

AMÉLIORATION DES PERFORMANCES DES SLCI

ROBUROC - PLATEFORME D'EXPLORATION TOUT TERRAIN

1 Présentation

Le *robuROC 6* (FIGURE 1) est un robot mobile développé par la société *ROBOSOFT*. Cette plate-forme robotisée a été conçue pour des applications de recherche et d'exploration en milieu extérieur. Elle est équipée de 6 roues motrices indépendantes, de même diamètre, montées par paires sur 3 podés articulés en tangage et en roulis (FIGURE 3).

La cinématique permet à la plate-forme de se conformer au relief parcouru et de franchir des obstacles du type trottoirs, escaliers... Le *robuROC 6* a été conçu pour se déplacer en zones urbaines et peut aussi s'adapter à tous types de milieux. Afin d'explorer la zone géographique à risques, les 3 podés peuvent être équipés, selon les besoins de l'utilisateur, de caméras d'observation haute définition à 360°, de systèmes infrarouges de visualisation nocturne, ainsi que de bras de robot articulés pour manipuler des éléments de la zone à explorer.

Les déplacements de la plate-forme sont coordonnés par l'intermédiaire de deux microcontrôleurs placés dans les podés avant et arrière. Ces microcontrôleurs communiquent entre eux et dialoguent avec l'extérieur suivant deux modes de conduite :

- Le mode joystick - l'utilisateur pilote manuellement la plate-forme par l'intermédiaire d'une télécommande ;
- Le mode automatique - la plate-forme traite les informations du logiciel de supervision notamment le suivi d'un profil théorique.

Pour se repérer dans l'espace, la plate-forme est équipée de capteurs relatifs positionnés sur chacune des six roues, d'inclinomètres et d'un système de positionnement absolu par GPS. Des capteurs à ultrasons et des « bumpers » (détecteurs de collision) participent à la sécurité matérielle et à la détection des obstacles.

La motorisation principale est assurée par six moteurs électriques équipés de réducteurs épicycloïdaux permettant de transmettre l'énergie mécanique aux six roues. Le franchissement des obstacles est facilité par un système hydraulique permettant le soulèvement des podés avant et arrière. Ce système est constitué de quatre vérins disposés de part et d'autre du podé central (FIGURE 3) et d'une centrale hydraulique alimentée par une pompe à engrenage. La plate-forme peut se déplacer, sous conditions,



FIGURE 1 – *robuROC* en situation

en mode 6 roues ou 4 roues pour certaines applications particulières (FIGURE 2). L'énergie électrique nécessaire au fonctionnement est stockée dans des batteries occupant la plus grande partie du volume interne des trois podés. Une unité de gestion électrique optimise la consommation d'énergie.

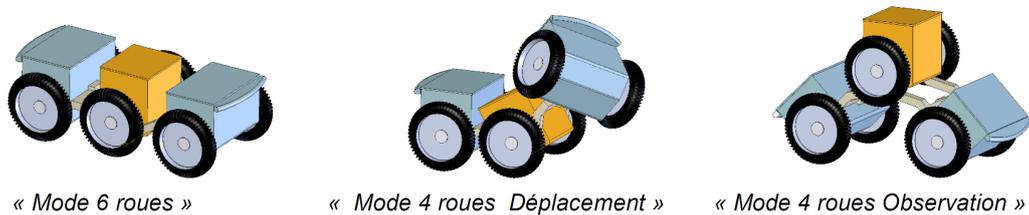


FIGURE 2 – Mode de déplacement de la plate-forme

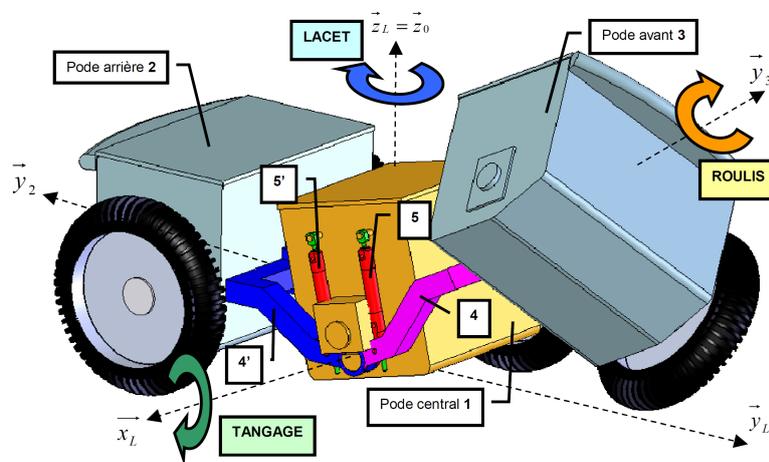


FIGURE 3 – (roue centrale et roue avant droite supprimées pour plus de visibilité)

2 Objectif de l'étude

Les déplacements de la plate-forme sont contrôlés de la manière suivante :

- au niveau de chacun des 6 moteurs, des boucles de vitesse assurent l'asservissement dit « bas niveau » ;
- à partir d'informations sur la position absolue de la plate-forme via le système GPS par exemple, un asservissement en position de la plate-forme peut être mis en place (asservissement dit « haut niveau »).

Objectif

Déterminer les paramètres de réglage de chacune des boucles d'asservissement en vitesse de la plate-forme par rapport au sol, afin de respecter l'exigence 7.2 du cahier des charges (voir FIGURE 4).

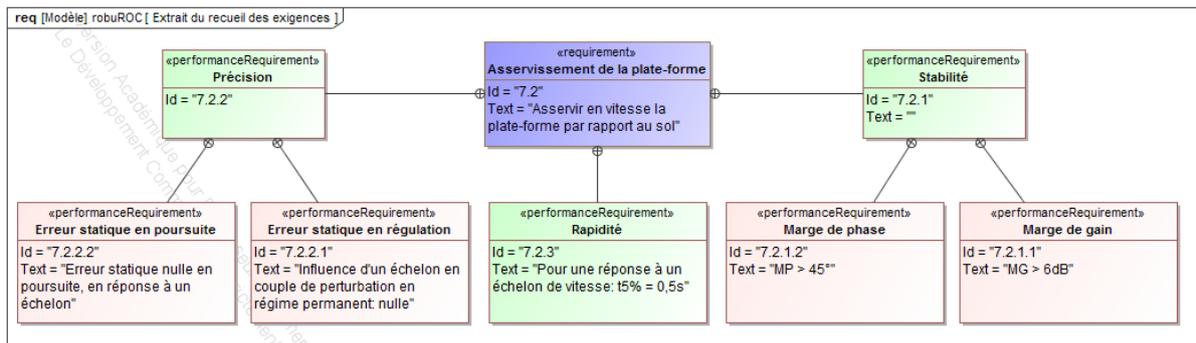


FIGURE 4 – Extrait du recueil des exigences

3 Hypothèses et modélisation

Afin de régler l'asservissement en vitesse de la plate-forme par rapport au sol :

- un déplacement en ligne droite de la plate-forme est considéré (consigne de vitesse $V_C(t)$, les paramètres angulaires de lacet, tangage et roulis restent nuls) ;
- le contact entre chaque pneumatique et le sol est considéré avec roulement sans glissement ;
- pour la modélisation du fonctionnement des moteurs, nous supposons une équi-répartition de la charge extérieure sur chacun des six moteurs. Ainsi, pour une vitesse $V(t)$ de la plate-forme, les six moteurs tourneront à la même vitesse $\Omega_{mot}(t)$. Ils seront alimentés par une même tension de commande $U(t)$ et devront fournir un même couple moteur $C_{mot}(t)$;
- les efforts de perturbations (action mécanique de la pesanteur sur une pente ...) seront répartis sur chacun des axes des six moteurs et seront donc modélisés par un même couple de perturbation équivalent $C_{eq}(t)$ appliqué sur chacun des axes moteurs ;
- les caractéristiques inertielles de la plate-forme seront représentées au niveau de chaque axe moteur par un moment d'inertie équivalent $\frac{J_{equ}}{6}$;
- le comportement individuel d'un des six moteurs peut donc être approché par celui d'un moteur à courant continu avec les équations électromécaniques suivantes :
 - ◇ Équation électrique : $U(t) = E(t) + r.i(t) + L \frac{di(t)}{dt}$
 - ◇ Équation mécanique : $\frac{J_{equ}}{6} \frac{d\Omega_{mot}(t)}{dt} = C_{mot}(t) - C_{eq}(t)$
 - ◇ Équations de couplage : $E(t) = k_e.\Omega_{mot}(t)$ et $C_{mot} = k_c.i(t)$

Symbole	Désignation	Unité, valeur
$U(t)$	Tension d'alimentation d'un moteur	V
$E(t)$	Force contre électromotrice dans un moteur	V
$I(t)$	Intensité du courant électrique dans un moteur	A
$V(t)$	Vitesse de déplacement de la plate-forme	m/s
$\Omega_{mot}(t)$	Vitesse de rotation de chacun des six moteurs	rad/s
$C_{mot}(t)$	Couple moteur appliqué par chacun des six moteurs	N.m
$C_{eq}(t)$	Couple de perturbation équivalent appliqué à chacun des six axes moteurs	N.m
r	Résistance de l'induit d'un moteur	2,2 Ω

L	Inductance de l'induit d'un moteur	4,62 mH
k_e	Constante de vitesse d'un moteur	0,12 V.s/rad
k_c	Constante de couple d'un moteur	0,12 N.m/A
J_{equ}	Inertie équivalente de la plate-forme ramenée sur l'axe d'un des six moteurs	$14,4 \cdot 10^{-3} \text{ kg.m}^2$

Pour une vitesse de consigne $V_C(t)$ [m/s], les microcontrôleurs de pilotage génèrent une vitesse de rotation de consigne à appliquer à chaque moteur $\Omega_{C_{mot}}(t)$ [rad/s] qui est convertie en une tension de consigne $U_C(t)$ [V]. Un capteur de vitesse monté sur l'axe de chaque moteur fournit une tension mesurée $U_m(t)$ [V], image de la vitesse de rotation réelle $\Omega_{mot}(t)$. Un correcteur (défini par la suite) adapte le signal écart entre la tension de consigne et la tension mesurée, ce qui permet après amplification de définir la tension d'alimentation $U(t)$ à appliquer aux moteurs. La vitesse réelle de la plate-forme $V(t)$ est déterminée à partir de $\Omega_{mot}(t)$ en l'absence de glissement.

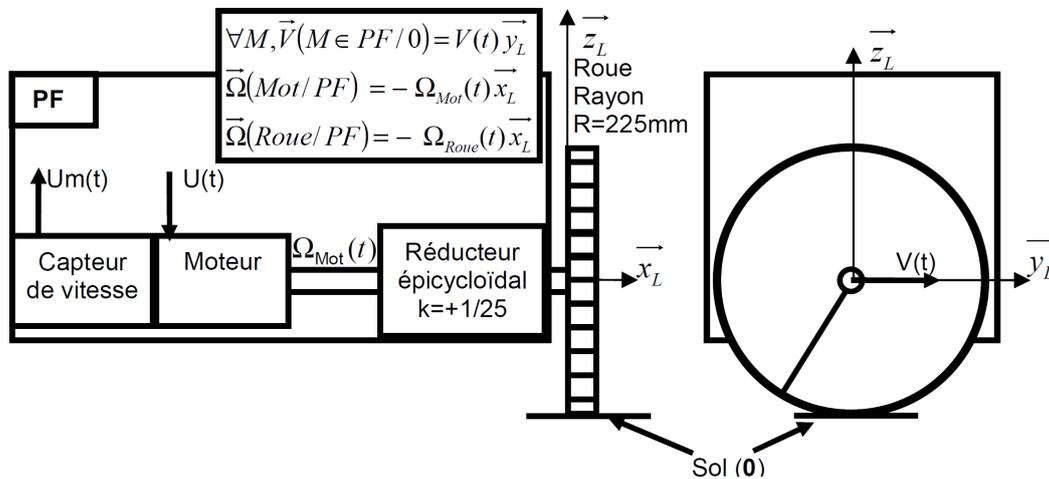


FIGURE 5 – Motorisation d'une des six roues

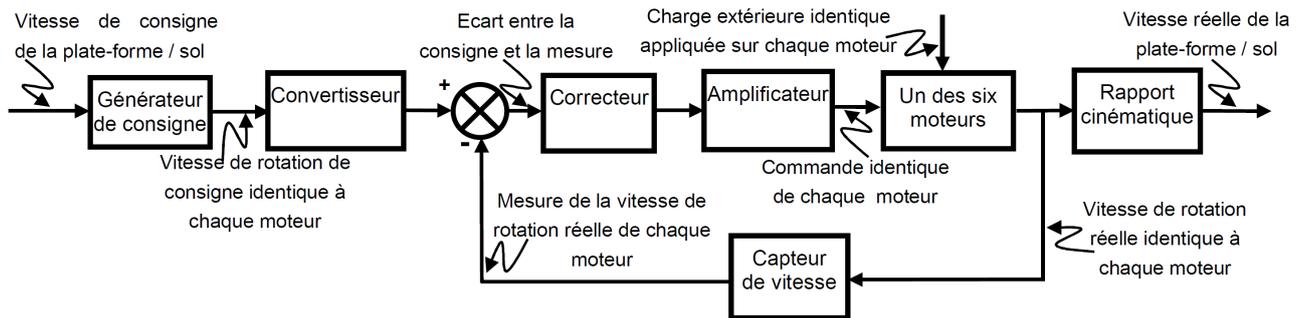


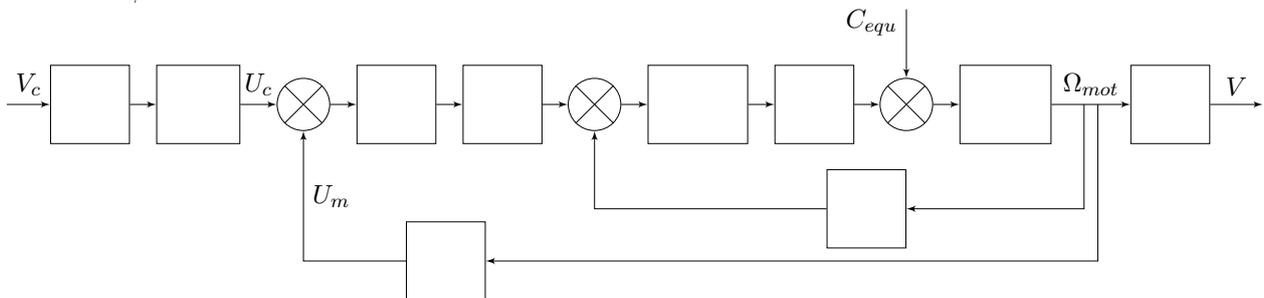
FIGURE 6 – Schéma-blocs fonctionnel de l'asservissement en vitesse d'un des six moteurs

Blocs	Fonctions de transfert
Générateur de consigne	K_G à déterminer
Convertisseur	K_{conv} à déterminer
Correcteur	$C(p)$ réglé par la suite
Amplificateur	$K_A = 20$ sans unité
Capteur de vitesse	$K_{capt} = 5 \cdot 10^{-3}$ V.s/rad
Rapport cinématique	K_R à déterminer

4 Étude de la satisfaction de l'exigence 7.2

4.1 Modélisation de l'asservissement

Question 1 Compléter le schéma-blocs ci-dessous en y faisant figurer les fonctions de transfert sous forme littérale dans le domaine de Laplace avec des conditions initiales nulles, ainsi que les signes des sommateurs/soustracteurs.



Question 2 Déterminer les valeurs numériques et unités des gains associés au générateur de consigne (noté K_G), au rapport cinématique (K_R) et au convertisseur (K_{conv}) en sachant, que lorsque la vitesse réelle de la plate-forme $V(t)$ est égale à la vitesse de consigne de la plate-forme $V_C(t)$, l'écart $\epsilon(t)$ doit être nul.

À partir de la modélisation des blocs, un schéma-blocs à retour unitaire est tracé ci-dessous.

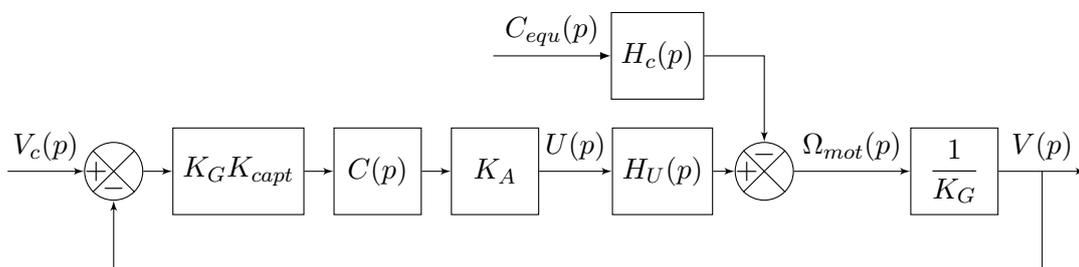


FIGURE 7 – Schéma-blocs fonctionnel de l'asservissement à retour unitaire

$H_U(p)$ et $H_c(p)$ sont les fonctions de transfert caractéristiques d'un des six moteurs. Nous retiendrons pour la modélisation :

$$H_U(p) = \frac{K_U}{(1 + T_1 p)(1 + T_2 p)} \quad \text{et} \quad H_c(p) = \frac{K_c \left(1 + \frac{L}{r} p\right)}{(1 + T_1 p)(1 + T_2 p)}$$

avec : $K_U = 8,3 \text{ rad.s}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$; $K_c = 152,7 \text{ rad.s}^{-1} \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$; $T_1 = 2,1 \text{ ms}$ et : $T_2 = 0,36 \text{ s}$.

4.2 Étude des performances sans correction ($C(p) = 1$)

Nous distinguerons dans la suite :

- l'étude en poursuite : le couple de perturbation équivalent $C_{equ}(t)$ est nul, $V_C(t)$ varie ;
- l'étude en régulation : la vitesse de consigne de la plate-forme $V_C(t)$ est nulle, $C_{equ}(t)$ varie.

Le diagramme de Bode de la Fonction de Transfert en Boucle Ouverte FTBO(p) non corrigée est fourni ci-dessous pour $C(p) = 1$ (pour $C_{equ} = 0$).

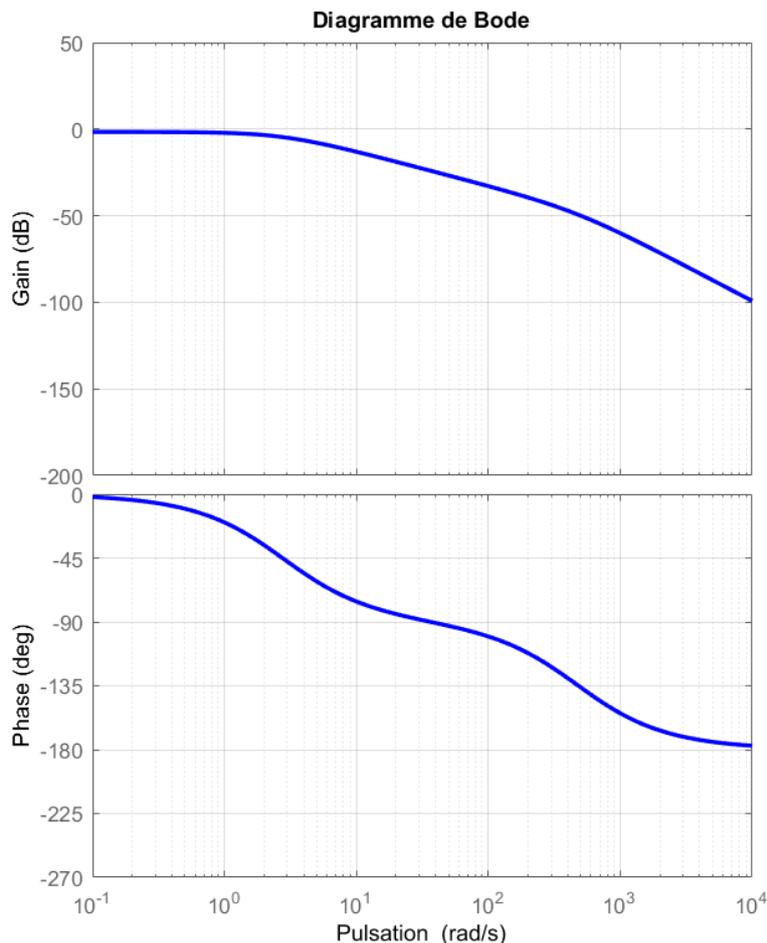


FIGURE 8 – Diagramme de Bode de FTBO(p) avec $C(p) = 1$

Question 3 Le système étudié est-il stable en boucle fermée ? Justifier votre réponse.

Question 4 Étudier l'aptitude du système sans correction à respecter les critères de précision. Vous déterminerez notamment les expressions littérales de l'erreur statique en poursuite pour une consigne de vitesse de la plate-forme $V_C(t)$ en échelon d'amplitude V_{C_0} : $V_C(t) = V_{C_0} \cdot u(t)$ (avec $u(t)$ l'échelon unitaire) et de l'influence en régulation d'une perturbation $C_{equ}(t)$ en échelon d'amplitude C_0 , sur la vitesse réelle $V(t)$ de la plate-forme en régime permanent.

4.3 Étude des performances avec un correcteur de fonction de transfert $C(p) = \frac{K_I}{p}$

Question 5 Indiquer quelle est la nature de la correction effectuée par ce correcteur (ou désignation du correcteur) ? Indiquer pour quelle(s) raison(s) principale(s) ce correcteur a été choisi. Valider ce choix vis-à-vis du cahier des charges. Sans calcul, donner l'influence de ce correcteur sur les autres performances attendues.

Question 6 Tracer, sur la FIGURE 8, le diagramme de Bode du correcteur avec $K_I = 1 \text{ s}^{-1}$ ainsi que celui de la fonction de transfert en boucle ouverte pour $K_I = 1 \text{ s}^{-1}$. Déterminer alors la valeur de K_I maximale notée $K_{I_{max}}$ permettant de respecter les marges de stabilité énoncées dans le cahier des charges.

Afin d'évaluer analytiquement le temps de réponse à 5%, Il est proposé d'adopter une modélisation simplifiée du comportement du moteur en conservant uniquement le mode associé au pôle « dominant ». On donne $t_{5\%} \cdot \omega_0 = 3$ pour $\xi = 0,69$ avec ω_0 la pulsation propre non amortie d'un système fondamental du second ordre.

Question 7 En analysant les valeurs numériques des pôles de la fonction de transfert du moteur en poursuite $H_U(p)$, préciser quel est le pôle dominant et proposer alors un modèle simplifié de la fonction de transfert $H_U(p)$. Déterminer alors la valeur numérique de K_I notée $K_{I_{5\%}}$ minimisant le temps de réponse à 5% pour une entrée échelon en poursuite. Calculer alors la valeur approchée du temps de réponse à 5% minimale $T_{r5\%_{mini}}$ et comparer la au cahier des charges.

4.4 Étude des performances avec un correcteur proportionnel intégral $C(p) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I p}\right)$

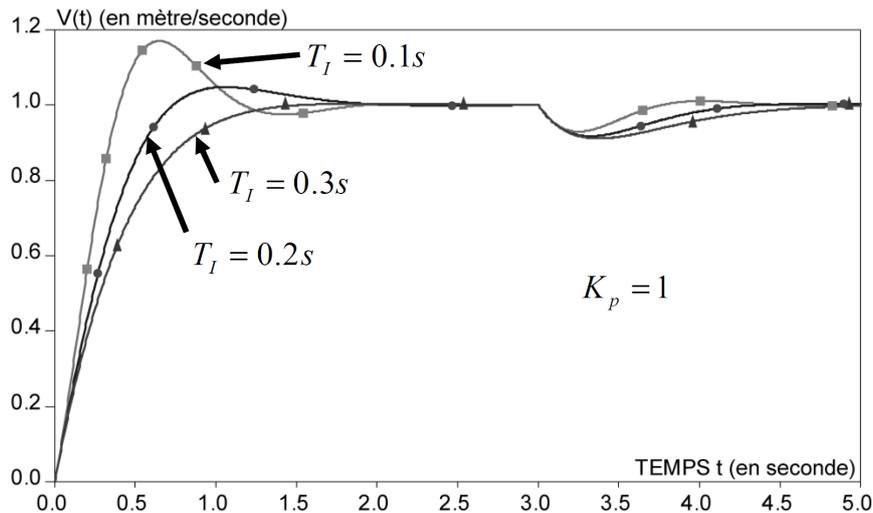
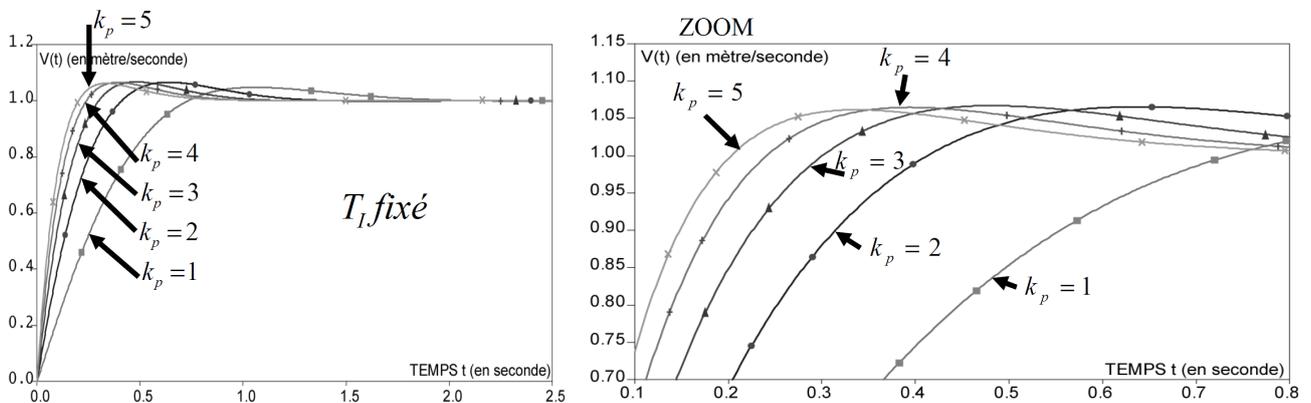
Le correcteur est remplacé par un correcteur proportionnel intégral. Des réponses temporelles du système corrigé sont tracées sur la FIGURE 9 avec :

- une consigne de vitesse unitaire de la plate-forme $V_C(t) = u(t)$ (avec $u(t)$ l'échelon unitaire) ;
- une perturbation sous la forme d'un échelon unitaire retardé de 3 secondes $C_{equ}(t) = u(t - 3)$;
- un gain du correcteur $K_P = 1$;
- différentes valeurs de T_I .

Question 8 Parmi les différentes valeurs de T_I , choisir celle qui assure le temps de réponse à 5% le plus faible. Vous ferez apparaître ce temps de réponse sur la FIGURE 9.

La valeur de T_I déterminée à la question précédente est retenue pour le réglage du correcteur proportionnel intégral. Il s'agit alors de choisir le gain du correcteur K_P à partir des simulations proposées sur la FIGURE 10.

Question 9 Parmi les différentes valeurs de K_P , choisir la valeur qui assure un temps de réponse à

FIGURE 9 – Résultats de simulation pour différentes valeurs de T_I avec $K_P=1$ FIGURE 10 – Résultats de simulation pour différentes valeurs de K_P avec T_I fixé

5% au plus près de la valeur fournie dans le cahier des charges.

Avec le couple de valeurs (T_I et K_P) obtenu, la réponse fréquentielle du système en boucle ouverte a été tracée sur la FIGURE 11.

Question 10 Conclure quant à la capacité de ce correcteur à respecter tous les critères du cahier des charges.

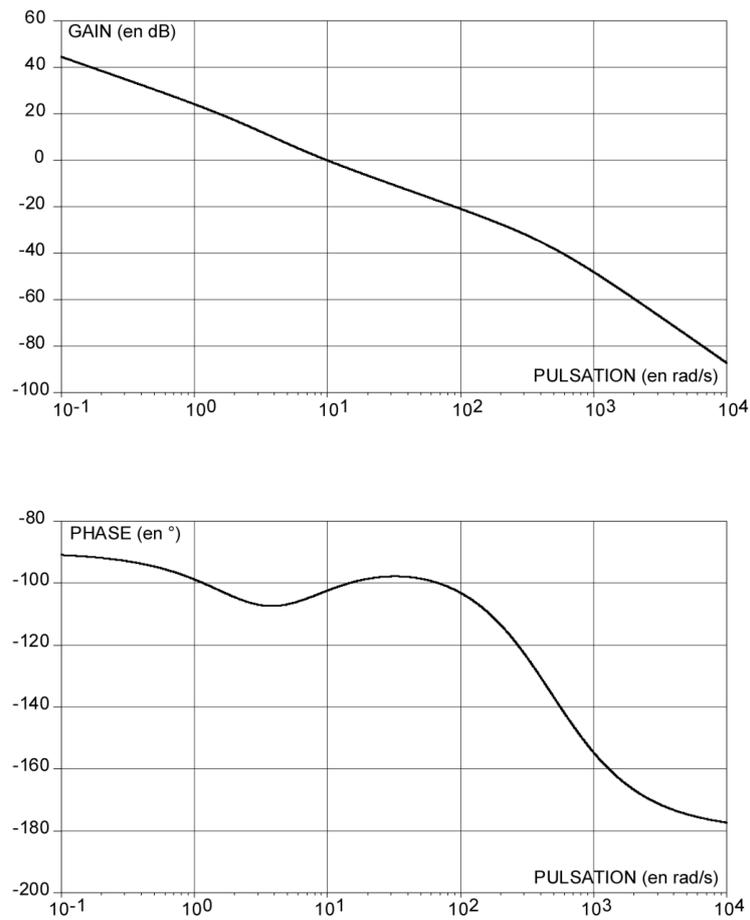


FIGURE 11 – Diagramme de Bode de la FTBO avec correcteur PI déterminé précédemment