

Devoir en temps libre n°1 : Skypod, système automatisé de préparation de commande

Pour le mardi 4 novembre. Vous pouvez rendre une copie pour deux étudiants.

1 Présentation

Le système Skypod est une solution d'aide à la préparation de commande dans des zones de stockage de grande capacité. Il est conçu en France (région Hauts-de-France) par la société Exotec. Sa flexibilité et son adaptabilité en font un leader de son domaine, ce qui a permis à Exotec de devenir en 2022 la première licorne industrielle française (« start-up » valorisée à plus d'un milliard de dollars US). De grands noms internationaux du commerce en ligne ou physique comptent parmi ses principaux clients.

L'une de ses spécificités est son robot manipulateur de bac qui peut évoluer dans les trois dimensions. Il peut ainsi se déplacer sur le sol pour circuler dans les allées et rejoindre les postes de livraison (figure 1). Mais il peut également évoluer verticalement pour atteindre les bacs dans lesquels les produits sont stockés (figure 2).



Figure 1 : Robot évoluant horizontalement



Figure 2 - Robot évoluant verticalement

Quatre composants permettent de mettre en œuvre cette solution (figure 4) :

- la flotte de robots qui transporte les bacs entre opérateurs et zones de stockage,
- les racks, permettant de stocker les bacs, et dont le positionnement et la structure permettent les déplacements horizontaux et verticaux des robots,
- les stations qui permettent aux opérateurs de déposer et récupérer les produits dans les bacs apportés par les robots,
- le serveur permettant de gérer la flotte de robots en lien avec les consignes données par les stations.

Ce sujet s'intéresse particulièrement aux déplacements du robot. Un extrait du cahier des charges est donné sous forme de diagramme d'exigence par la figure 25 de l'annexe.

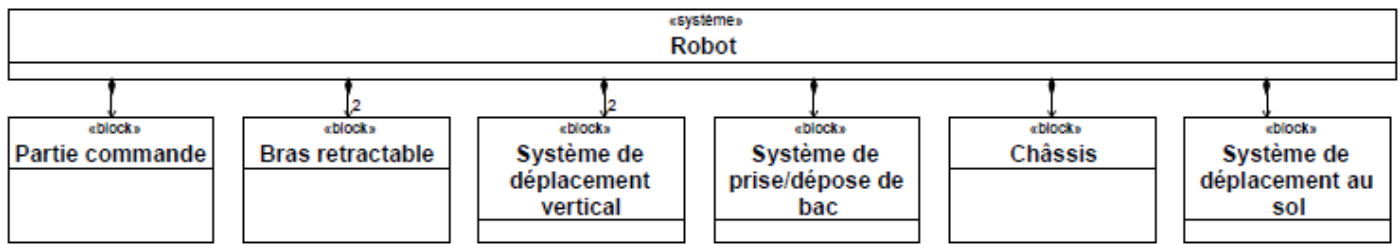


Figure 3 - Diagramme de définition de blocs d'un robot Skypod

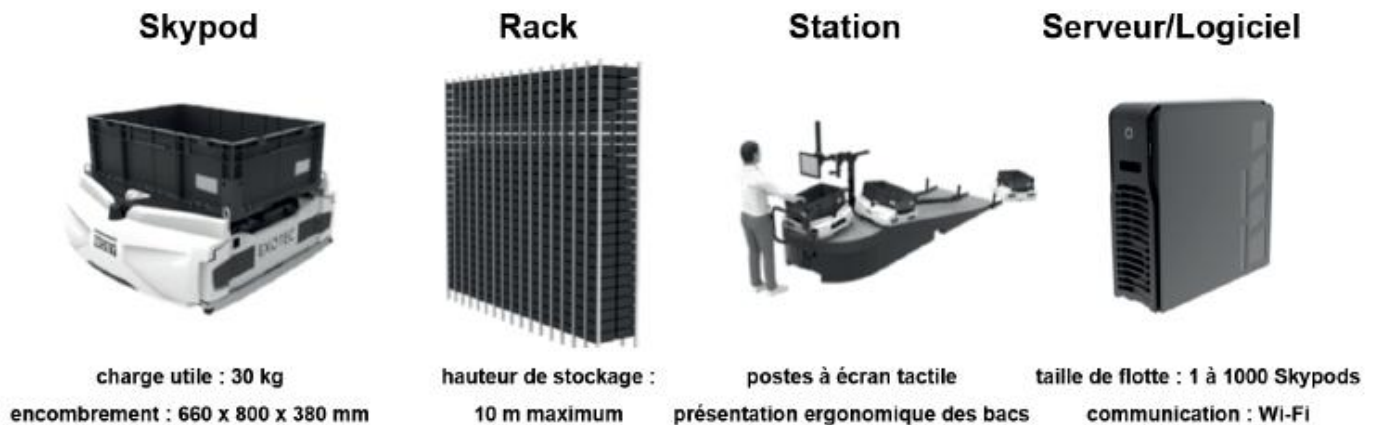


Figure 4 - Principaux composants de la solution Skypod

2 Analyse structurale du robot

La structure du robot est présentée figure 3. Ce robot est constitué d'un châssis et de différents sous-systèmes.

- La partie commande contrôle le robot, communique avec le serveur et fournit des consignes aux autres sous-systèmes.
- Le système de déplacement au sol permet au robot de se déplacer au sein de l'entrepôt. Il est composé de deux roues motrices (droite et gauche) commandées par deux moteurs et de deux autres roues libres permettant de garantir une bonne stabilité au sol (figure 1).
- Deux systèmes de déplacement vertical (droit et gauche) permettent au robot de s'élever entre les racks afin d'atteindre une hauteur donnée. Ils entraînent quatre pignons situés dans chaque coin du robot qui eux-mêmes engrènent sur des chaînes tendues verticalement le long des racks (figure 2 et figure 13). La liaison pignon/chaîne se comporte comme une liaison pignon/crémaillère.
- Deux systèmes de bras rétractables facilitent le déplacement au sol, chaque système de déplacement vertical est positionné sur un bras rétractable. Ils sont rentrés au sein du châssis lors des déplacements au sol, puis sortis lors des déplacements verticaux afin que les pignons entrent en contact avec les chaînes tendues. Un robot ne peut donc évoluer horizontalement qu'au sol.
- Un système de prise et dépose de bac translate le bac de sa position de stockage dans le rack à sa position de transport sur le robot (ou inversement). Il est constitué d'une fourche télescopique qui se déploie (figure 5 et figure 6) afin de se positionner sous le bac, puis rentre en déplaçant le bac avec elle.



Figure 5 - Prise d'un bac (fourche sous le bac dans un rack)

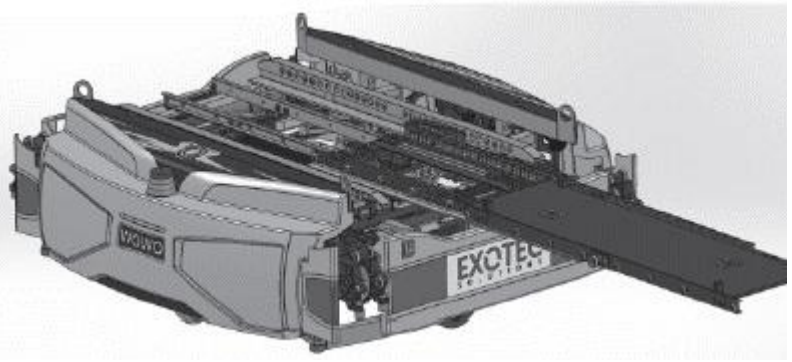


Figure 6 - Fourche déployée

Une fois le robot positionné aux pieds des racks, les bras rétractables sont déployés afin de mettre en contact les pignons sur les chaînes tendues le long des poteaux constituant les racks. La rotation des pignons entraînera alors l'ascension du robot, figure 12 et figure 13.

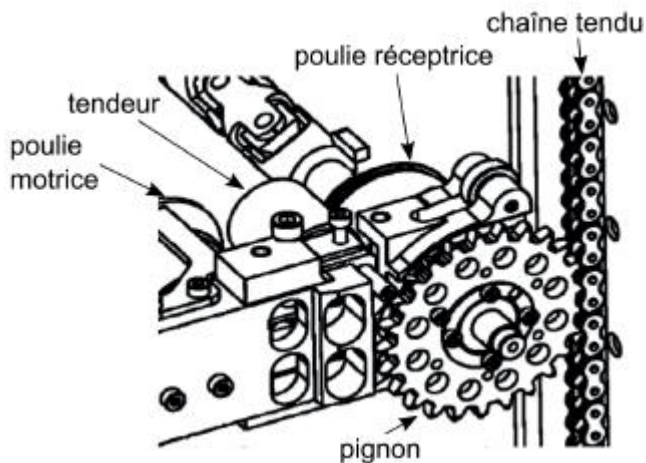


Figure 12 - Détail de l'engrènement d'un pignon sur la chaîne



Figure 13 - Vue du robot en montée (sans charge ni bac), avec pignons et chaînes redessinés

3 Asservissement de l'assiette du robot

Objectif : modéliser et mettre au point l'asservissement de l'inclinaison du robot.

Cette partie s'intéresse au contrôle de l'inclinaison du robot lors de la phase d'ascension, repérée par son angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale, noté $\alpha(t)$. Cette phase est schématisée figure 16, dans le cas horizontal ($\alpha = 0$) et dans le cas incliné ($\alpha \neq 0$). Les pignons sont ramenés dans le plan médian. Un sous-système non étudié ici permet de garantir le contact pignon/chaîne.

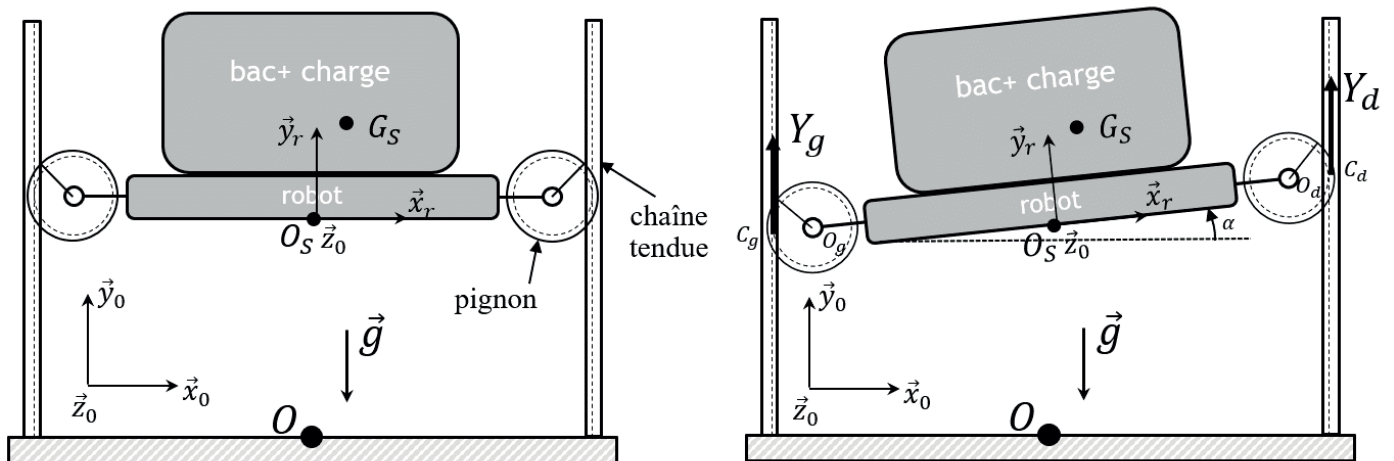


Figure 16 - Schématisation du robot en phase d'ascension, dans la configuration horizontale (à gauche) et inclinée (à droite).

On présente figure 16 la structure générale de l'asservissement associée à la phase étudiée. Cette inclinaison est modifiée grâce au différentiel de vitesse et de position des pignons gauche et droit. Un inclinomètre mesurant l'inclinaison du robot permet au calculateur de gérer l'asservissement.

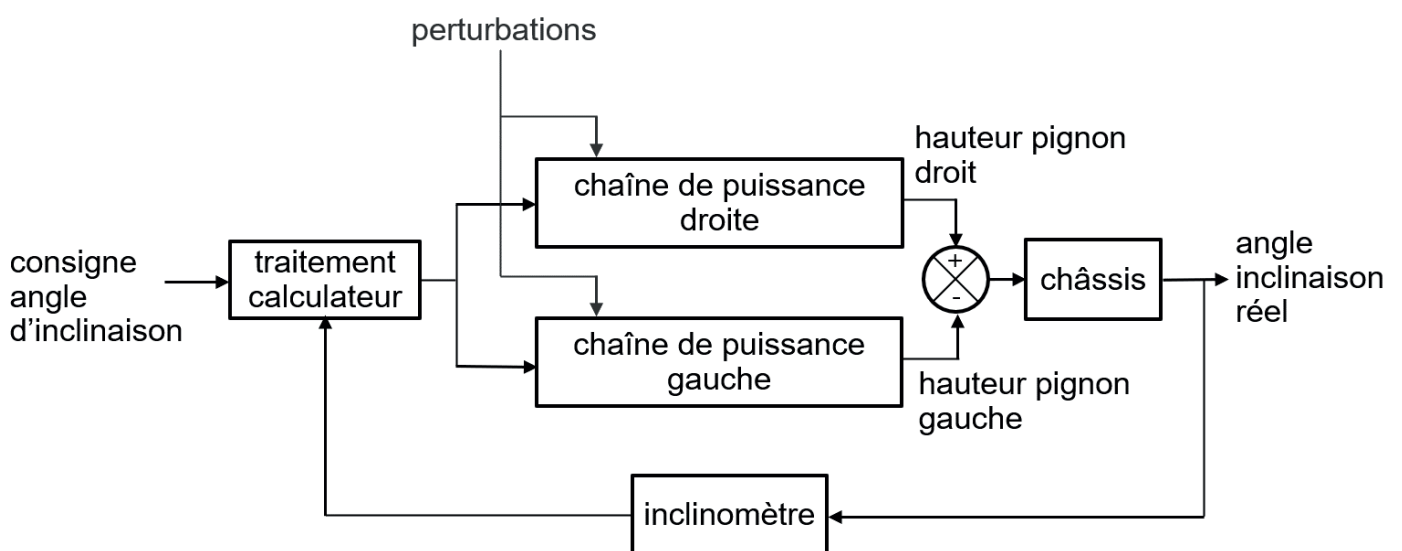


Figure 17 - Structure générale de l'asservissement en inclinaison du robot en phase d'ascension.

3.1 Modélisation de la motorisation

Un moteur d'ascension peut se modéliser comme une machine à courant continu dont on rappelle les équations :

$$u_m(t) = e(t) + R_m i_m(t) + L_m \frac{di_m(t)}{dt} ; \quad e(t) = K_e \cdot \omega_{m1}(t) ; \quad C_m(t) = K_c \cdot i_m(t) ;$$

$$J_{eq} \frac{d\omega_{m1}(t)}{dt} = C_m(t) - C_r - C_f(t)$$

et dont les notations sont détaillées tableau 5. Le schéma-blocs correspondant est ébauché dans le document réponse DR4. Les notations des variables dans le domaine de Laplace sont répertoriées dans le tableau 6.

Variables	Constantes
$u_m(t)$: tension moteur (V)	$R_m = 3 \, \Omega$: résistance de l'induit
$i_m(t)$: intensité moteur (A)	$L_m = 1 \, mH$: inductance de l'induit
$e(t)$: force contre-électromotrice (V)	$K_c = 2 \, N \cdot m \cdot A^{-1}$: constante de couple
$C_m(t)$: couple électromagnétique (N·m)	$K_e = 2 \, V \cdot s \cdot rad^{-1}$: constante électrique
C_r : couple résistant dû à la pesanteur ramené sur l'arbre moteur (N·m)	$J_{eq} = 1,14 \cdot 10^{-1} \, kg \cdot m^2$: inertie équivalente des pièces mobiles entraînées par le moteur, ramenée sur l'arbre moteur
$C_f(t)$: couple résistant dû à l'ensemble des frottements secs ramené sur l'arbre moteur (N·m)	

Tableau 5 - Variables et valeurs numériques utiles

Notation temporelle	Notation Laplace	Notation temporelle	Notation Laplace
$e(t)$	$E(p)$	$u_m(t)$	$U_m(p)$
$i_m(t)$	$I_m(p)$	$\omega_{m1}(t)$	$\Omega_{m1}(p)$
$C_m(t)$	$C_m(p)$	$C_f(t)$	$C_f(p)$
échelon unitaire	$\frac{1}{p}$	C_r	$\frac{C_r}{p}$

Tableau 6 - Notations dans le domaine de Laplace

Question 1 : En supposant les conditions initiales nulles, mettre les équations du moteur dans le domaine de Laplace. Compléter les blocs du DR4 au niveau des « ... », avec les fonctions de transfert et variables manquantes dans le schéma-blocs du moteur.

La fonction de transfert du moteur sans perturbation s'écrit :

$$H_m(p) = \frac{\Omega_{m1}(p)}{U_m(p)} = \frac{\frac{1}{K_e}}{1 + \frac{RJ_{eq}}{K_e K_c} p + \frac{LJ_{eq}}{K_e K_c} p^2}$$

Question 2 : En supposant $U_m(p) = 0$, redessiner le schéma bloc du document réponse DR5 de manière à calculer la fonction de transfert $H_{m2}(p) = \frac{\Omega_{m1}(p)}{C_f(p) + \frac{C_r}{p}}$. Déterminer la fonction de transfert $H_2(p)$ sous forme canonique. Préciser son ordre, sa classe et son gain.

Question 3 : Donner la relation liant : $\Omega_{m1}(p)$, $U_m(p)$, $C_f(p) + \frac{C_r}{p}$, $H_m(p)$ et $H_{m2}(p)$

Il est alors possible de modifier le schéma-blocs initial du moteur (DR4), avec perturbation, pour le mettre sous la forme proposée figure 18, dans laquelle $P(p)$ dépend du signal dû à la perturbation $C_f(p) + \frac{C_r}{p}$.

Question 4 : Exprimer $H_p(p)$ en fonction des caractéristiques du moteur. Préciser l'unité de $P(p)$.

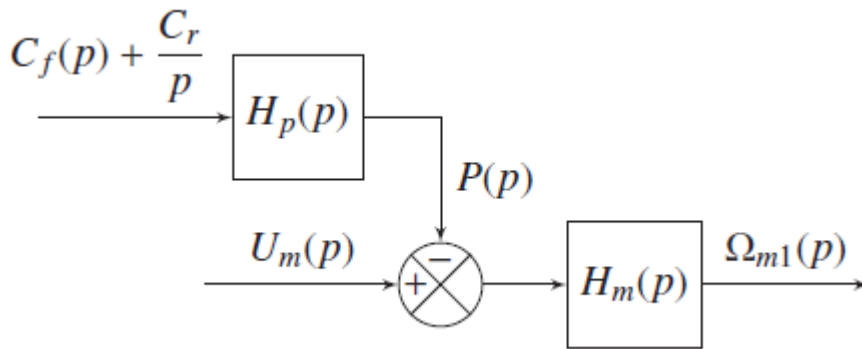


Figure 18 - Schéma-blocs modifié du moteur

Dans la suite, le signal $P(p)$ sera distingué en un signal $P_d(p)$ pour le moteur droit et $P_g(p)$ pour le moteur gauche.

3.2 Mise en place et correction de l'asservissement

Les activités précédentes permettent de mettre en place la modélisation complète de l'asservissement en inclinaison du robot dans la phase d'ascension (figure 19) en considérant que l'angle d'inclinaison reste petit. Les différentes variables dans le domaine de Laplace introduites sont détaillées dans le tableau 7.

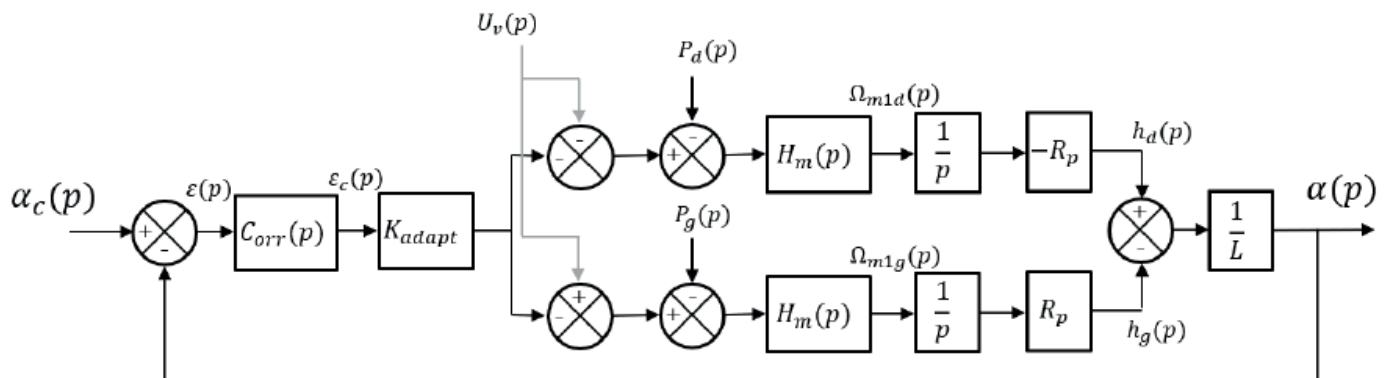


Figure 19 - Schéma-blocs de l'asservissement en inclinaison, en phase de mouvement vertical

Variables

$\alpha_c(p)$: consigne angulaire d'inclinaison

$\varepsilon(p)$: écart

$\varepsilon_c(p)$: écart corrigé

$P_g(p)$: perturbation moteur gauche

$h_g(p)$: altitude point O_g

$U_v(p)$: tension de consigne correspondant à la vitesse d'ascension souhaitée

$\alpha(p)$: angle d'inclinaison du robot

$\Omega_{m1d}(p)$: vitesse de rotation moteur droit

$\Omega_{m1g}(p)$: vitesse de rotation moteur gauche

$P_d(p)$: perturbation moteur droit

$h_d(p)$: altitude point O_d

K_{adapt} : gain adaptateur

Fonctions de transfert

$H_m(p)$: fonction de transfert du moteur

$C_{orr}(p)$: correcteur

R_p : rayon primitif du pignon

$L = \|\vec{O_g O_d}\|$

Tableau 7 - Définition des variables et fonctions de transfert (dans le domaine de Laplace)

Question 5 : Exprimer $h_d(p)$ et $h_g(p)$ en fonction des variables $\varepsilon_c(p)$, $U_c(p)$ et $P_d(p)$ ou $P_g(p)$.

On suppose maintenant que la charge contenue dans le bac est centrée sur le robot, c'est-à-dire : $P_d(p) = -P_g(p)$.

Question 6 : Montrer qu'il est alors possible de mettre le schéma-blocs initial sous la forme présentée par la figure 20. Pour cela, exprimer $H_{eq}(p)$ en fonction du contenu des blocs du schéma initial de la figure 19.

Question 7 : Donner la fonction de transfert en boucle ouverte (notée $H_{BO}(p)$) de ce système en fonction de $H_m(p)$, $C_{corr}(p)$, K_{adapt} et des paramètres géométriques. Préciser son ordre et sa classe si $C_{corr}(p) = 1$.

Remarque : $H_{BO}(p)$ permettra d'étudier la stabilité et la précision du système (en fin de 1^{ère} année de CPGE).

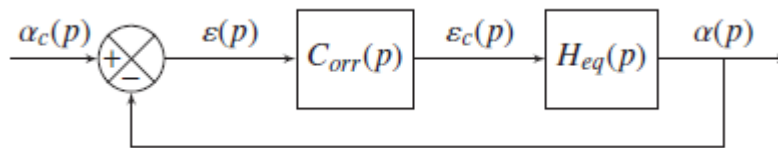


Figure 20 - Schéma-blocs simplifié de l'asservissement en inclinaison

On donne sur le DR5 la réponse indicielle (en boucle fermée) du système non corrigé (c'est-à-dire pour $C_{corr}(p) = 1$).

Question 8 : Vérifier si les exigences associées à l'asservissement en inclinaison du robot sont vérifiées (ne pas tenir compte des critères sur la bande passante et sur les marges de stabilité). Mettre en place les tracées permettant la vérification des critères considérés sur le DR5.

Quels que soient les résultats précédents, la fonction de transfert $H_{eq}(p)$ sera désormais prise de la forme :

$$H_{eq}(p) = \frac{K_{eq}}{p(1+\tau_1 p)(1+\tau_2 p)} \text{ avec } \tau_2 > \tau_1$$

Pour améliorer les performances du système, on décide d'utiliser un correcteur combinant :

- Correcteur proportionnel intégral : $\frac{1+T_i p}{T_i p}$ qui permet d'améliorer la précision vis-à-vis des perturbations.
- Correcteur à avance de phase : $\frac{1+a.T_{av} p}{1+T_{av} p}$ qui permet d'améliorer la stabilité.
- Le gain K_p permettra de trouver un compromis entre rapidité et stabilité/amortissement.

$$C_{oor}(p) = K_p \frac{1+T_i p}{T_i p} \cdot \frac{1+a.T_{av} p}{1+T_{av} p} \text{ avec } a > 1$$

Une partie non étudiée ici a permis de régler les paramètres τ_i , τ_{av} et a .

Le dernier réglage à effectuer est celui de K_p . Pour cela, on exploite une simulation numérique paramétrique, qui donne les résultats du document réponse DR6.

Question 9 : À l'aide du document DR6, donner une valeur de K_p permettant l'asservissement en position du robot.

Les travaux précédents permettent de régler au mieux le correcteur permettant l'asservissement en inclinaison du robot.

ANNEXE : Extrait du cahier des charges du robot

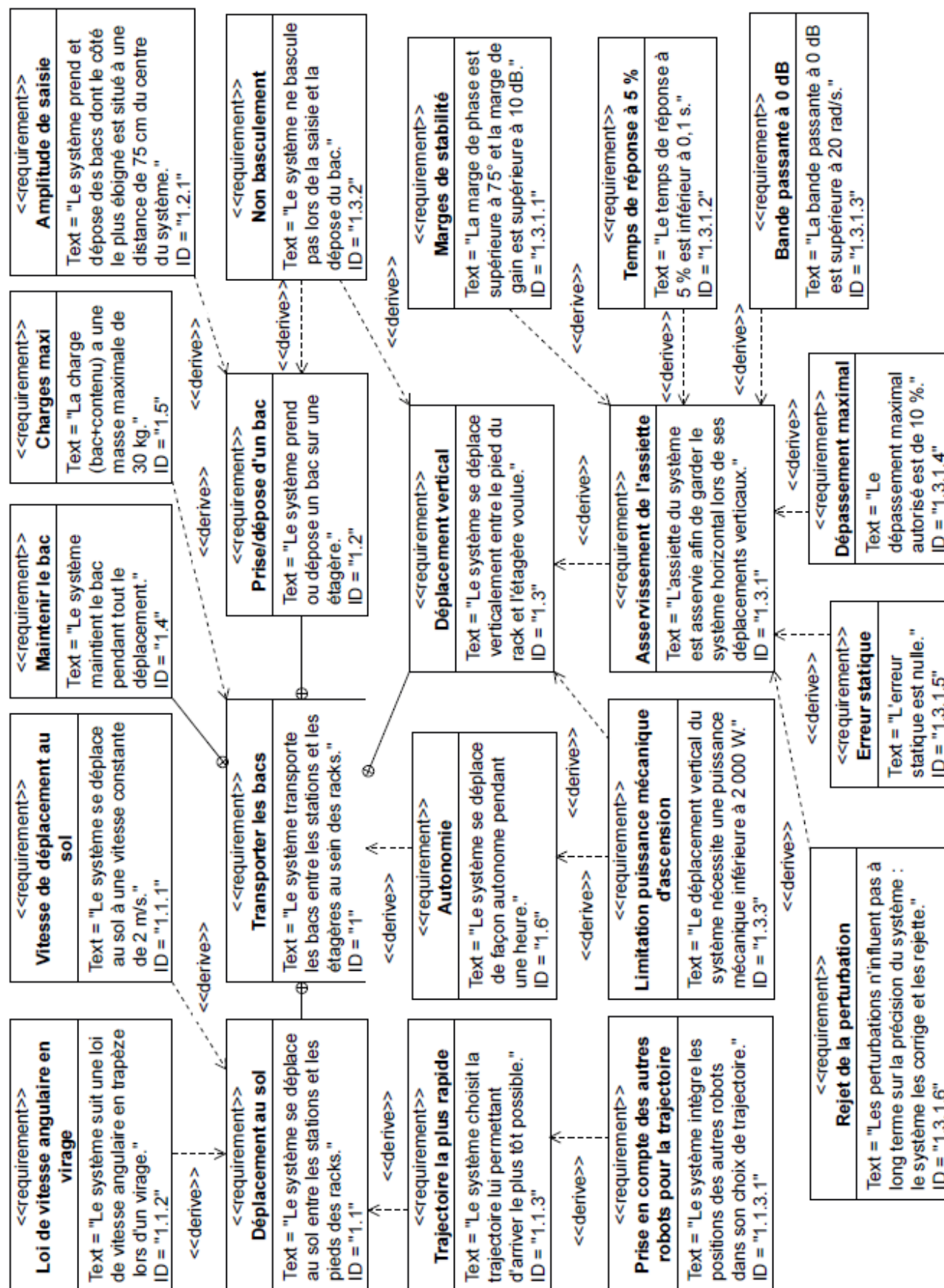
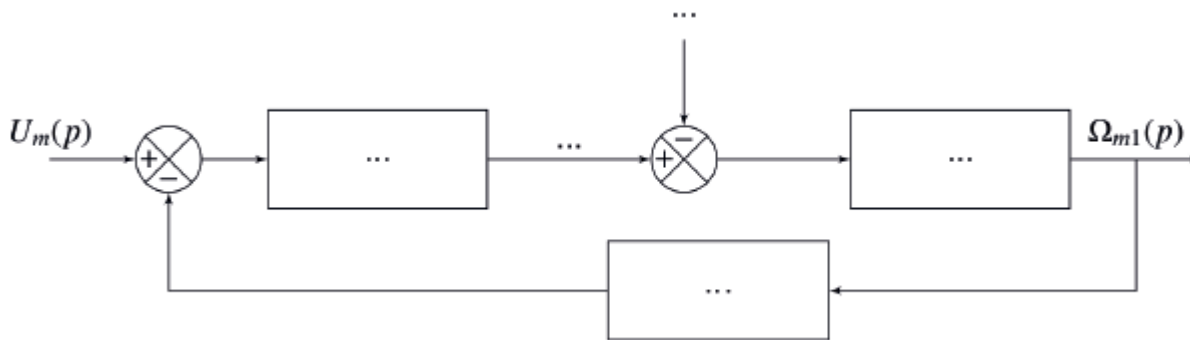
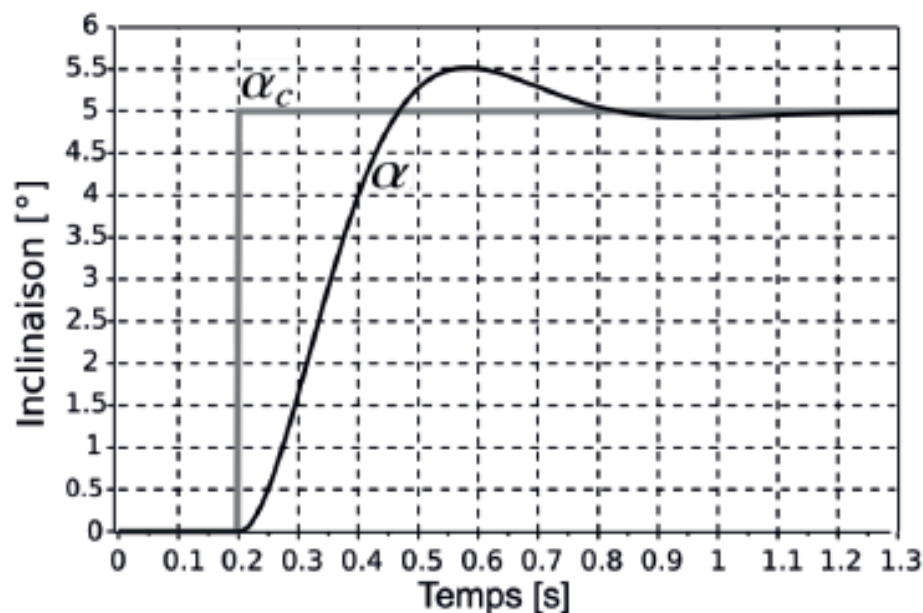


Figure 25 - Diagramme d'exigence extrait du cahier des charges du robot

Noms, Prénoms :

DR4 – Schéma-blocs associé à un moteur

DR5 – Réponses temporelle (BF), système non corrigé ($C_{orr}(p) = 1$)

Réponse temporelle du système non corrigé en
boucle fermée

DR6 – Réponses temporelle (BF), système corrigé pour différentes valeurs de K_p 