

ROBUROC 6 : PLATEFORME D'EXPLORATION TOUS TERRAINS

Le RobuROC 6 (photographie ci-dessous) 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.

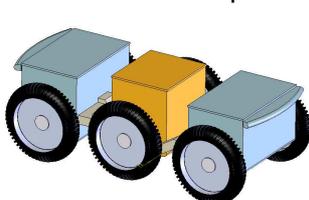


Figure 1 :

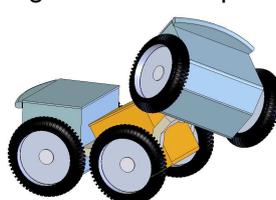
Les déplacements de la plate-forme sont coordonnés par l'intermédiaire de deux microcontrôleurs placés dans les podés avant et arrière. Ces microcontrôleurs communiquent entre eux et dialoguent avec l'extérieur suivant deux modes de conduite :

- 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.

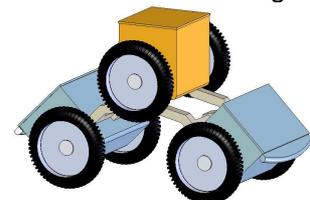
Pour se repérer dans l'espace, la plate-forme est équipée de capteurs relatifs positionnés sur chacune des six roues, d'inclinomètres et d'un système de positionnement absolu par GPS. Des capteurs à ultrasons et des « bumpers » (détecteurs de collision) participent à la sécurité matérielle et à la détection 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 (**annexe 2**). La plate-forme peut se déplacer, sous conditions, 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.



« Mode 6 roues »



« Mode 4 roues Déplacement »



« Mode 4 roues Observation »

Figure 2 : Mode de déplacement de la plate-forme

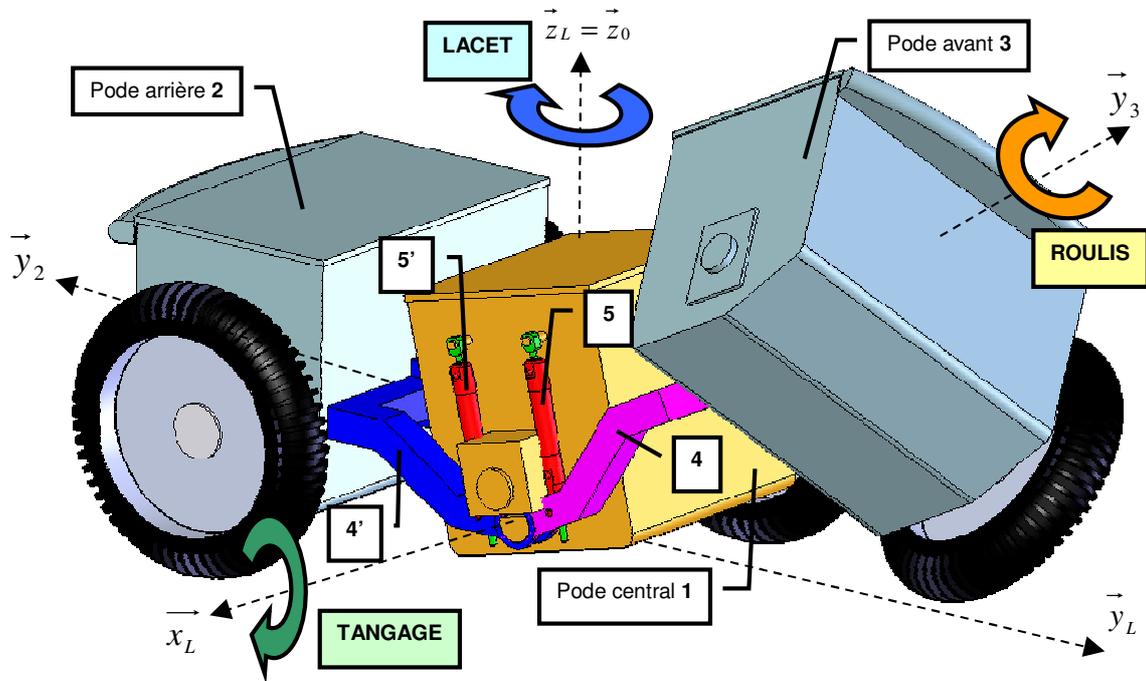


Figure 3 (roue centrale et roue avant droite supprimées pour plus de visibilité)

Les trois podes sont articulés en tangage et en roulis (**figure 3**). Le mouvement de **tangage** est guidé par deux liaisons pivot (d'axe de direction \vec{x}_L), respectivement entre le bras d'articulation avant **4** et le pod central **1** et entre le bras d'articulation arrière **4'** et le pod central **1**. Le système hydraulique de suspension permet l'amortissement (mode passif) et la motorisation de ce mouvement (mode actif). Les vérins **5** (côté droit) et **6** (côté gauche) sont en liaison avec le bras d'articulation avant **4** et le pod central **1**. Les vérins **5'** (côté droit) et **6'** (côté gauche) sont en liaison avec le bras d'articulation arrière **4'** et le pod central **1**. Le mouvement de **roulis** est assuré par deux liaisons pivot entre le pod avant **3** et le bras d'articulation avant **4** (liaison d'axe de direction \vec{y}_3) d'une part, et entre le pod arrière **2** et le bras d'articulation arrière **4'** (liaison d'axe de direction \vec{y}_2) d'autre part. Ce mouvement n'est pas motorisé.

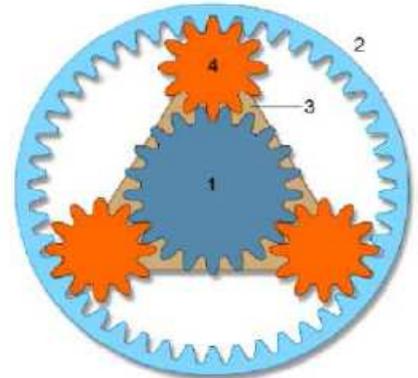
Extrait du cahier des charges :

Exigences			
Assurer le déplacement	Vitesse de déplacement de la plate-forme	13,7 km/h	Valeur maximale
	Hauteur de franchissement d'un obstacle de type « trottoir » (D_{max})	40 cm	Valeur minimale
	Pente du relief à vide	45 °	Valeur maximale
	Débattement angulaire en tangage du bras 4 par rapport au pod central 1	de -45° à +30°	-----
	Débattement angulaire en tangage du bras 4' par rapport au pod central 1	de +45° à -30°	-----
	Débattement angulaire en roulis du pod avant 3 par rapport au bras 4	de -45° à +45°	-----
	Débattement angulaire en roulis du pod arrière 2 par rapport au bras 4'	de +45° à -45°	-----
Analyser la zone géographique à explorer	Charge utile répartie sur les trois podes	100Kg	Valeur maximale
	Hauteur d'observation (H_{obs})	85 cm	Valeur minimale
Fournir l'énergie électrique	Autonomie d'utilisation	4h	+/- 1h selon les conditions

I CULTURE TECHNOLOGIQUE ET CONNAISSANCE DES LOIS DE COMPORTEMENT DES COMPOSANTS DE BASE

Q1: Etablir le schéma cinématique du réducteur épicycloïdal suivant et en déduire la relation entrée/sortie :

On donne le train épicycloïdal plan de type I suivant :
 $Z_1 = 21$; $Z_2 = 45$; $Z_4 = 12$.
 On étudie le fonctionnement avec planétaire extérieur 2 bloqué par rapport au bâti 0 : $\omega_{2/0} = 0$. On impose au planétaire intérieur 1 une vitesse constante $\omega_{1/0}$ et la sortie du mécanisme est la vitesse du porte-satellite.



II EXIGENCE : GÉRER LE FONCTIONNEMENT

La commande de la plate-forme

Pour coordonner les déplacements, la plate-forme est équipée de deux parties commandes supportées par deux microcontrôleurs placés respectivement dans les podes avant et arrière (**figure 6**). Chaque microcontrôleur commande trois roues et l'un des deux génère les ordres envoyés à la centrale hydraulique afin de piloter les mouvements de tangage.

Ces 2 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 commandes du logiciel de supervision.

Le pilotage en mode automatique est prioritaire sur le mode joystick.

Les principales fonctions à remplir par la partie commande sont :

- communiquer avec l'utilisateur ou le superviseur ;
- gérer les séquences de pilotage, notamment celle de cabrage ;
- **asservir les déplacements de la plate-forme.**

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 »).

L'objectif dans cette partie est de déterminer les paramètres de réglage de chacune des boucles d'asservissement en vitesse de la plate-forme par rapport au sol.

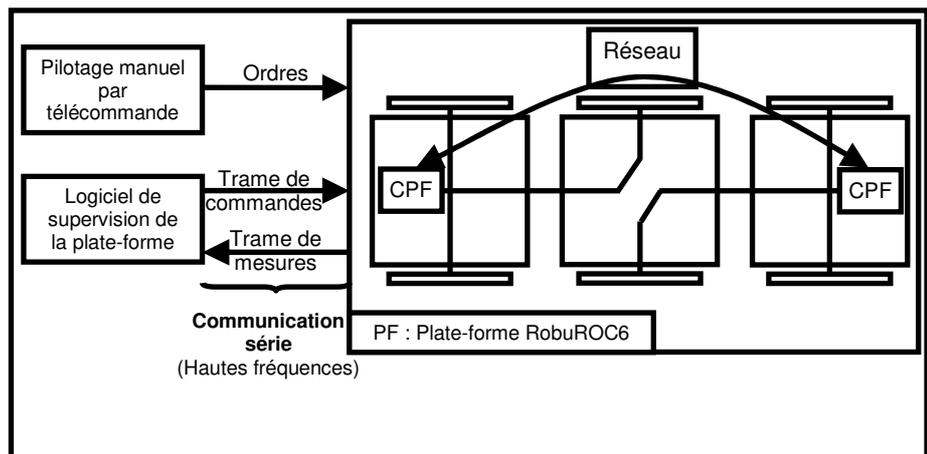


Figure 6 : Architecture de la commande de la plate-

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 supposerons 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 $C_{equ}(t)$ 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 :

Equation électrique : $U(t) = E(t) + r.I(t) + L.\frac{dI(t)}{dt}$

Equation mécanique : $\frac{J_{equ}}{6} \cdot \frac{d\Omega_{Mot}(t)}{dt} = C_{Mot}(t) - C_{equ}(t)$

Equations de couplage : $E(t) = k_e \cdot \Omega_{Mot}(t)$ et $C_{Mot}(t) = k_c \cdot I(t)$

Symbole	Désignation	Valeur, unités
$U(t)$	Tension d'alimentation d'un moteur	[V]
$E(t)$	Tension contre électromotrice dans un moteur	[V]
$I(t)$	Intensité 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	[Nm]
$C_{equ}(t)$	Couple de perturbation équivalent appliqué à chacun des six axes moteurs	[Nm]
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/(rad/s)
k_c	Constante de couple d'un moteur	0,12 Nm/A
J_{equ}	Inertie équivalente de la plate-forme ramenée sur l'axe d'un des six moteurs	$14,4 \cdot 10^{-3}$ kg.m ²

Description de l'asservissement en vitesse de la plate-forme par rapport au sol (figure 7 et 8):

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.

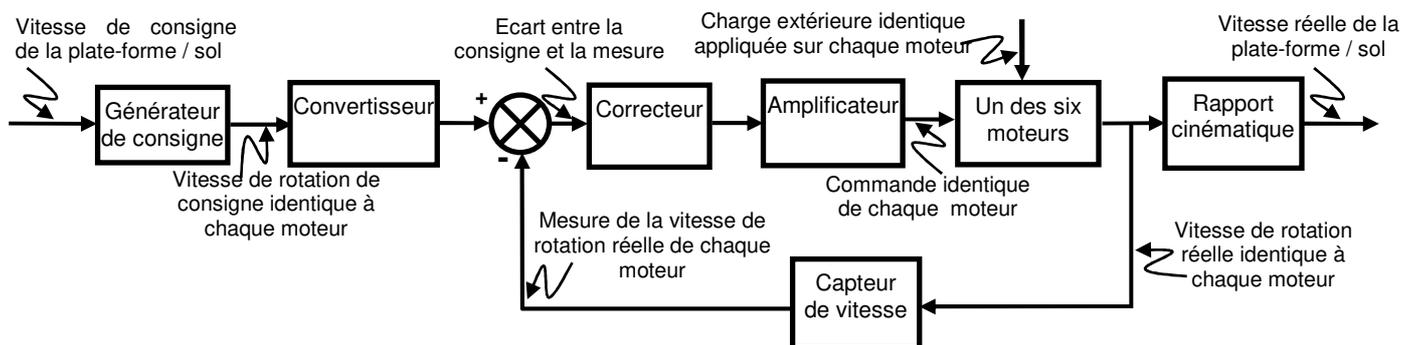
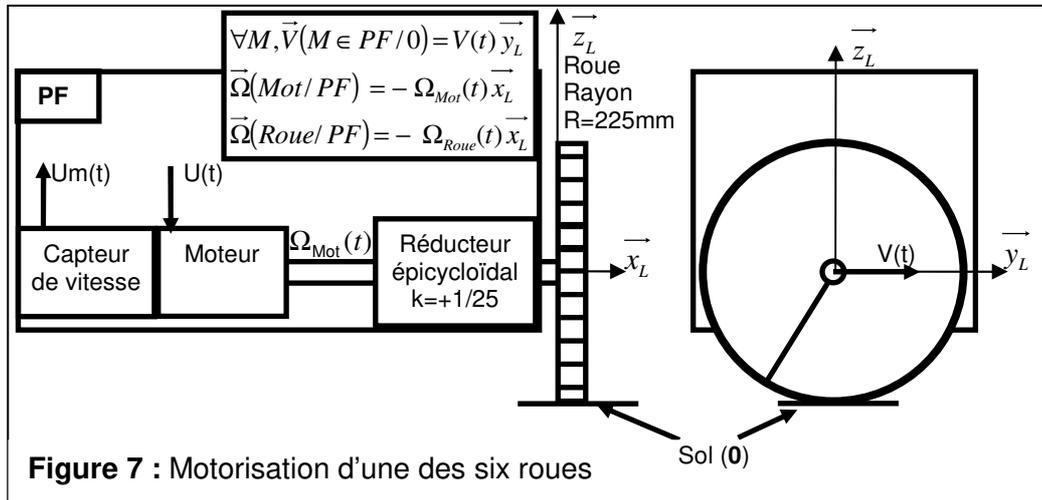


Figure 8 : Schéma bloc fonctionnel de l'asservissement en vitesse d'un des six moteurs

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/(rad/s)
Rapport cinématique	K_R (à déterminer)

Figure 9 : Fonctions de transfert

Cahier des charges à respecter :

Fonction	Critères	Niveaux
Asservir en vitesse la plate-forme par rapport au sol	STABILITE	MG= 6dB mini Mφ= 45° mini
	PRECISION	
	en poursuite <ul style="list-style-type: none"> Erreur statique à un échelon de vitesse en régulation <ul style="list-style-type: none"> Influence d'un échelon en couple de perturbation en régime permanent 	Nulle Nulle
	RAPIDITE	0,5 secondes
	<ul style="list-style-type: none"> Temps de réponse à 5% (à une entrée en échelon de vitesse) 	

Q2: 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 $\varepsilon(t)$ doit être nul.

Q3: Compléter le schéma bloc sur le document-réponse 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.

A partir de la modélisation des blocs, un schéma bloc à retour unitaire est tracé :

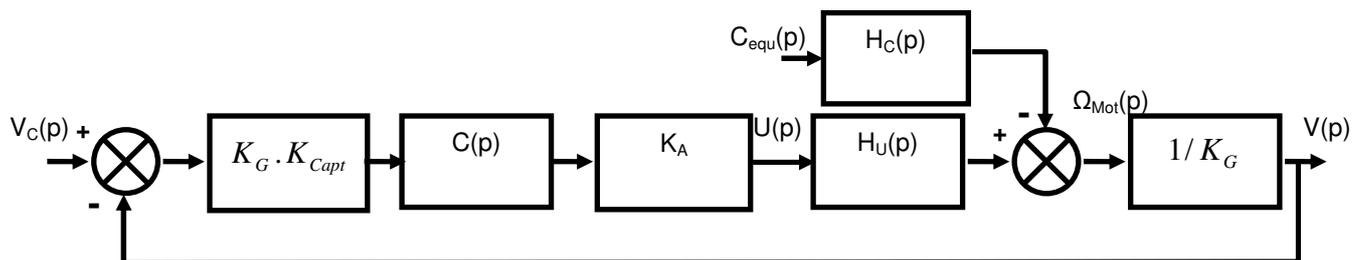


Figure 10 : Schéma bloc à retour unitaire

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

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

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

Etude 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.

Les diagrammes de Bode de la Fonction de Transfert en Boucle Ouverte $FTBO(p)$ non corrigée sont fournis sur le document-réponse (**Bode non corrigé**) pour $C(p) = 1$.

Q4: Le système étudié est-il stable théoriquement ? Justifier vos réponses.

Q5: Etudier 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_{CO} : $V_c(t) = V_{CO} \cdot u(t)$ (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.

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

Q6: 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.

Reprenons le diagramme de Bode de la Fonction de Transfert en Boucle Ouverte $FTBO(p)$ non corrigée (**Bode non corrigé**).

Q7: Compléter le document-réponse (**Bode non corrigé**) en traçant les diagrammes de Bode du correcteur avec $K_I = 1 \text{ s}^{-1}$. 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 $T_{5\% \text{ mini}} \cdot \omega_0 = 3$ avec ω_0 la pulsation propre non amortie d'un système fondamental du second ordre.

Q8: 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 $H_U(p)$. Justifier ce modèle à l'aide d'une étude asymptotique de la réponse temporelle à l'échelon de la fonction de transfert $H_U(p)$ non simplifiée. 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 $T_{5\% \text{ mini}}$ et comparer la au cahier des charges.

Etude 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 le document-réponse 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 5 secondes $C_{equ}(t) = u(t - 5)$;
- un gain du correcteur $K_p = 1$;
- différentes valeurs de T_I .

Q9: 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.

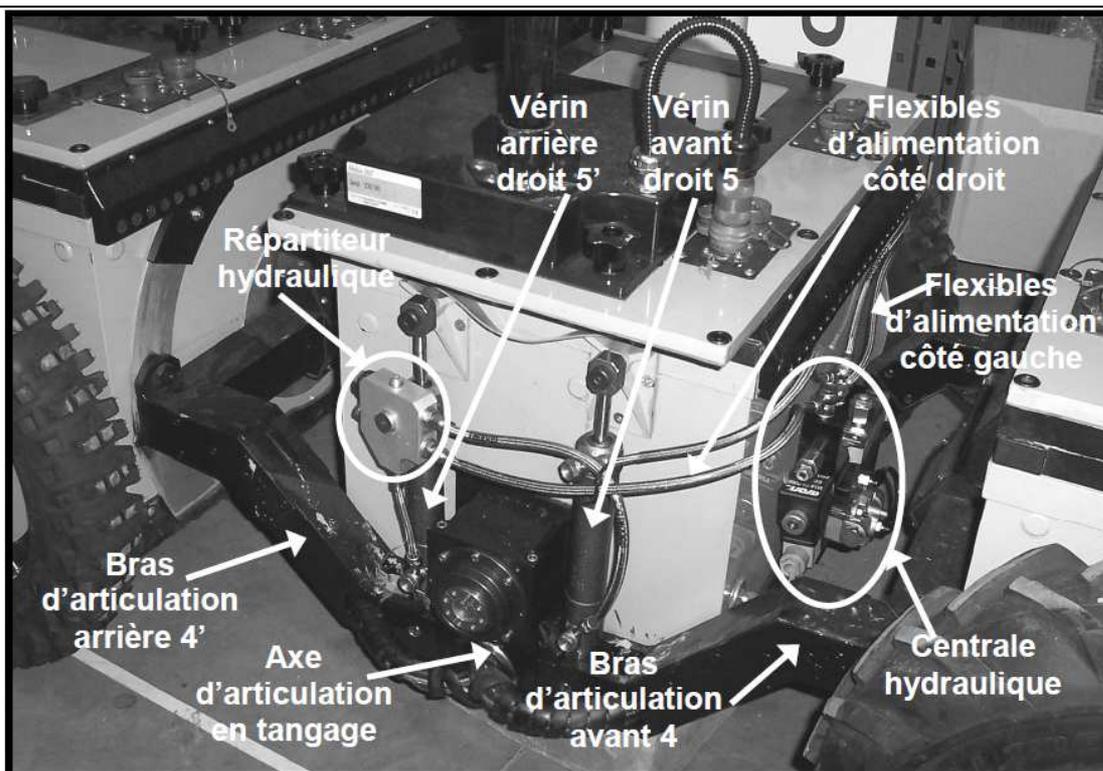
La valeur de T_I déterminée à la question précédente est retenue pour le réglage du correcteur proportionnel intégral. Il s'agit alors de choisir le gain du correcteur K_p à partir des simulations proposées sur le document-réponse.

Q10: Parmi les différentes valeurs de K_p , choisir la valeur qui assure un temps de réponse à 5% au plus près de la valeur fournie dans le cahier des charges.

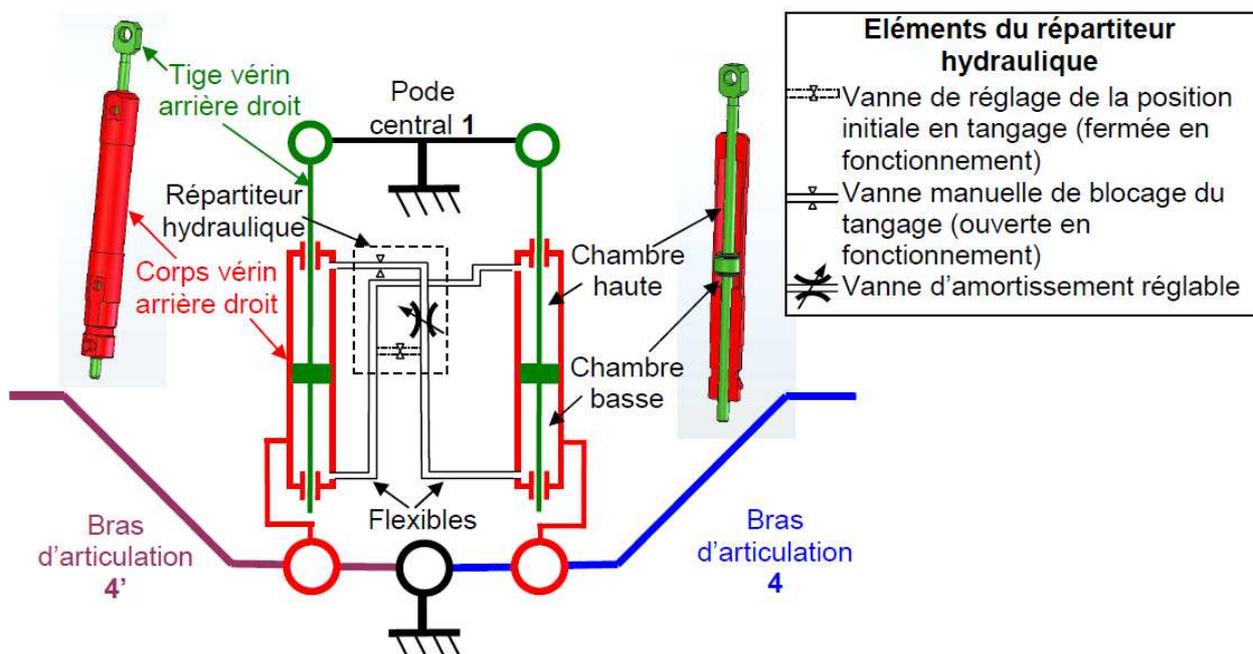
Avec le couple de valeurs (T_I et K_p) obtenu, la réponse fréquentielle du système en boucle ouverte a été tracée sur le document réponse.

Q11: Conclure quant à la capacité de ce correcteur à respecter tous les critères du cahier des charges.

CIRCUIT HYDRAULIQUE



Annexe 2 : Description du circuit hydraulique complet (fixé sur le pote central 1)
(La roue centrale droite a été démontée pour faciliter la visibilité)

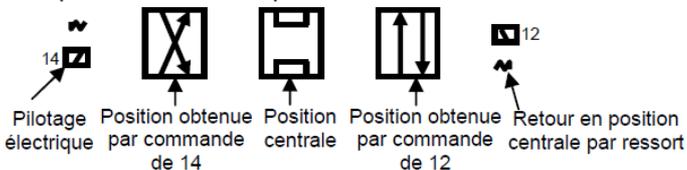
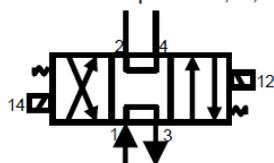


Annexe 3 : Schéma cinématique du montage des vérins de tangage (côté droit) et représentation du circuit hydraulique en mode passif (synchronisation et amortissement)

Fonction : Permettre de distribuer l'énergie hydraulique disponible suivant les ordres de commande

4 orifices : repères 1, 2, 3 et 4

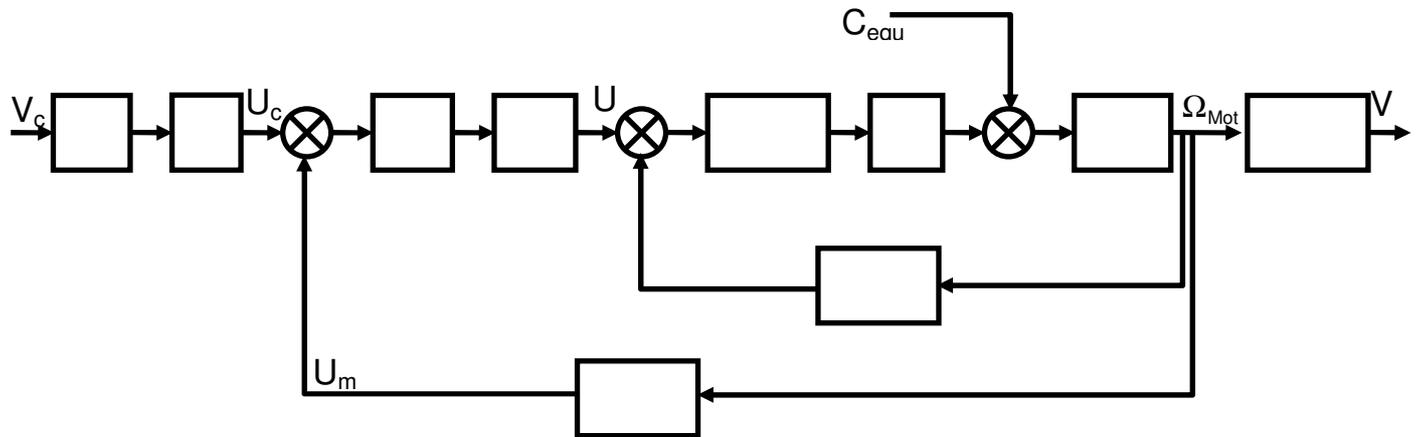
3 positions = 3 états possibles du distributeur



Annexe 4 : Normalisation et fonctionnement d'un distributeur 4/3

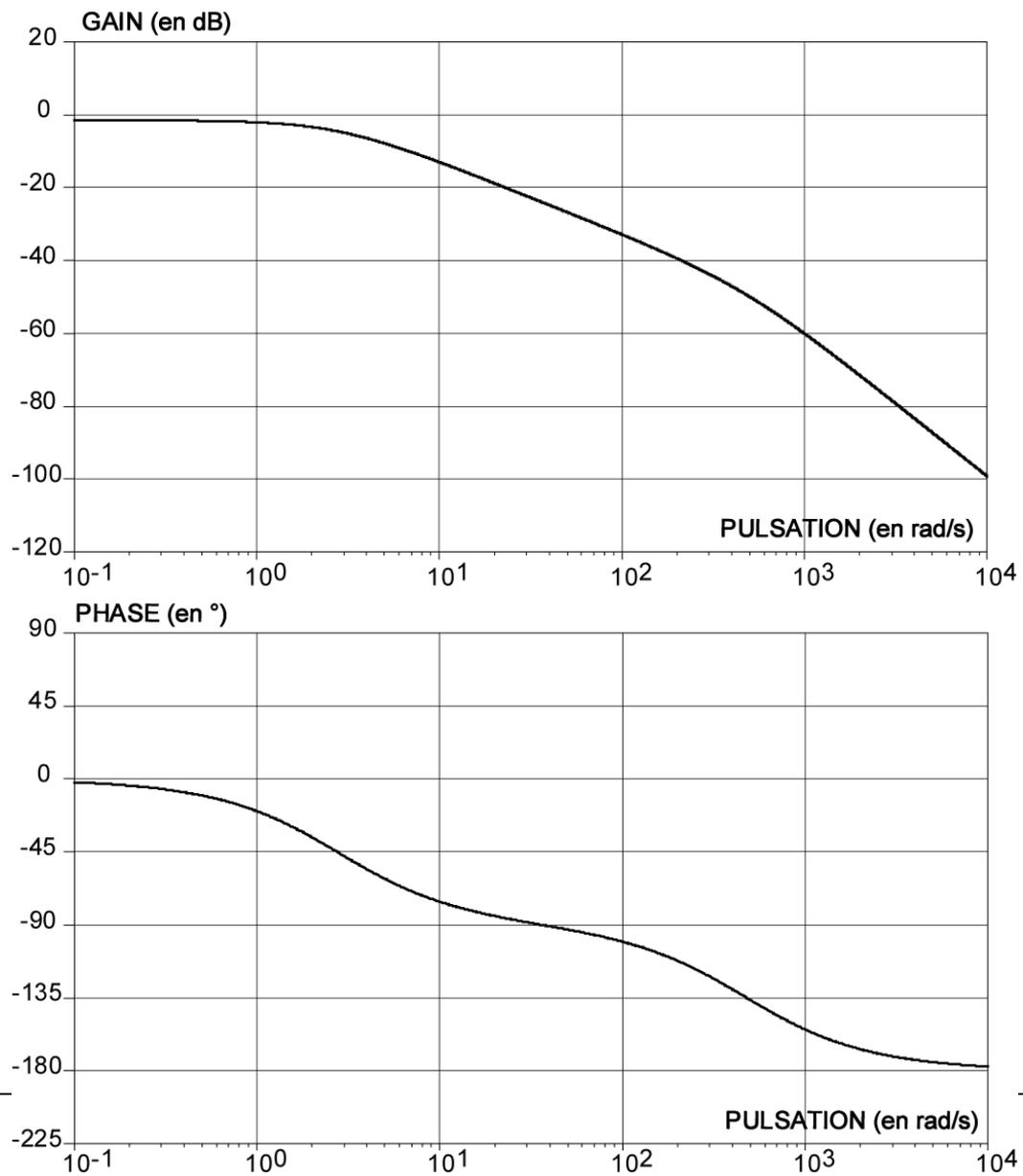
Document réponse

Question 3

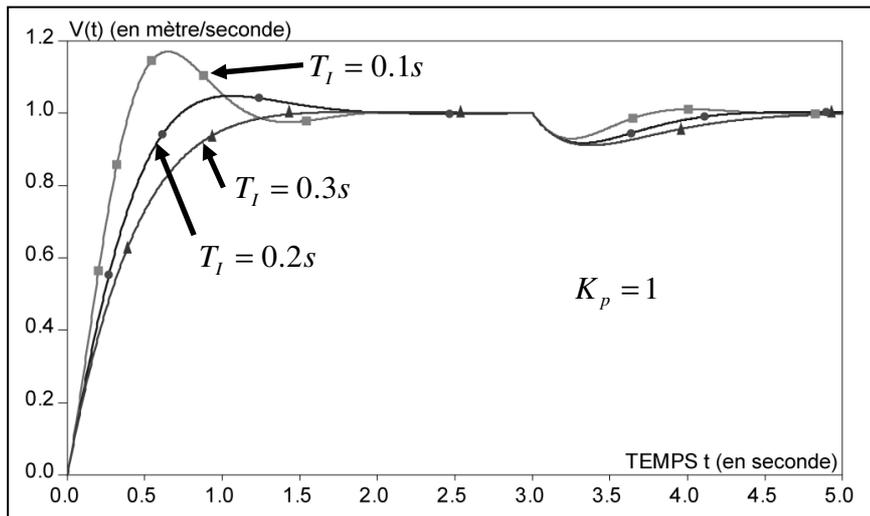


Question 7

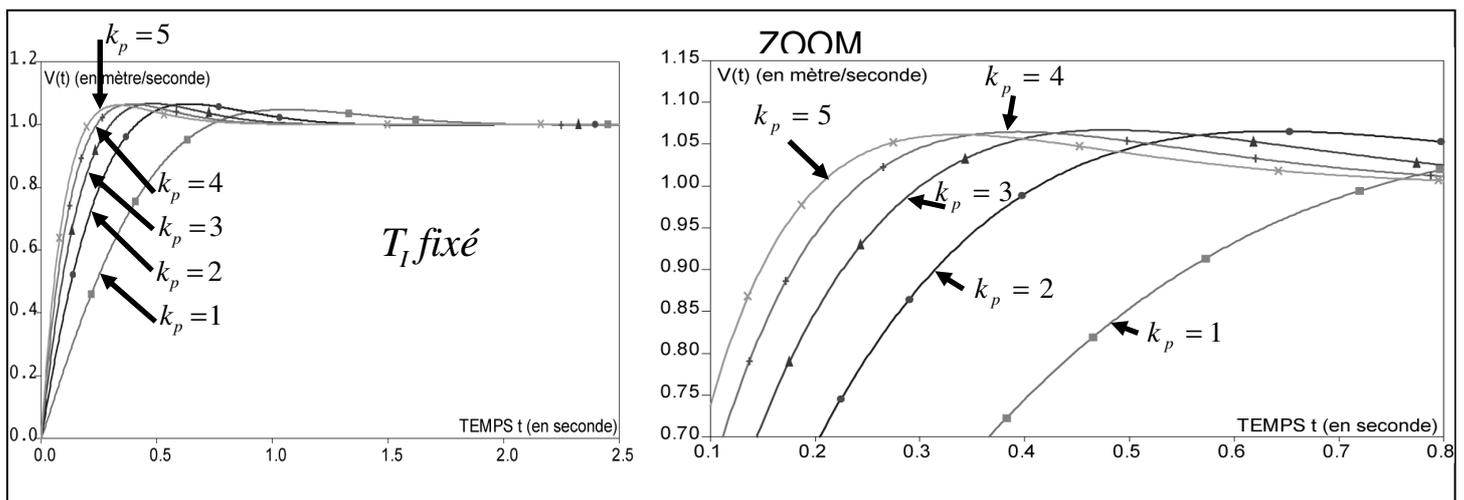
Bode non corrigé



Question 9



Question 10



Question 11