



# BRAS DE PELLETEUSE ÉLECTRIQUE

## TP6 – CHOIX D'UN CORRECTEUR

# CHOIX D'UN CORRECTEUR

## I. Introduction

### I.1. Présentation

La pelleteuse électrique autonome est un système didactisé qui s'inspire des évolutions actuelles des engins de chantier, d'une part dans leur changement de pratique en terme d'empreinte environnementale (abandon des moteurs thermiques) et d'autres part dans l'automatisation des tâches (véhicules autonomes).

Le système didactisé reprend uniquement l'ensemble **bras articulé** d'une pelleteuse constitué des 3 sous-ensembles (la **flèche**, le **balancier** et le **godet**) disposant chacun d'un actionneur (vérin électrique) et d'un système de transmission/transformation de mouvement. Le but de la pelleteuse étant de pouvoir remplir le godet d'une charge (terre, graviers, gravats, etc.), la déplacer et enfin la décharger tout en respectant le milieu environnant. De manière traditionnelle, ces actions se font manuellement par une opérateur qui agit sur deux joysticks permettant chacun de commander 2 actionneurs. Dans le cas du système didactisé, l'actionneur lié au mouvement de rotation vertical de la tourelle n'est pas utilisé.

Le banc didactisé dispose de deux mode de fonctionnement :

- **mode réel** : permet d'agir directement sur le bras de la pelleteuse
- **mode simulé** : permet d'agir sur le jumeau numérique dont le comportement est simulé sur ordinateur

Les deux modes peuvent se piloter par le biais des joysticks ou via l'interface de commande.

### I.2. Problématique

Rendre une pelleteuse autonome induit la maîtrise parfaite des mouvements et trajectoires des éléments du bras et du godet. Comme étudié dans d'autres TP, il est donc nécessaire d'asservir chacun des axes (en position angulaire, doublé d'un asservissement en vitesse des actionneurs). Ces asservissement nécessite une adaptation des correcteurs en fonction des types de mouvements à réaliser.

*L'objectif de ce TP est de proposer un type de correcteur pour des commandes en position et en déplacement d'un sous-ensemble (mouvement rencontré lors d'un nivellement par exemple, voir ci-dessous)*

### I.3. Prise en main du système

Après avoir mis en marche le système et placer le système sous mode de commande par joystick depuis le logiciel de commande MyViz.

*Actionner les joysticks suivant différentes inclinaisons et observer les effets sur le mouvement des pièces. Quelle est l'influence du degré d'inclinaison du joystick sur la vitesse de déplacement des vérins électriques ?*

Plus le joystick est incliné plus la vitesse de sortie/entrée du tige du vérin est importante. On observe ainsi une commande proportionnelle en vitesse de déplacement de la tige de chaque vérin.

## 1.4. Réalisation d'opérations classiques

Lors de l'utilisation de la pelleteuse, l'opérateur est amené à réaliser différentes opérations telles que le creusement ou le nivellement.

### Chargement-déplacement-déchargement

Lors des opérations de creusement (excavation, réalisation d'un tranchée, etc.), l'opérateur procède de manière cyclique : mise en position du godet, chargement, déplacement puis déchargement.

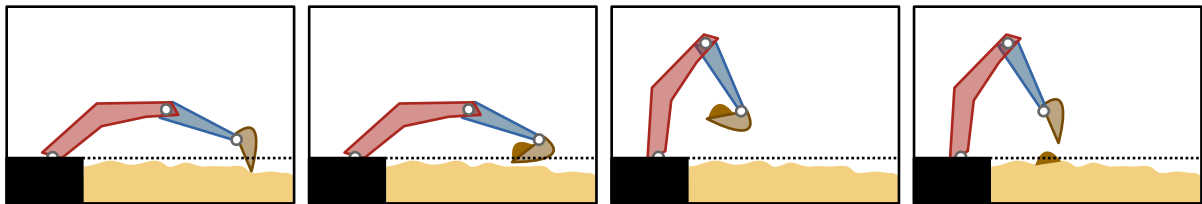


Figure 1: opération de chargement - déchargement

Entraînez vous à réaliser une procédure de chargement, déplacement puis déchargement du godet en évitant de perdre le chargement en route.

### Après avoir réalisé quelques cycles, quelles sont les difficultés rencontrées ?

La difficulté réside dans la manipulation synchronisé des 2 joysticks pour imposer le déplacement du godet (via le vérin de flèche (joystick droit haut/bas) et de pénétration (joystick gauche haut/bas). À cela, s'ajoute une difficulté supplémentaire, la gestion du 3<sup>e</sup> axe pour maîtriser l'orientation du godet (joystick droit gauche/droite).

### Nivellement

L'opération de nivellement consiste en un déplacement vertical ou horizontal du godet permettant de définir des contours plans de la zone en travaux. Seul le fond ou la lame du godet est alors en contact avec le sol.

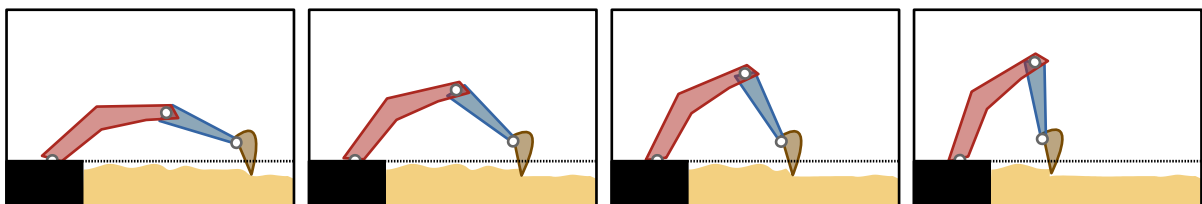


Figure 2: opération de nivellement

### Essayer de déplacer le godet suivant une trajectoire rectiligne horizontale ou verticale, quelles sont les difficultés rencontrées ?

La réalisation d'une trajectoire imposée, ici en ligne droite, impose une coordination plus poussée dans le déplacement synchronisée des vérins de flèche et de pénétration. La difficulté est augmentée si l'on veut s'assurer d'une orientation constante du godet.

## 1.5. Premiers essais

Le logiciel MyViz, avec son tableau de bord **Pelleteuse\_Asservissement**, permet d'envoyer des consignes de positionnement aux différents sous-ensembles du bras de pelleteuse et de tracer, lors du mouvement, l'évolution de la consigne et de l'orientation mesurée des sous-ensemble flèche ( $\gamma_1$ ), de pénétration ( $\gamma_2$ ) et de cavage ( $\gamma_3$  pour le godet).

Le correcteur sera réglé tel que  $K_p=1$ ,  $K_i=0$ ,  $K_d=0$  et  $V_{max}=10$  mm/s (voir ci-dessous)

Choisir la **Flèche** comme sous-ensemble à piloter et définir une consigne de type **Trapèze** avec une **amplitude de 5°** autour de la **position 50° (offset)** avec des **temps de montée et de descente de 2,5s**, une **largeur de 5s** et enfin, une **fréquence de 0,05Hz** (voir ci-dessous).

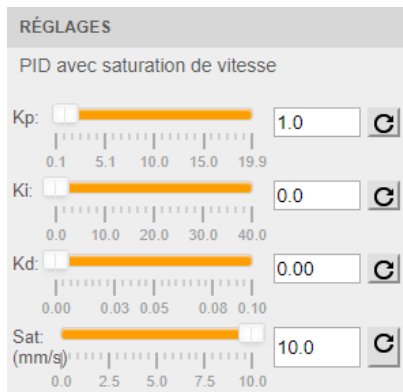


Figure 3: Réglage des paramètres du correcteur

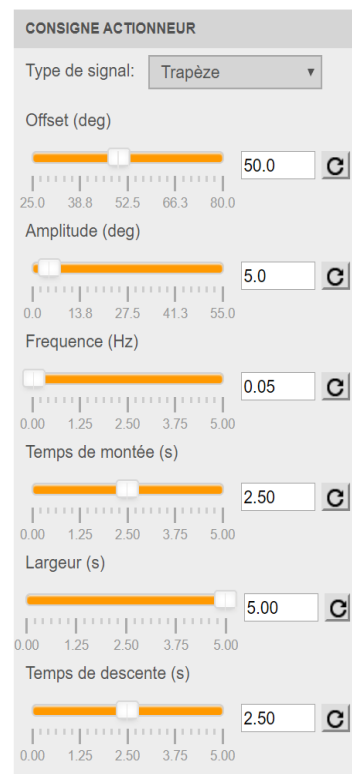
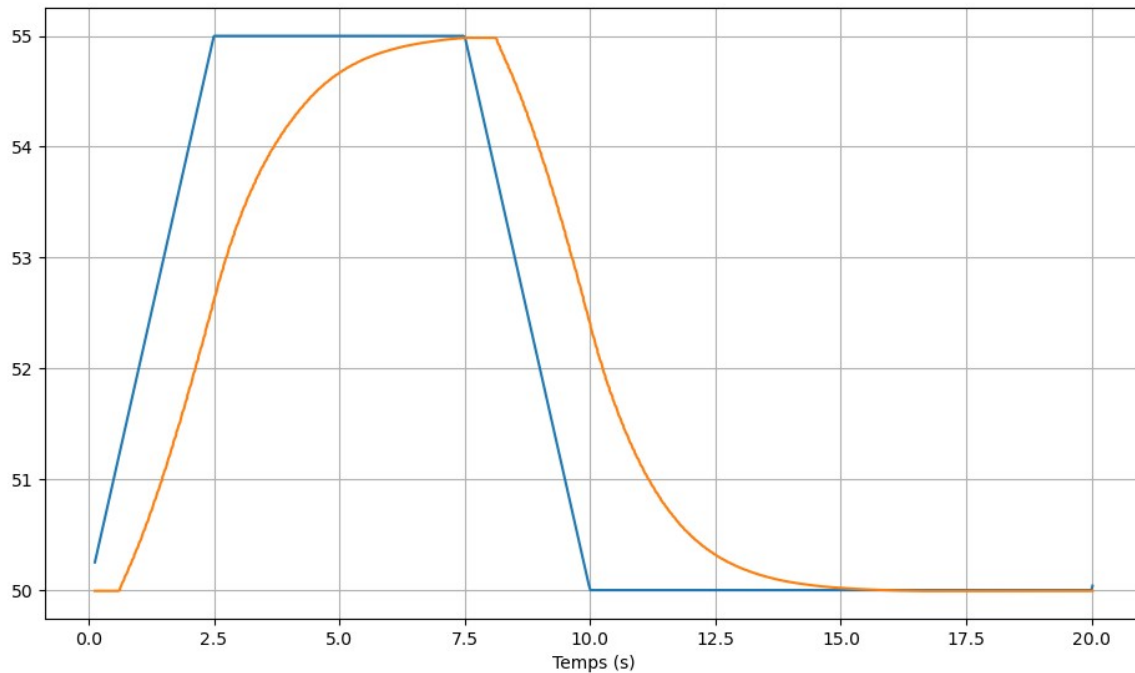


Figure 4: Paramètres de réglage de la consigne

Activer alors la consigne. Une fois le mouvement terminé, passer le bouton « activer les consignes » sur OFF. Pour visualiser le résultat de mesures, vous pouvez utiliser le bouton « Tracer » à gauche de la fenêtre, choisir alors le signal *consigne flèche (deg)* et *gamma1 (deg)*.

**Caractériser les performances du comportement de la flèche asservie en position angulaire mais non corrigée ( $K_p=1$ ). D'autres consignes peuvent être appliquées pour caractériser pleinement le comportement de la flèche.**

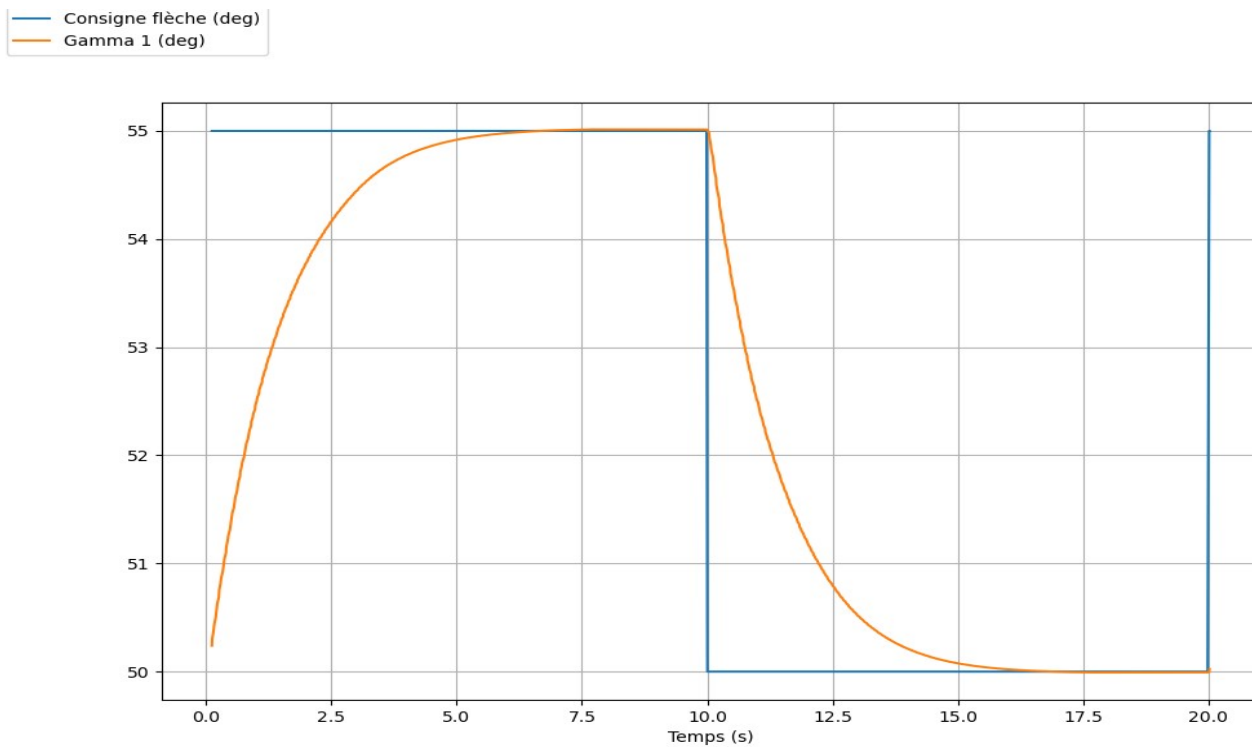
— Consigne flèche (deg)  
— Gamma 1 (deg)



Le **plateau** présent au démarrage montre un **non linéarité de type seuil**, confirmée par le **plateau** qui débute au moment de la descente ( $t=7,5s$ ). Le gain  $k_p$  étant faible, l'écart de position angulaire n'est pas suffisamment important pour générer une tension d'alimentation du moteur qui permette de mettre en mouvement le bras.

L'erreur statique est proche de 0, mais on observe sur la phase de montée ou de descente une erreur de traînage qui semble augmenter avec le temps.

En imposant un **signal carré en consigne** (image ci-dessous), on peut montrer que le temps de réponse à 5 % de la flèche est d'environ 4 s ce qui n'est pas très rapide.



*Dans le cas d'un fonctionnement en mode autonome de la pelleteuse, quels sont les conséquences de ces performances sur les travaux réalisés (excavation et nivellement) ?*

Deux performances semblent ne pas être en cohérence avec un travail bien fait :

**L'erreur de trainage :** lors d'un déplacement à vitesse imposée, le système prend de plus en plus de retard dans le suivi de la consigne. Si ce retard n'est pas pris en compte dans le mode autonome, le risque serait de demander d'imposer l'action suivante alors que le godet n'est pas dans la bonne position (risque de creuser ailleurs, d'endommager l'environnement (percer une canalisation par exemple), ...

**La rapidité :** les conséquences de cette performance sont liées à la précédente. Si le système met du temps à réaliser un déplacement imposé et que ce temps n'est pas pris en compte, alors la commande d'une action future se fera avec un bras qui n'est pas à la bonne position. Si ce temps est pris en compte dans la commande autonome de la pelleteuse pour éviter ces défauts, le temps de réalisation des tâches sera largement amplifié entraînant une baisse de la productivité.

## II. Correction proportionnelle

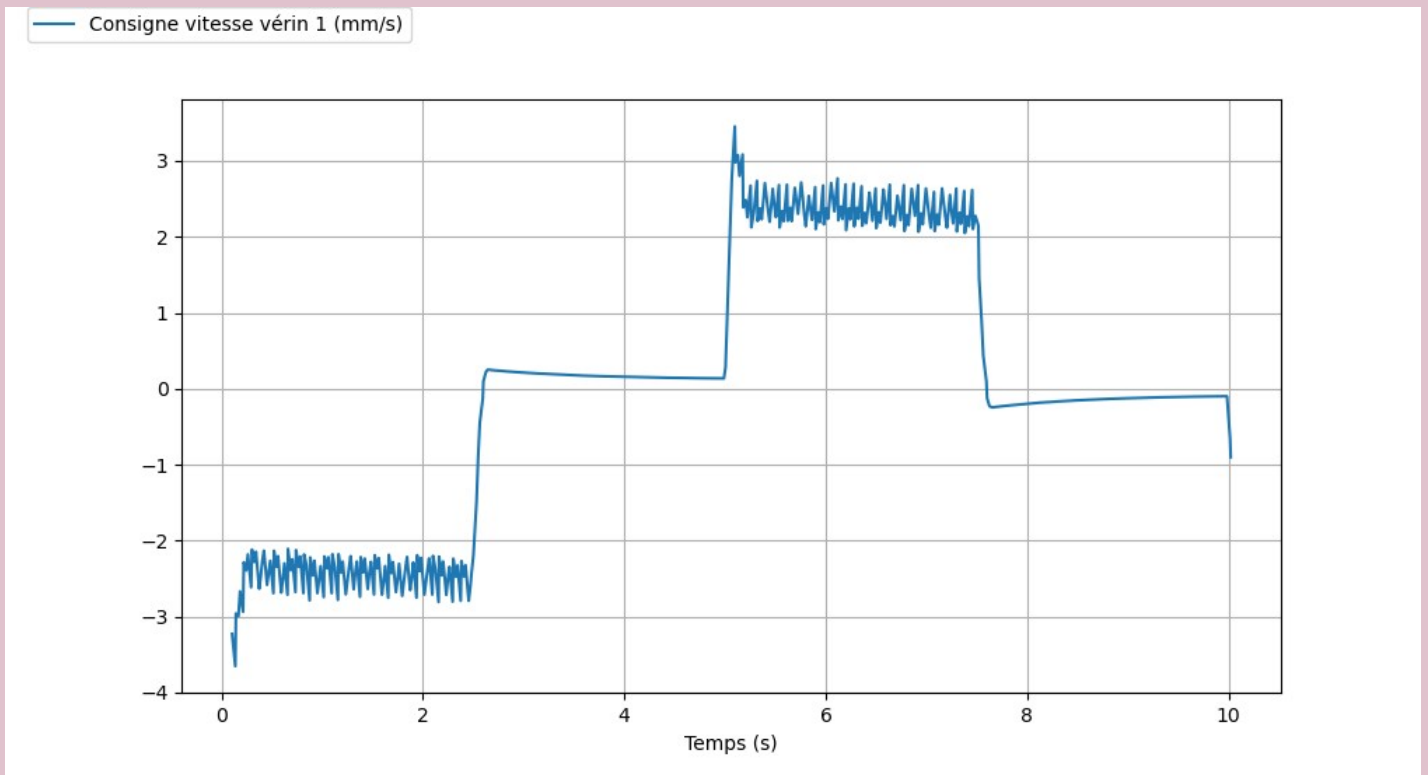
Les résultats précédents montrent qu'il est nécessaire de corriger l'asservissement du sous-ensemble flèche afin d'améliorer ses performances dans le but de réaliser des travaux d'excavation ou de nivellement les plus précis possible.

Pour la même consigne en trapèze (*Figure 4*), réaliser d'autres essais avec un gain  $K_p$  différent (on pourra prendre 5, 10 et 20 par exemple).

*Quelles sont les influences de la valeur du gain du correcteur proportionnel sur le comportement du système.*

L'augmentation du gain  $K_p$  rend le système beaucoup plus performant avec une suppression du seuil au démarrage et un temps de réponse qui diminue très rapidement.

Toutefois, cette augmentation engendre une **instabilité du système** qui peut être observée par l'évolution temporelle de la consigne de vitesse (sortie du correcteur)



*Comment peut-on expliquer la présence d'une erreur statique pour de faibles valeurs du gain  $K_p$  ? Est-elle compatible avec la modélisation de l'asservissement retenue ci-dessous ? Justifier.*

Pour de faibles valeurs de  $K_p$  (1 par exemple), l'écart de position n'est pas suffisamment amplifié pour générer une commande au vérin suffisamment importante pour lui permettre de déplacer l'ensemble du bras (effet de la gravité, frottements dans les liaisons etc.).

La **présence d'un intégrateur** dans la boucle ouverte devrait assurer une erreur statique nulle, mais dans le cas d'un système linéaire continu et invariant, or ici, le système n'est pas linéaire (seuil)

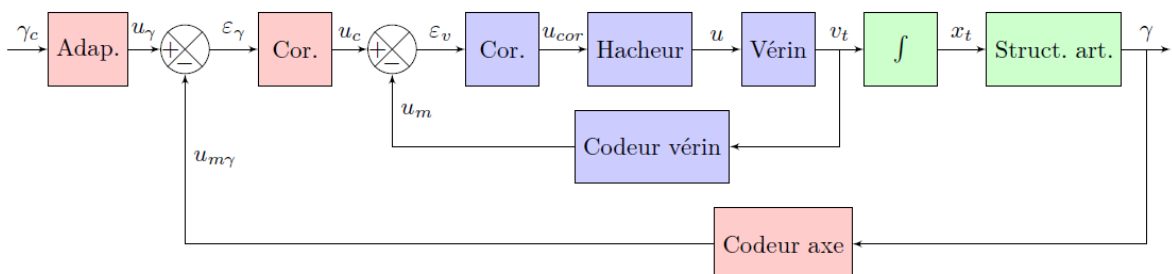


Figure 5: Modélisation de l'asservissement en position angulaire d'un sous-ensemble

### III. Correction proportionnelle intégrale

Le choix du correcteur proportionnel ne permet pas d'annuler l'erreur de traînage. Cette partie va permettre d'analyser l'influence d'une correction intégrale sur les performances du comportement de la flèche.

#### III.1. Conséquences d'une erreur de traînage

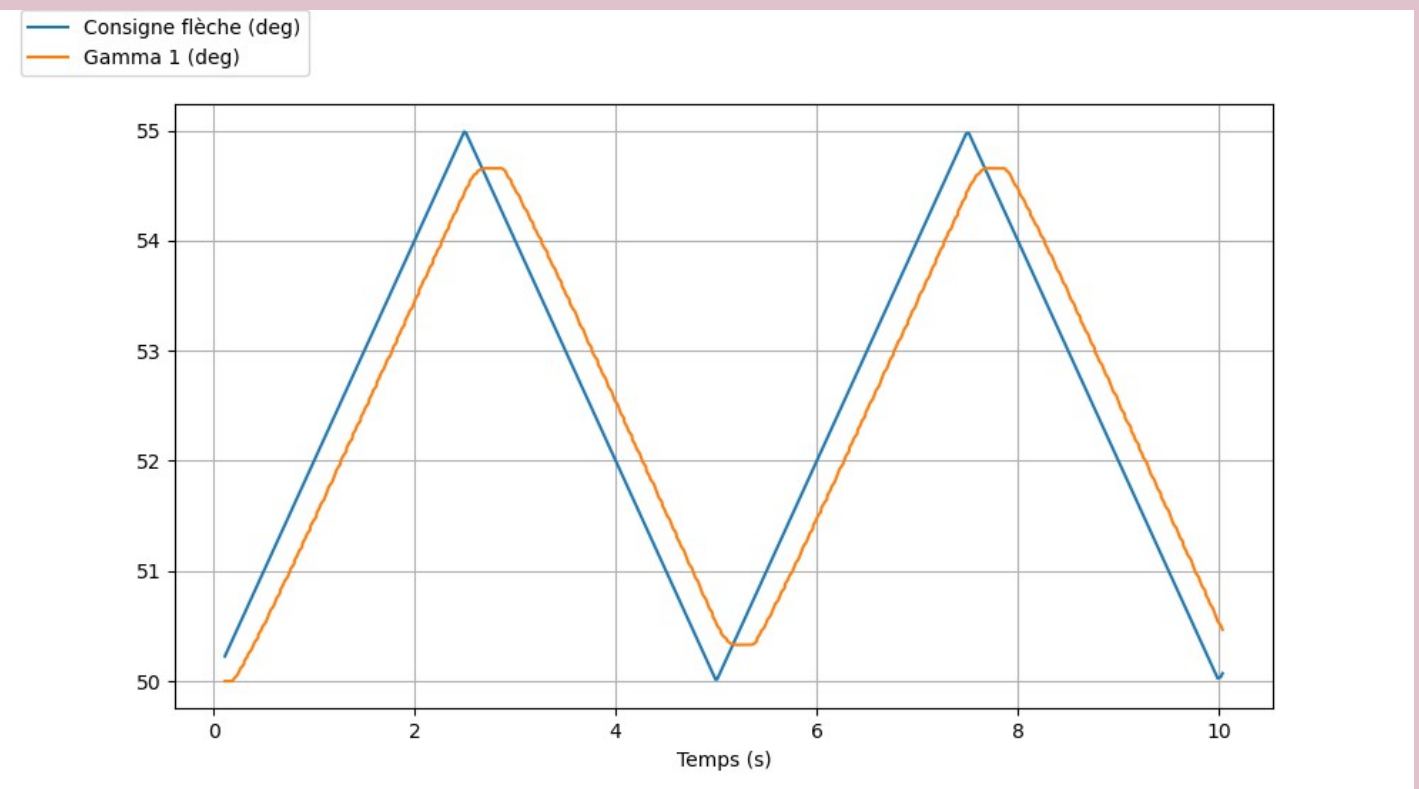
Reprendre un correcteur proportionnel de gain  $K_p=5$  (on supprime ainsi la présence de non-linéarité (seuil) pour de petites valeurs de consigne et on s'assure un gain suffisamment élevé pour que le bras puisse se déplacer même pour de petites amplitudes de consignes).

Définir une consigne de type Triangle autour de  $50^\circ$  (offset), avec une amplitude de  $5^\circ$ , des temps de montée et descente de 2,5s et une fréquence de 0,2Hz.

Pour quel type de travaux cette consigne (évolution constante de l'angle) pourrait-elle correspondre ?

Ce type de consigne, déplacement à vitesse constante pourrait très bien s'associer à une opération de nivellement où il faut que le godet parcourt une trajectoire imposée.

Analyse les résultats expérimentaux et déterminer les conséquences sur la qualité des travaux introduites par l'erreur de traînage.



Pour cet essai,  $k_p=5$ , le godet n'atteindra pas les positions extrêmes demandées, ainsi, le nivellement ne se fera pas au bon endroit (l'erreur angulaire induit une erreur de position du godet) et sur une amplitude plus petite. On peut aussi supposer que la trajectoire rectiligne ne sera pas suivie par le godet (en couplant le comportement de la flèche à celui du balancier)

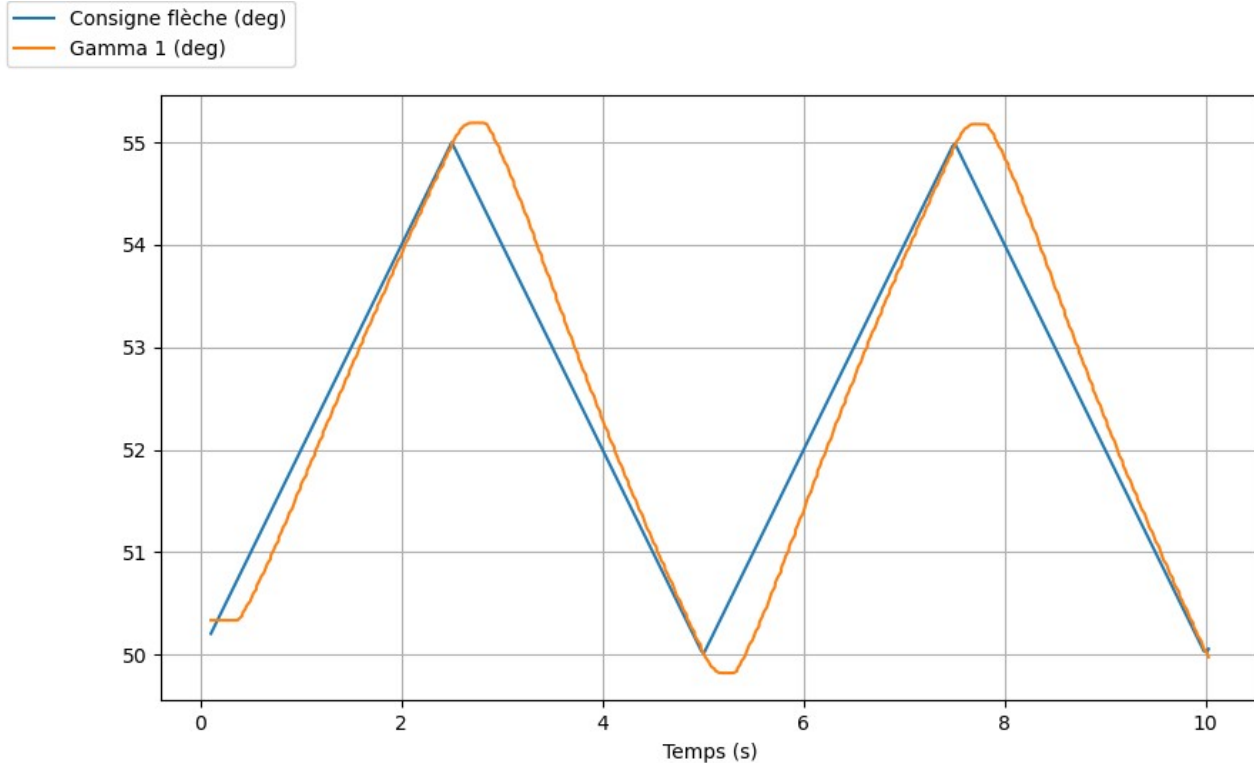


### III.2. Annulation de l'erreur de traînage

Avec la même consigne en Triangle et avec le même gain proportionnel  $K_p=5$ , réaliser un essai pour une valeur de  $K_i=5$ .

*L'erreur de traînage est-elle annulée ?*

*Quelle performance semble être dégradée ? Quelle est sa conséquence sur les travaux réalisés ?*



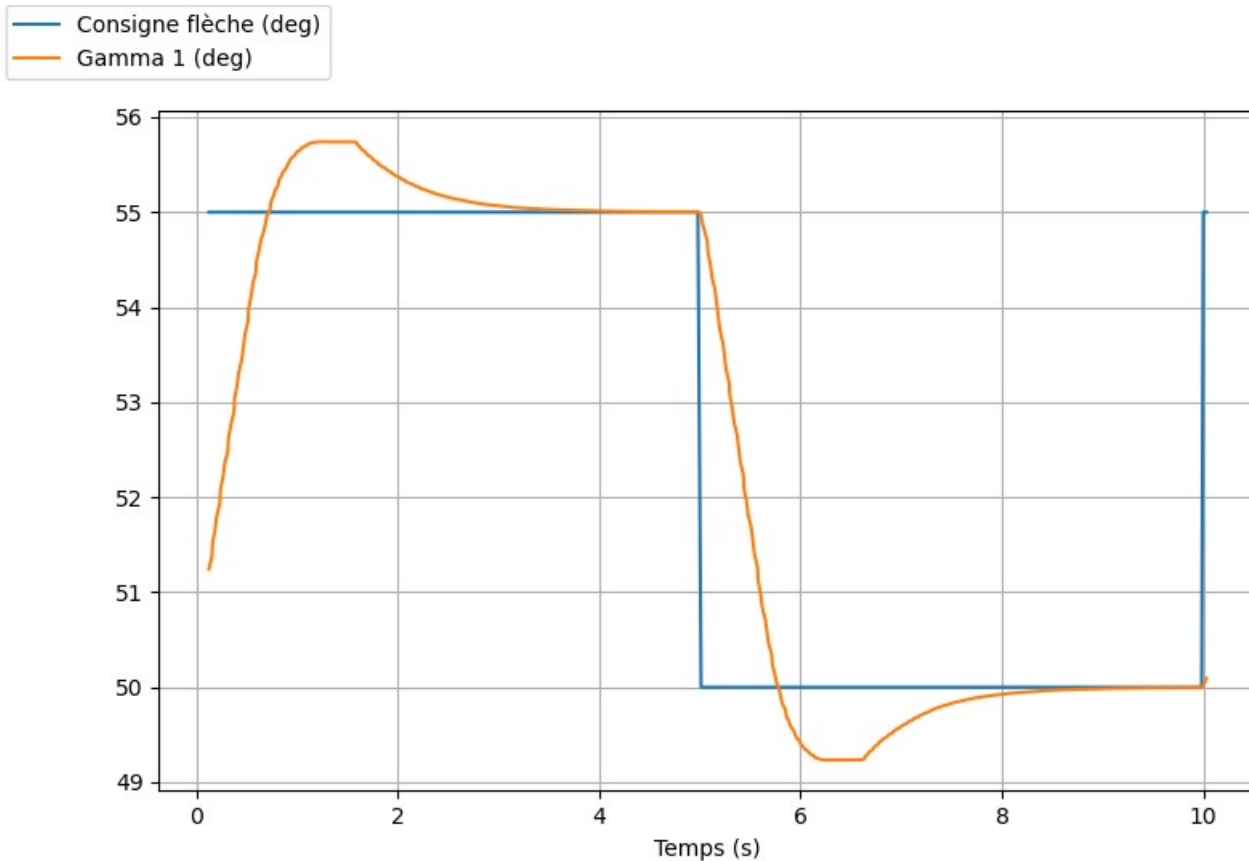
L'erreur de traînage est annulée.

Par contre, on observe un dépassement des valeurs de consignes. Le nivellement se fera sur une amplitude plus grande mais aussi à une position au-delà de celle imposée (risque d'endommagement)

En conservant le même réglage du correcteur, imposer maintenant une consigne Rectangle (offset=50°, amplitude=5°, fréquence=0,1Hz et rapport cyclique=50%).

*Pour cette consigne en échelon, déterminer les performances du comportement de la flèche.*

*Quelles sont les conséquences du dépassement sur la qualité des travaux ?*



La prise en compte d'un intégrateur dans le correcteur montre l'apparition de dépassements et une augmentation (logique) du temps de réponse. La qualité des travaux sera donc affectée : les dépassements de position peuvent être dangereux et le temps de réponse trop long peuvent engendrer des défaut de positionnement s'ils ne sont pas pris en compte dans un mode autonome ou une dégradation de la productivité.

#### IV. Correcteur proportionnel-intégral-dérivé

Les résultats précédents ont introduit la dégradation d'une performance qui n'apparaissait pas avec le correcteur proportionnel. Comme souvent, il faut choisir le bon compromis et assumer le fait que toutes les performances ne peuvent pas forcément être atteintes de manière optimale.

Avec le même signal de consigne en Trapèze (Figure 4), pour une correction proportionnelle  $K_p=5$ , intégrale  $K_i=10$ , réaliser des essais pour différentes valeurs de correction dérivée en modifiant le paramètre  $K_d$ .

*Déterminer l'influence de la valeur de  $K_d$  sur les performances.*

*Conclure sur un choix possible de correcteur en fonction de contraintes liées à la qualité des travaux que vous jugerez cohérentes de retenir.*