Durée de l'épreuve : 2h00
Aucun document autorisé - Calculatrice autorisée

Les réponses se feront exclusivement sur le document réponse – Aucun autre document ne sera corrigé.

Simulateur de moto[1]

Les usagers de deux-roues motorisés sont soumis à un risque accru d'accidents en comparaison aux autres catégories d'usagers. Dans le but de réduire ce risque, la simulation de conduite offre une nouvelle opportunité pour appréhender le comportement des conducteurs dans un cadre sécuritaire et constitue un outil alternatif pour la formation à la conduite.
L'objectif de la simulation de conduite est de stimuler le conducteur afin de donner l'illusion d'une conduite sur un véhicule réel. Cette illusion est un phénomène complexe qui met en jeu les capteurs proprioceptifs de l'être humain[2].



Figure 1 : Chute de moto

Concevoir un simulateur nécessite de faire des compromis entre la fidélité de la reproduction perceptive et le coût global de l'architecture proposée. Jouer sur la stimulation conjointe des différents systèmes de perception permet d'augmenter l'illusion de mouvement.

1. Présentation du simulateur

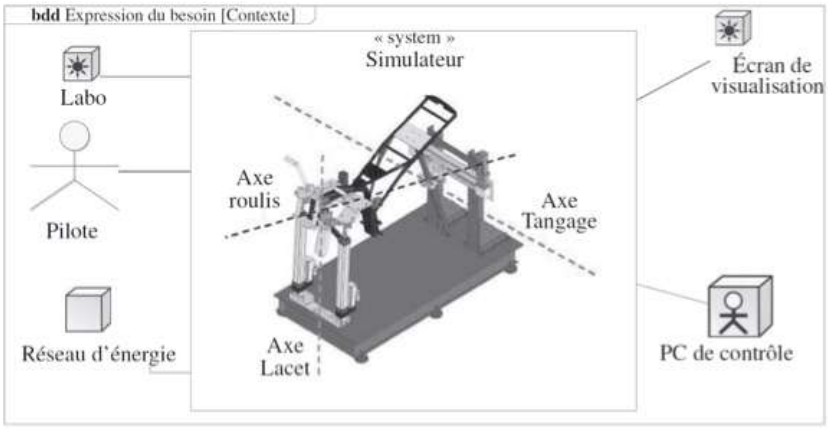
Le simulateur étudié, conçu par l'IFSTTAR (Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux), est un simulateur à plateforme mobile (Figure 2a). Afin de restituer les sensations de mouvement aux utilisateurs du simulateur, trois degrés de liberté ont été privilégiés (Figure 2b) :

- le **roulis**, c'est le mouvement le plus important dans la dynamique de la moto. Ce degré de liberté est essentiel à la stabilisation et au guidage du véhicule. Il intervient surtout dans la simulation de manœuvres de prise de virages, de slalom et de changement de voie ;
- le **tangage**, ce mouvement est utilisé pour restituer une partie de l'accélération longitudinale ressentie lors des phases d'accélération et de freinage, celui-ci étant accompagné d'un mouvement de plongée de la fourche ;
- le **lacet**, ce mouvement a été sélectionné spécifiquement pour reproduire le dérapage de la roue arrière de la moto comme dans le cas de situations classiques de danger.

La plateforme du simulateur (Figures 2 et 3) se compose essentiellement d'un bâti métallique fixe et d'un châssis de moto mobile.



(a) Simulateur Ifsttar



(b) Diagramme de contexte

Figure 2 : Simulateur de moto

1. Adapté de CCINP PSI 2019
2. Les capteurs proprioceptifs permettent la perception, consciente ou non, de la position des différentes parties du corps.

Maxime NAJDA

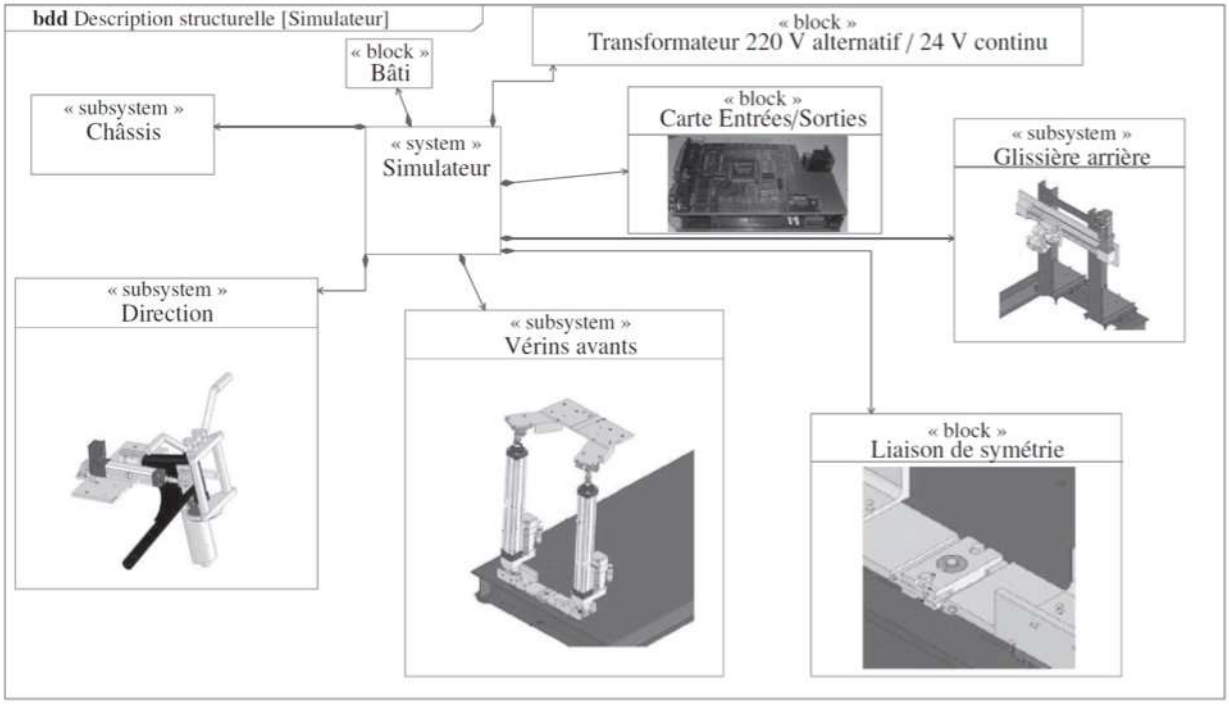


Figure 3 : Diagramme de définition des blocs

Les deux sous-systèmes « vérins avants » et « glissière arrière » permettent de générer les mouvements de roulis, tangage et lacet du châssis de la moto par rapport à la structure fixe. Le sous-système « liaison de symétrie » sert à imposer une contrainte de déplacement symétrique de deux pivots mobiles qui lient les deux vérins au bâti.
Deux systèmes de rendu d'effort sont installés sur le guidon. Le premier crée un déplacement linéaire du guidon par rapport à la selle afin de donner l'illusion des effets dynamiques d'une accélération ou d'un freinage. Le deuxième génère un couple sur le guidon afin de simuler les efforts résistants du contact pneu- sol lors d'une manœuvre.
Le diagramme des exigences (Figure 4) liste quelques performances attendues par le système.

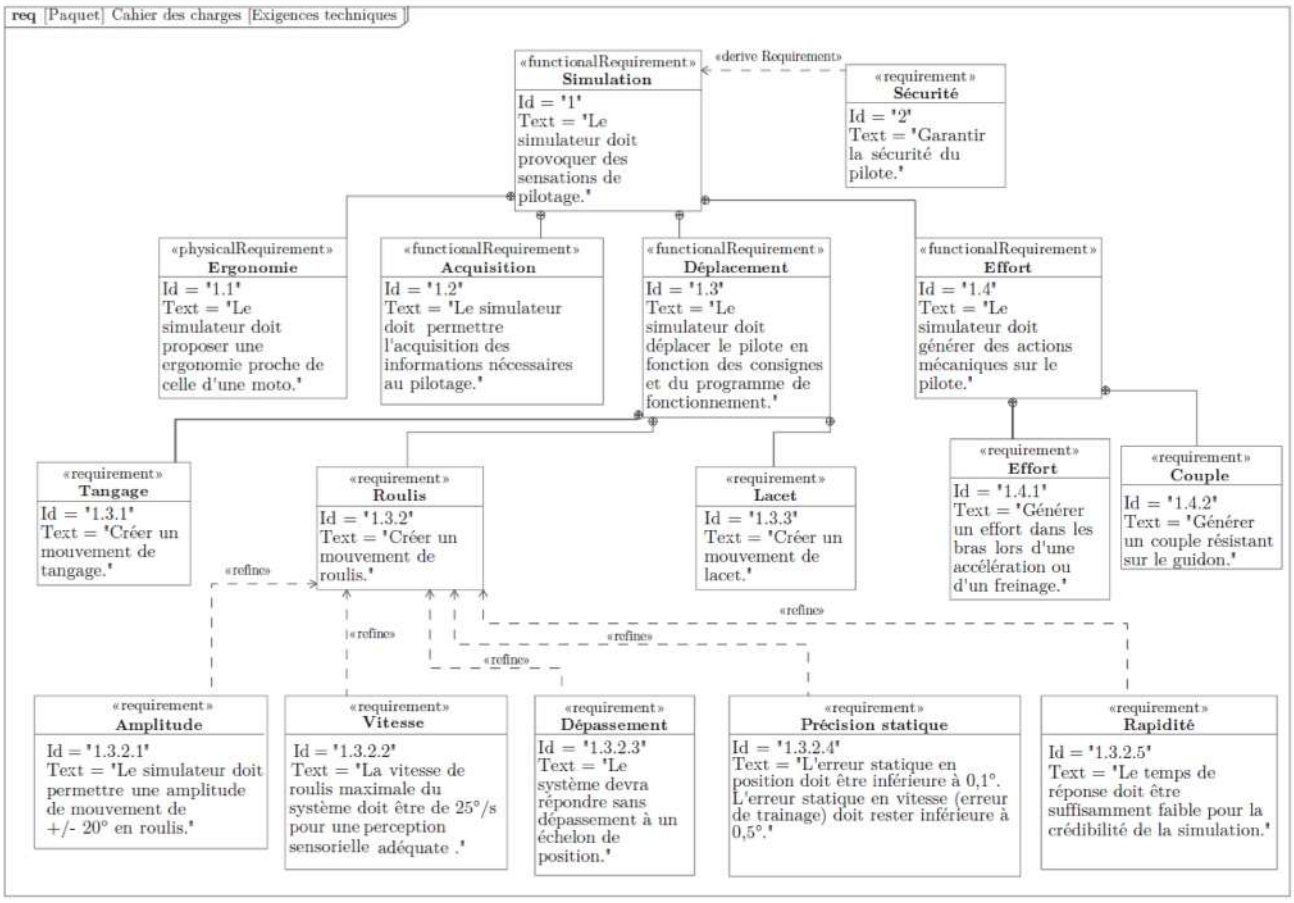


Figure 4 : Diagramme partiel des exigences du simulateur

2. Pilotage des vérins de roulis

Objectif :
Modéliser les vérins et vérifier leur comportement dynamique.

2.1. Analyse de la structure de l'asservissement en position d'un vérin

Le diagramme de définition des blocs des vérins avant est donné par la figure 5 ci dessous :

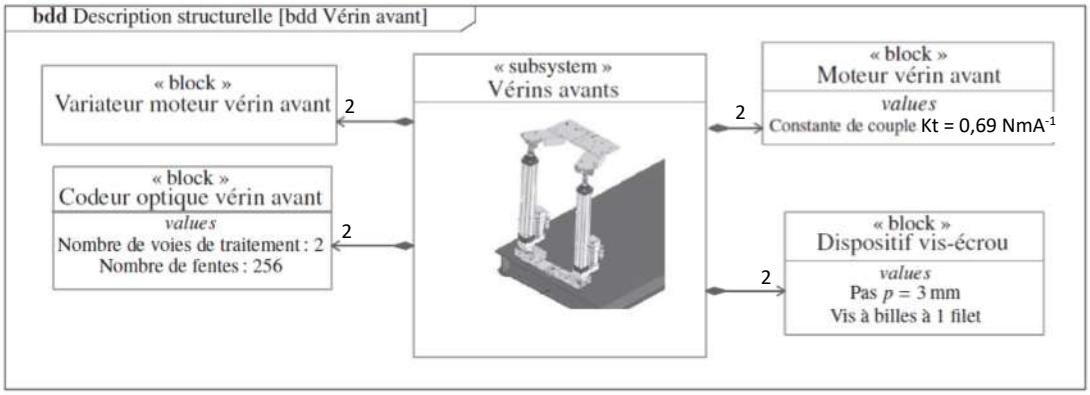


Figure 5 : Diagramme de définition des blocs des vérins avant

Q1. À partir du diagramme de définition de blocs des vérins avants, compléter la chaîne fonctionnelle d'un vérin avant.

Le simulateur est sollicité en roulis. On impose donc aux deux vérins des consignes de déplacement opposées.
L'angle de rotation du moteur $\theta_m(t)$ est mesuré par un codeur optique de gain K_{cap}. L'image $N_{mes}(t)$ de cet angle est comparée à une grandeur $N_{cons}(t)$ image de la consigne de position $z_c(t)$, acquise par une interface de gain K_A. L'écart $\varepsilon_N(t)$ est corrigé par l'ensemble correcteur et variateur pour fournir l'intensité i(t) de commande au moteur. Ce dernier fournit en sortie une vitesse de rotation $\omega_m(t)$. L'ensemble vis-écrou à billes permet, à partir de l'angle du moteur $\theta_m(t)$, l'entraînement en translation de la tige de vérin, noté z(t).

Q2. Réaliser le schéma-blocs fonctionnel de l'asservissement en position d'un vérin (on indiquera le nom des différents composants dans les blocs et les grandeurs d'entrées/sorties).

2.2. Modélisation de l'asservissement en position d'un vérin

Dans le domaine de Laplace, l'ensemble correcteur et variateur est modélisé par une fonction de transfert C(p). Le comportement dynamique du moteur est modélisé par le gain K_t et les fonctions de transfert $H_1(p)$ et $H_2(p)$. Un couple résistant est pris en compte comme une perturbation au niveau du moteur. Le schéma-blocs (Figure 6) modélise l'asservissement en position d'un seul des deux vérins.

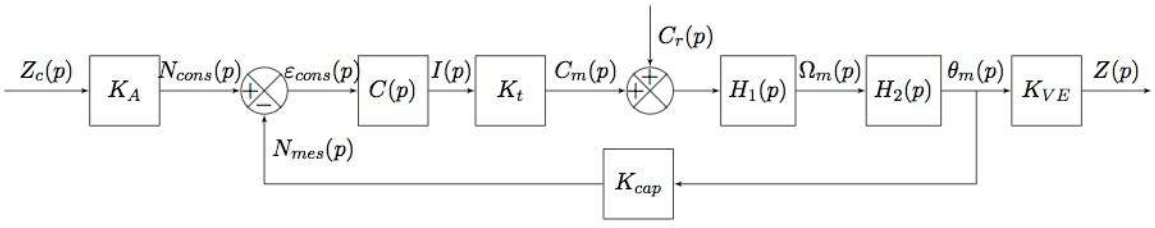


Figure 6 : Schéma-bloc de l'asservissement en position d'un vérin

Détermination des fonctions de transfert $H_1(p)$ et $H_2(p)$:
Une étude dynamique a permis d'établir l'équation différentielle modélisant le comportement dynamique d'un seul vérin :

$$J_{eq}.\frac{d\omega_m(t)}{dt} + f_v.\omega_m(t) = C_m(t) + C_r(t)$$

avec J_{eq} le moment d'inertie équivalent ramené à l'axe du rotor du moteur, f_v le coefficient de frottement visqueux sur l'axe d'un moteur, $C_m(t)$ le couple fourni par le moteur et $C_r(t)$ le couple résistant appliqué sur le moteur.

Maxime NAJDA

Q3. Dans les conditions de Heaviside, déterminer la transformée de Laplace de l'équation différentielle du vérin.

Q4. En déduire la fonction de transfert $H_1(p) = \frac{\Omega_m(p)}{C_m(p)+C_r(p)}$.
On écrira $H_1(p)$ sous forme canonique et on précisera son ordre et les expressions littérales de ses paramètres caractéristiques : le gain statique K_v et la constante de temps τ_v. *Préciser les unités.*

Q5. Donner la relation temporelle qui relie la vitesse de rotation $\omega_m(t)$ à la position angulaire $\theta_m(t)$. En déduire la fonction de transfert $H_2(p)$.

Afin d'estimer les couples résistants (liés au frottement sec et visqueux) sur le système, on procède à plusieurs essais sur la motorisation :

- la consigne $z_c(t)$ est telle que sa dérivée est en forme de trapèze de vitesse (avec de courtes phases d'accélération et décélération) ;
- on relève les valeurs moyennes de l'intensité i(t) (en A) et de la vitesse de rotation $\omega_m(t)$ (en rad/s) en régime permanent (= vitesse constante) ;
- les résultats des relevés expérimentaux sont donnés sur le graphique du document réponse.

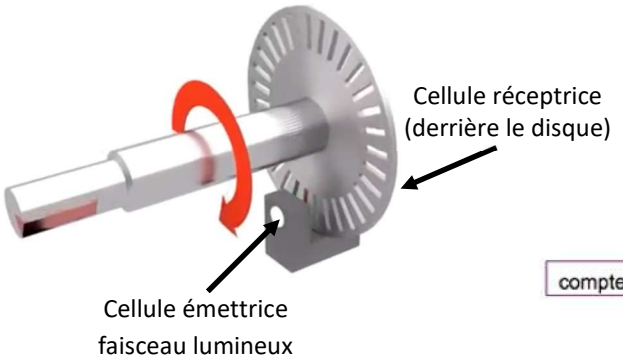
Q6. En vous appuyant sur le modèle de connaissance du vérin, déterminer l'équation qui relie la vitesse de rotation $\omega_m(t)$ à l'intensité i(t) et au couple résistant $C_r(t)$ en régime permanent.

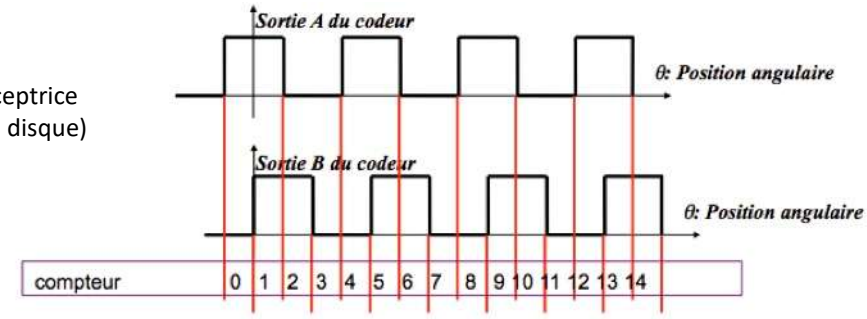
Q7. À partir de l'analyse des résultats (DR **Q7**) et de la Figure 5, estimer les valeurs du couple résistant C_r, **supposé constant** (1 chiffre significatif) et du coefficient de frottement visqueux f_v (3 chiffres significatifs).

Détermination des gains des composants de l'asservissement :

Q8. En vous appuyant sur le diagramme de définition de blocs (Figure 5), donner la valeur du gain K_{VE} du dispositif vis/écrou.
NB : l'écrou translate de la valeur du pas p quand la vis effectue un tour.

Le capteur de position utilisé est un codeur optique composé de deux voies (voies A et B) qui permettent de déterminer le sens de rotation en plus de la position angulaire. Ce codeur incrémental est associé à un compteur d'impulsions qui est incrémenté de 1 à chaque changement d'état sur les voies A et B : état haut : faisceau lumineux passant à travers une fente ; état bas : faisceau bloqué.
Le nombre de changements d'état de chaque voie est donc égal au nombre de fentes multiplié par 2.





Q9. En vous appuyant sur le diagramme de définition de blocs (Figure 5) et sur le schéma bloc de l'asservissement (Figure 6), donner la valeur du gain K_{cap} du codeur exprimé en points/rad.
NB : 1 point = 1 impulsion.

Q10. Déterminer l'expression littérale et la valeur du gain K_A permettant d'avoir un système correctement asservi.

Maxime NAJDA

2.3. Analyse des performances

Les performances à atteindre par le vérin sont résumées dans le Tableau 1 ci-dessous :

Exigence	Critère	Niveau
Amortissement	Dépassement transitoire de la valeur asymptotique	nul
Rapidité	Temps de réponse à 5%	$\leq 0{,}1\,\mathrm{s}$
Précision statique	Erreur statique en position	$\leq 2\,\mathrm{mm}$

Tableau 1 : Exigences sur l'asservissement en position du vérin

Pour la suite du problème, on utilise le schéma-blocs de la Figure 7 obtenu après simplification du schéma blocs initial (Figure 6) :

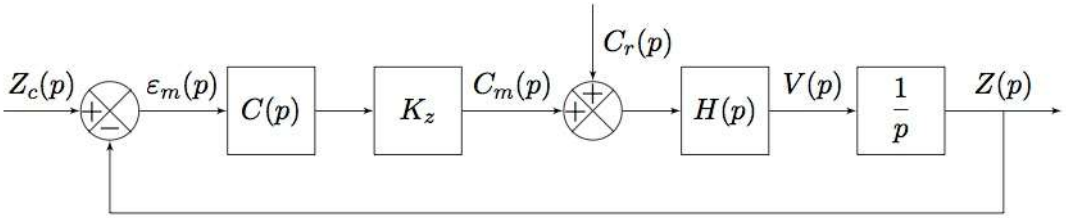


Figure 7 : Schéma-bloc simplifié de l'asservissement en position d'un vérin

avec $H(p) = K_{VE}.H_1(p)$ et $K_z = K_t.K_A$

Modèle de comportement de l'asservissement en position :

Un essai sur le vérin soumis à un couple $C_m(t)$ en échelon a permis de l'identifier à un système de premier ordre (ce qui confirme le modèle de connaissance).

Indépendamment des résultats trouvés à la partie précédente, on prendra donc : $\boldsymbol{H(p) = \frac{K}{1+\tau.p}}$

On envisage dans un premier temps un correcteur proportionnel : **C(p) = C** (C > 0)

Le vérin est ici soumis à deux entrées : la consigne $z_c(t)$ et le couple résistant $C_r(t)$ qui peut être considéré comme une perturbation. On définit alors deux modes de fonctionnement du système :

- le **mode poursuite** : fonctionnement du système lorsque la perturbation est nulle (**Cr(t) = 0**), on note alors :

$$\boldsymbol{H_p(p) = \frac{Z(p)}{Z_c(p)}}$$

- le **mode régulation** : fonctionnement du système lorsque la consigne est nulle (**z_c(t) = 0**), on note alors :

$$\boldsymbol{H_r(p) = \frac{Z(p)}{C_r(p)}}$$

Q11. Déterminer l'expression littérale sous forme canonique de la fonction de transfert $H_p(p)$ et en déduire, en fonction de C, K_z, K et τ, les expressions du gain statique K_p, de la pulsation propre ω_p et du coefficient d'amortissement ξ_p de l'asservissement en position en mode poursuite.

Q12. Déterminer l'expression littérale sous forme canonique de la fonction de transfert $H_r(p)$ et en déduire, en fonction de C, K_z, K et τ, les expressions du gain statique K_r, de la pulsation propre ω_r et du coefficient d'amortissement ξ_r de l'asservissement en position en mode régulation.
On fera apparaître sur le document réponses les différentes étapes permettant de simplifier le schéma-blocs en mode régulation et on détaillera le calcul.

Maxime NAJDA

Étude des performances pour une correction proportionnelle :

Le système étant linéaire, le principe de superposition permet d'écrire (indépendamment des résultats obtenus aux questions précédentes) :

$$\boldsymbol{Z(p) = \frac{1}{1 + \frac{2\xi}{\omega_0}p + \frac{1}{\omega_0^2}p^2}\left[K_p . Z_c(p) + K_r . C_r(p)\right]}$$

avec $\boldsymbol{K_p = 1}$; $\boldsymbol{K_r = \frac{1}{100.C}}$; $\boldsymbol{\omega_0 = 18\sqrt{C}\ et\ \xi = \frac{1{,}63}{\sqrt{C}}}$ où C est toujours la valeur du gain du correcteur proportionnel.

Q13. Donner la définition de l'erreur dans le domaine temporel $e_r(t)$ puis, exprimer $E_r(p)$ en fonction de $Z_c(p)$ et $C_r(p)$ et des différentes constantes du modèle.

Q14. Montrer que l'erreur statique ε_s est nulle en mode poursuite quelque soit la valeur du gain C.

Q15. Montrer que le respect du critère de précision en mode régulation, pour une perturbation $C_r(t)$ en échelon d'amplitude C_{r0} = -1 Nm entraîne C ≥ 5.

Un système du deuxième ordre ne présente aucun dépassement lorsqu'il est soumis à une entrée en échelon si son amortissement est supérieur ou égal à 1 (propriété démontrée au cours du cycle 5).

Q16. Déterminer alors la valeur maximale du gain C afin de respecter le critère d'amortissement.

Q17. Au regard des questions précédentes, conclure sur l'utilisation d'un correcteur proportionnel.

Étude des performances pour une correction optimale :

On choisit d'implanter un correcteur proportionnel à avance de phase sur le système. Sa fonction de transfert est de la forme $C(p) = K_{AP} \cdot \frac{1+\tau p}{1+a\tau p}$, avec K_{AP}, τ et a des constantes (à déterminer dans le sujet d'origine).

La réponse temporelle en position du vérin pour une consigne en échelon d'amplitude z_{c0} = 0,05m et pour une perturbation constante d'amplitude C_{r0} = -1 Nm à partir de 0,2s est donnée sur la figure du document réponse **Q18**.

Q18. Valider le respect par le modèle des différentes exigences du cahier des charges du vérin avec ce correcteur.

On pourra discuter de la pertinence de la réponse temporelle fournie dans cette épreuve, en particulier de l'influence de l'apparition du couple résistant…

Maxime NAJDA