamique non linéaire.
- Applications Pédagogiques et de Recherche : Utiliser le pendule comme outil d'apprentissage et de recherche.

Références

- [1] Zhang, L., Yang, Z., & Wang, R. (2018). Inertia Wheel Pendulum Robot Balance Control Based on Double Closed-Loop Control System. 2018 37th Chinese Control Conference (CCC). doi:10.23919/chicc.2018.8483077
- [2] [3] Hidayati, A. N., & Wasiwitono, U. (2021). Modeling and Control of Inertia Wheel Pendulum System with LQR and PID control. 2021 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA). doi:10.1109/isitia52817.2021.9502