

## Application 03

## Robot de maraîchage Oz 440

CCP – MP – Florestan Mathurin

Savoirs et compétences :

□ ...

## Présentation du système

On s'intéresse à un robot de maraîchage Oz 440 développé par la société Naïo Technologies dont on donne une description structurelle ainsi qu'un extrait de cahier des charges. Ce robot est un outil autonome agricole capable d'assister les maraîchers dans les tâches les plus pénibles comme le transport de charges lors des récoltes et le désherbage mécanique à l'aide d'un outil de binage.

Ce robot de petite taille évolue directement entre les rangées de cultures pour un travail de précision. Il peut, par exemple, désherber et aussi suivre des personnes lors de la récolte tout en transportant des charges. Bien plus petit qu'un tracteur classique, il ne casse pas la structure naturelle du sol et évite ainsi le phénomène de compaction des sols provoqué habituellement par les tracteurs ou le piétinement de l'homme. Il roule lentement et passe au plus près des cultures sans risquer de les abîmer. Le robot est constitué d'une plate-forme mobile électrique à 4 roues motrices sur laquelle sont fixés divers outils et capteurs. Le moteur du groupe propulsion gauche actionne les 2 roues gauches ensemble et le moteur du groupe propulsion droit actionne les 2 roues droites ensemble, de façon à reproduire finalement un comportement de type « chenilles ». On s'intéresse à l'asservissement de position du robot suivant la ligne moyenne à suivre dans l'allée. On donne les différents modèles de connaissance associés à cet asservissement.

La variable  $y(t)$  correspond à la distance d'un point particulier du robot par rapport à la ligne moyenne dans le rang de culture. Le modèle de l'asservissement de suivi de l'allée du robot est donné par le schéma-bloc suivant.

Détermination de la fonction de transfert  $H_1(p)$  du groupe propulsion

On donne dans un premier temps le modèle de connaissance du groupe propulsion gauche. On supposera que toutes les conditions initiales sont nulles et que  $J, R_m, r, K_i, K_e$  sont des coefficients constants.

	Modèle de connaissance
Le réducteur, de rapport de réduction $r$ , permet de réduire la vitesse angulaire du moteur $\omega_m(t)$ en une vitesse $\omega_g(t)$ disponible pour la roue gauche	$\omega_g(t) = r \cdot \omega_m(t)$
La force électromotrice $e_m(t)$ du moteur est couplée à la vitesse de rotation de l'arbre moteur $\omega_m(t)$ grâce à la constante de force électromotrice $K_e$	$e_m(t) = K_e \omega_m(t)$
L'équation mécanique du moteur tournant à la vitesse angulaire $\omega_m(t)$ permet de lier l'inertie $J$ de l'arbre en rotation et le couple moteur $C_m(t)$	$J \frac{d\omega_m(t)}{dt} = C_m(t)$
L'équation électrique au niveau de l'induit du moteur permet de lier la tension $U_g(t)$ , le courant $i_m(t)$ , la résistance de l'induit $R_m$	$U_g(t) = R_m i_m(t) + e_m(t)$
Le couple moteur $C_m(t)$ est couplé à l'intensité $i_m(t)$ dans la bobine du moteur grâce à la constante de couple $K_i$	$C_m(t) = K_i i_m(t)$

**Question 1** Appliquer la transformée de Laplace sur les différentes équations du modèle de connaissance.

**Question 2** Dédurre des questions précédentes le schéma-bloc correspondant au groupe propulsion gauche seul.

**Question 3** Déterminer l'expression de la fonction de transfert du système en boucle fermée du groupe propulsion gauche  $H_g(p) = \frac{\Omega_g(p)}{U_g(p)}$  en fonction de  $r, K_i, K_e, J$  et  $R_m$ . Montrer que cette fonction de transfert peut se mettre sous la forme d'un système du premier ordre  $H_g(p) = \frac{K}{1 + \tau p}$  où  $K$  et  $\tau$  sont 2 constantes à déterminer. Donner les unités de  $K$  et  $\tau$ .

Pour faire pivoter le robot d'un angle  $\varphi(t)$  autour de l'axe vertical ascendant, il est nécessaire de faire tourner les roues droites et gauches avec 2 vitesses angulaires différentes de façon à reproduire finalement un comportement de type « chenilles ».

## Notations

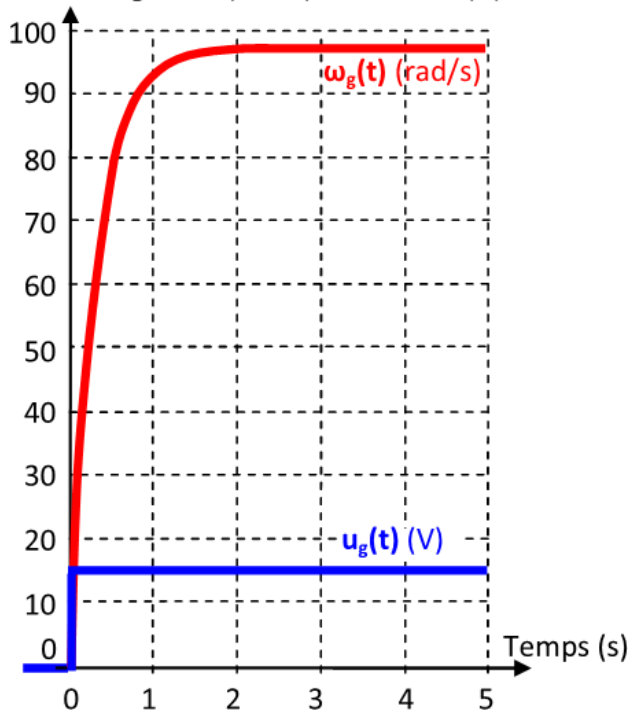
- Vitesse angulaire moyenne de rotation des roues :  $\omega_r(t)$ .
- Différence de vitesse de rotation angulaire entre roues droites et roues gauches :  $\Delta\omega(t) = \omega_d(t) - \omega_g(t)$ .
- Vitesse de rotation des roues gauches et droites :  $\omega_g(t)$  et  $\omega_d(t)$  avec  $\omega_g(t) = \omega_r(t) - \Delta\omega(t)/2$  et  $\omega_d(t) = \omega_r(t) + \Delta\omega(t)/2$ .
- La différence de vitesse de rotation entre roues droites et roues gauches, représentée par  $\Delta\omega(t)$ , permet de contrôler l'orientation du robot, alors que la vitesse moyenne de rotation des roues  $\omega_r(t)$  permet de contrôler la vitesse  $V(t)$  de déplacement en translation du robot.
- Tension de consigne utile pour la rotation :  $\Delta U(t) = U_d(t) - U_g(t)$ .
- Tension de consigne des moteurs gauches et droits :  $U_g(t) = U_m(t) - \Delta U(t)/2$  et  $U_d(t) = U_m(t) + \Delta U(t)/2$ .

- Transformées de Laplace des tensions :  $U_g(p)$ ,  $U_d(p)$  et  $\Delta U(p)$ .
- Transformées de Laplace des vitesses de rotation :  $\Omega_g(p)$ ,  $\Omega_d(p)$  et  $\Delta\Omega(p)$ .

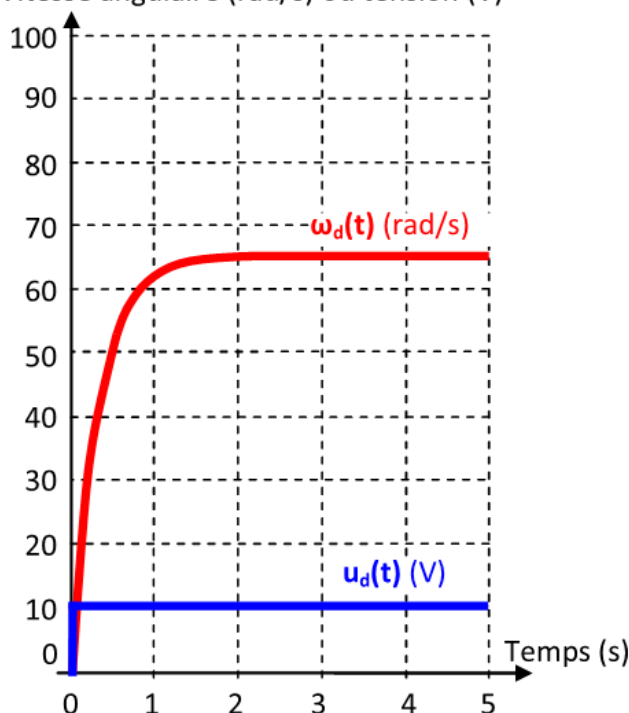
**Question 4** A l'aide des relations ci-dessus, déterminer la fonction de transfert en boucle fermée du groupe propulsion  $H_1(p) = \frac{\Delta\Omega(p)}{\Delta U(p)}$ . Montrer que cette fonction de transfert peut se mettre sous la forme d'un système du premier ordre.

On donne les tracés de la réponse à un échelon des chaînes de propulsion gauche et droite.

Vitesse angulaire (rad/s) ou tension (V)



Vitesse angulaire (rad/s) ou tension (V)



**Question 5** Déterminer par identification les expressions des fonctions de transfert  $H_g(p) = \frac{\Omega_g(p)}{U_g(p)}$  et  $H_d(p) = \frac{\Omega_d(p)}{U_d(p)}$ . Donner les valeurs numériques des coefficients de ces fonctions de transfert.

### Détermination de la fonction de transfert $H_2(p)$ du suivi de la trajectoire

La modélisation par schéma bloc du suivi de la trajectoire est ci-dessous. La position du robot est repérée dans le plan  $(O, \vec{x}, \vec{y})$  par ses coordonnées  $x(t)$  et  $y(t)$  ainsi que par l'angle du robot avec la ligne moyenne  $\varphi(t)$ .

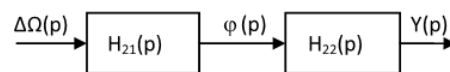


Schéma-bloc du suivi de trajectoire.

On donne le modèle de connaissance du suivi de trajectoire obtenu à l'aide de modèles cinématiques. On supposera que toutes les conditions initiales sont nulles et que  $e$  et  $R$  sont des coefficients constants.

	Modèle de connaissance
La vitesse de rotation du robot $\frac{d}{dt}\varphi(t)$ par rapport à la verticale ascendante dépend du rayon des roues $R$ , de la demi-largeur du robot noté $e$ et de la différence de vitesse de rotation angulaire entre roues droites et roues gauches	$R \cdot \Delta\omega(t) = 2 \cdot e \cdot \frac{d}{dt}\varphi(t)$
Pour des petits angles, la vitesse de déplacement latéral $\frac{d}{dt}y(t)$ dépend de la vitesse de translation du robot suivant l'axe $\vec{x}$ noté $V$ et de l'angle de rotation du robot par rapport à la verticale ascendante $\varphi(t)$	$\frac{d}{dt}y(t) = V \cdot \varphi(t)$

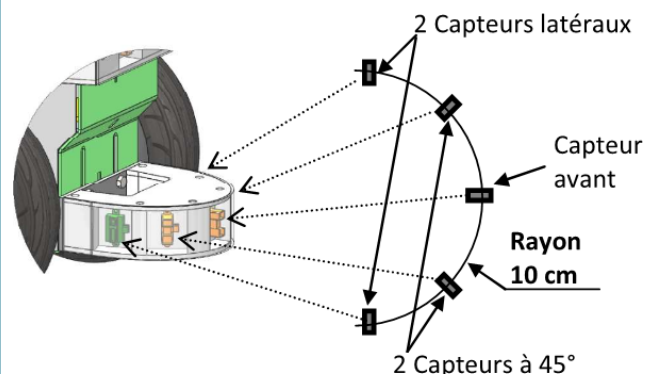
**Question 6** Appliquer la transformée de Laplace sur les 2 relations cinématiques proposées.

**Question 7** En déduire l'expression des fonctions de transfert  $H_{21}(p)$ ,  $H_{22}(p)$  puis  $H_2(p)$ .

### Détermination de la fonction de transfert $H_3(p)$ correspondant au « capteur de distance »

Les 5 capteurs utilisés pour le guidage dans le rang de culture sont installés sur un demi-cercle à l'avant du robot :

- capteur avant pour la détection des obstacles;
- capteurs latéraux pour la mesure de distance avec les cultures;
- capteurs à 45° pour la mesure de distance avec avant anticipation.



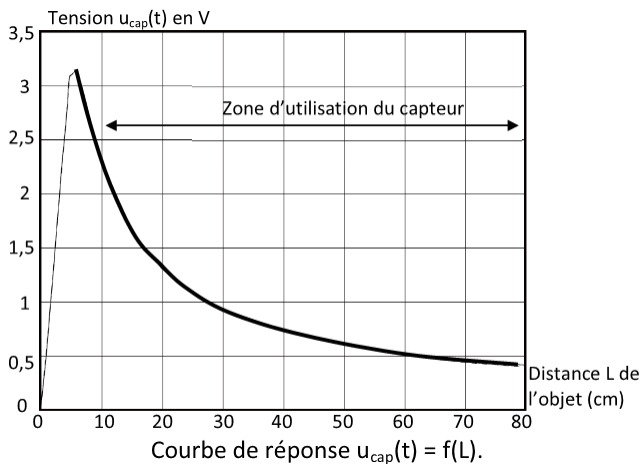
Localisation des capteurs (vue de dessus)

Ces 5 capteurs de distance qui détectent la présence d'objets entre 10 et 80 cm sont des capteurs infrarouges type « télémètre ». Ils ont une courbe de réponse  $u_{\text{cap}}(t)$  en fonction de la distance  $L$  de l'objet.

On suppose que seuls les 2 capteurs latéraux sont utilisés pendant le déplacement en ligne droite. Ils sont utilisés en différentiel tel que :  $u_{\text{mes}}(t) = u_{\text{cap gauche}}(t) - u_{\text{cap droit}}(t)$ .

**Notation** : transformée de Laplace de la tension  $u_{\text{mes}}(t)$  :  $U_{\text{mes}}(p)$ .

La fonction de transfert  $H_3(p) = \frac{U_{\text{mes}}(p)}{Y(p)}$  du bloc « capteur de distance » est supposée réduite à un gain pur noté  $K_c$ . On note  $u_{\text{capt } 0}$  la tension fournie par les 2 capteurs latéraux lorsque le robot est centré entre les 2 rangs de culture distants de 70 cm.



**Question 8** Réaliser un schéma en vue de dessus permettant de visualiser le robot positionné dans l'allée avec ses 2 capteurs latéraux. Indiquer sur ce schéma les distances entre les capteurs et les rangées de culture.

**Question 9** Quelle est la valeur de la tension  $u$  à 0,1 V près? Quelle est la tension  $u_{\text{capt droit}}$  lorsque le robot est décalé de  $y = +5$  cm suivant l'axe  $\vec{y}$  entre ces 2 rangs de culture? Quelle est la tension  $u_{\text{capt gauche}}$  à ce même instant?

**Question 10** En déduire le gain  $K_c$  du bloc « capteur de distance » autour de ce point de fonctionnement et préciser son unité.

## Réglage du gain d'adaptation

Le bloc d'adaptation est un gain proportionnel noté  $K_a$  qui permet de convertir la consigne  $y_{\text{consigne}}(t)$  en une tension  $u_{\text{consigne}}(t)$  image de la consigne.

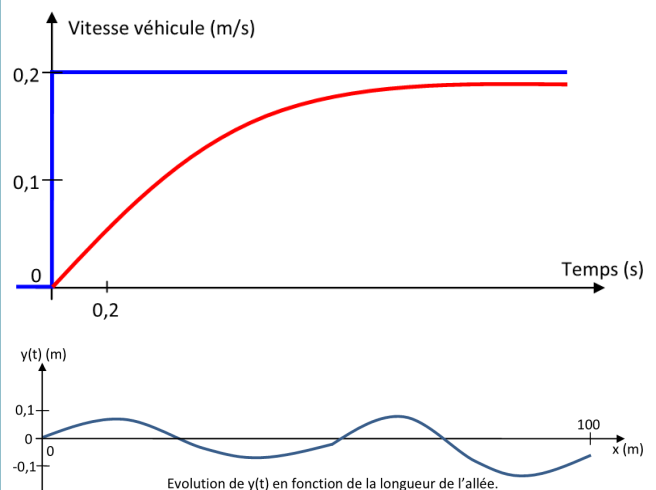
**Question 11** Comment choisir le gain d'adaptation  $K_a$  pour que la position  $y(t)$  en sortie de l'asservissement soit correctement asservie sur la position de consigne  $y_{\text{consigne}}(t)$  (on cherche dans ce cas à obtenir un écart  $\varepsilon(p)$  nul lorsque la consigne et la sortie sont égales).

On considère dans un premier temps que le correcteur est un correcteur proportionnel. On note donc la la fonction de transfert de ce dernier  $C(p) = K_p$ .

**Question 12** Déterminer la fonction de transfert boucle ouverte  $FTBO(p) = \frac{U_{\text{mes}}(p)}{\varepsilon(p)}$ . Donner la classe et l'ordre de cette fonction de transfert.

## Analyse des performances obtenues.

On donne ci-dessous la courbe donnant l'évolution du paramètre  $y(t)$  sur une allée de 100 m pour un premier réglage de correcteur. On donne d'autre part la réponse du véhicule en vitesse de translation pour une consigne échelon de 0,2 m/s.



**Question 13** Déterminer si ce réglage semble adapté vis-à-vis des exigences du cahier des charges. Justifier la réponse en laissant notamment apparaître les tracés utiles sur les courbes.

Application 03 –  
Corrigé

## Robot de maraîchage Oz 440

CCP – MP – Florestan Mathurin

Savoirs et compétences :

□ ...

## Présentation du système

Détermination de la fonction de transfert  $H_1(p)$  du groupe propulsion

On donne dans un premier temps le modèle de connaissance du groupe propulsion gauche. On supposera que toutes les conditions initiales sont nulles et que  $J$ ,  $R_m$ ,  $r$ ,  $K_i$ ,  $K_e$  sont des coefficients constants.

	Modèle de connaissance
Le réducteur, de rapport de réduction $r$ , permet de réduire la vitesse angulaire du moteur $\omega_m(t)$ en une vitesse $\omega_g(t)$ disponible pour la roue gauche	$\omega_g(t) = r \cdot \omega_m(t)$
La force électromotrice $e_m(t)$ du moteur est couplée à la vitesse de rotation de l'arbre moteur $\omega_m(t)$ grâce à la constante de force électromotrice $K_e$	$e_m(t) = K_e \cdot \omega_m(t)$
L'équation mécanique du moteur tournant à la vitesse angulaire $\omega_m(t)$ permet de lier l'inertie $J$ de l'arbre en rotation et le couple moteur $C_m(t)$	$J \cdot \frac{d\omega_m(t)}{dt} = C_m(t)$
L'équation électrique au niveau de l'induit du moteur permet de lier la tension $U_d(t)$ , le courant $i_m(t)$ , la résistance de l'induit $R_m$	$U_d(t) = R_m \cdot i_m(t) + e_m(t)$
Le couple moteur $C_m(t)$ est couplé à l'intensité $i_m(t)$ dans la bobine du moteur grâce à la constante de couple $K_i$	$C_m(t) = K_i \cdot i_m(t)$

**Question 1** Appliquer la transformée de Laplace sur les différentes équations du modèle de connaissance.

Correction

**Question 2** Dédurre des questions précédentes le schéma-bloc correspondant au groupe propulsion gauche seul.

Correction

**Question 3** Déterminer l'expression de la fonction de transfert du système en boucle fermée du groupe propulsion gauche  $H_g(p) = \frac{\Omega_g(p)}{U_g(p)}$  en fonction de  $r$ ,  $K_i$ ,  $K_e$ ,  $J$  et  $R_m$ . Montrer que cette fonction de transfert peut se mettre sous la forme d'un système du premier ordre  $H_g(p) = \frac{K}{1 + \tau p}$  où  $K$  et  $\tau$  sont 2 constantes à déterminer. Donner les unités de  $K$  et  $\tau$ .

Correction

Pour faire pivoter le robot d'un angle  $\varphi(t)$  autour de l'axe vertical ascendant, il est nécessaire de faire tourner les roues droites et gauches avec 2 vitesses angulaires différentes de façon à reproduire finalement un comportement de type « chenilles ».

## Notations

- Vitesse angulaire moyenne de rotation des roues :  $\omega_r(t)$ .

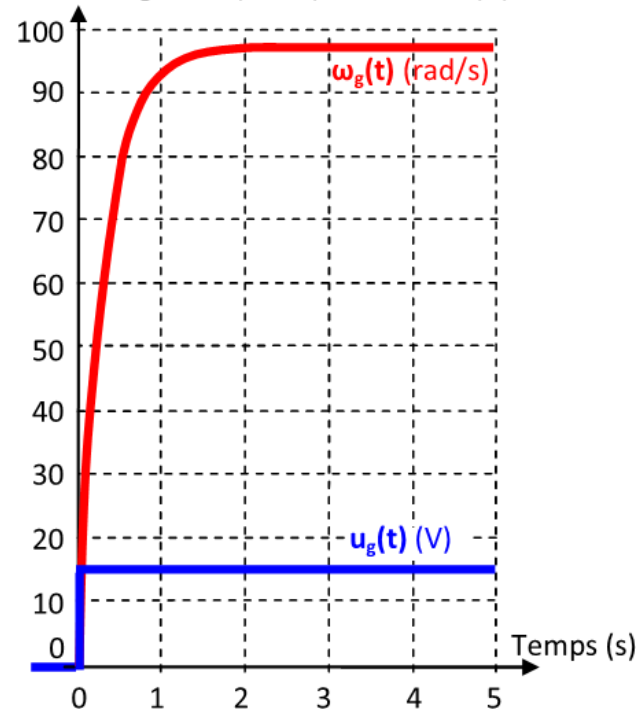
- Différence de vitesse de rotation angulaire entre roues droites et roues gauches :  $\Delta\omega(t) = \omega_d(t) - \omega_g(t)$ .
- Vitesse de rotation des roues gauches et droites :  $\omega_g(t)$  et  $\omega_d(t)$  avec  $\omega_g(t) = \omega_r(t) - \Delta\omega(t)/2$  et  $\omega_d(t) = \omega_r(t) + \Delta\omega(t)/2$ .
- La différence de vitesse de rotation entre roues droites et roues gauches, représentée par  $\Delta\omega(t)$ , permet de contrôler l'orientation du robot, alors que la vitesse moyenne de rotation des roues  $\omega_r(t)$  permet de contrôler la vitesse  $V(t)$  de déplacement en translation du robot.
- Tension de consigne utile pour la rotation :  $\Delta U(t) = U_d(t) - U_g(t)$ .
- Tension de consigne des moteurs gauches et droits :  $U_g(t) = U_m(t) - \Delta U(t)/2$  et  $U_d(t) = U_m(t) + \Delta U(t)/2$ .
- Transformées de Laplace des tensions :  $U_g(p)$ ,  $U_d(p)$  et  $\Delta U(p)$ .
- Transformées de Laplace des vitesses de rotation :  $\Omega_g(p)$ ,  $\Omega_d(p)$  et  $\Delta\Omega(p)$ .

**Question 4** A l'aide des relations ci-dessus, déterminer la fonction de transfert en boucle fermée du groupe propulsion  $H_1(p) = \frac{\Delta\Omega(p)}{\Delta U(p)}$ . Montrer que cette fonction de transfert peut se mettre sous la forme d'un système du premier ordre.

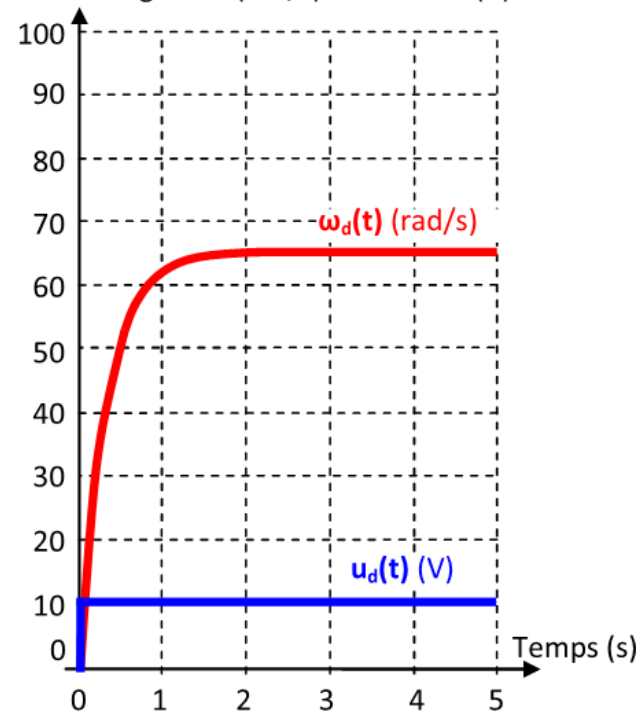
Correction

On donne les tracés de la réponse à un échelon des chaînes de propulsion gauche et droite.

Vitesse angulaire (rad/s) ou tension (V)



Vitesse angulaire (rad/s) ou tension (V)



**Question 5** Déterminer par identification les expressions des fonctions de transfert  $H_g(p) = \frac{\Omega_g(p)}{U_g(p)}$  et  $H_d(p) = \frac{\Omega_d(p)}{U_d(p)}$ . Donner les valeurs numériques des coefficients de ces fonctions de transfert.

**Correction**

**Détermination de la fonction de transfert  $H_2(p)$  du suivi de la trajectoire**

La modélisation par schéma bloc du suivi de la trajectoire est ci-dessous. La position du robot est repérée dans

le plan  $(O, \vec{x}, \vec{y})$  par ses coordonnées  $x(t)$  et  $y(t)$  ainsi que par l'angle du robot avec la ligne moyenne  $\varphi(t)$ .

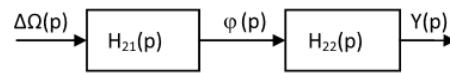


Schéma-bloc du suivi de trajectoire.

On donne le modèle de connaissance du suivi de trajectoire obtenu à l'aide de modèles cinématiques. On supposera que toutes les conditions initiales sont nulles et que  $e$  et  $R$  sont des coefficients constants.

	Modèle de connaissance
La vitesse de rotation du robot $\frac{d}{dt}\varphi(t)$ par rapport à la verticale ascendante dépend du rayon des roues $R$ , de la demi-largeur du robot noté $e$ et de la différence de vitesse de rotation angulaire entre roues droites et roues gauches	$R \cdot \Delta\omega(t) = 2 \cdot e \cdot \frac{d}{dt}\varphi(t)$
Pour des petits angles, la vitesse de déplacement latéral $\frac{d}{dt}y(t)$ dépend de la vitesse de translation du robot suivant l'axe $\vec{x}$ noté $V$ et de l'angle de rotation du robot par rapport à la verticale ascendante $\varphi(t)$	$\frac{d}{dt}y(t) = V \cdot \varphi(t)$

**Question 6** Appliquer la transformée de Laplace sur les 2 relations cinématiques proposées.

**Correction**

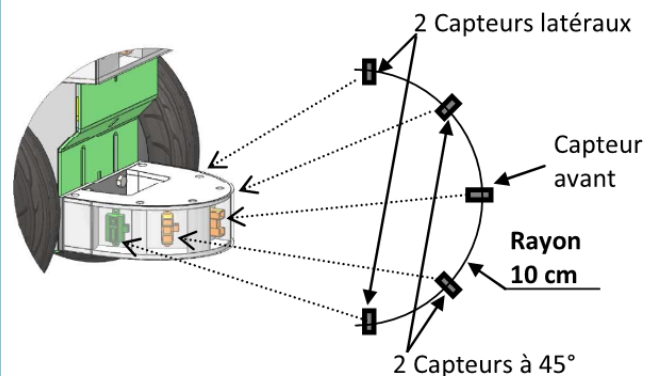
**Question 7** En déduire l'expression des fonctions de transfert  $H_{21}(p)$ ,  $H_{22}(p)$  puis  $H_2(p)$ .

**Correction**

**Détermination de la fonction de transfert  $H_3(p)$  correspondant au « capteur de distance »**

Les 5 capteurs utilisés pour le guidage dans le rang de culture sont installés sur un demi-cercle à l'avant du robot :

- capteur avant pour la détection des obstacles ;
- capteurs latéraux pour la mesure de distance avec les cultures ;
- capteurs à 45° pour la mesure de distance avec avant anticipation.



Localisation des capteurs (vue de dessus)

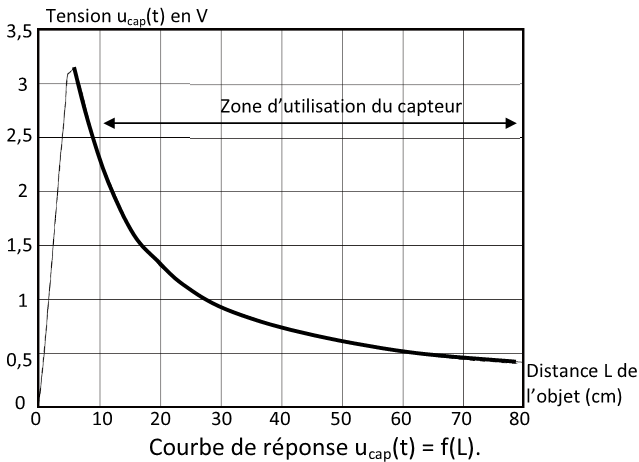
Ces 5 capteurs de distance qui détectent la présence d'objets entre 10 et 80 cm sont des capteurs infrarouges type « télémètre ». Ils ont une courbe de réponse  $u_{\text{cap}}(t)$  en fonction de la distance  $L$  de l'objet.

On suppose que seuls les 2 capteurs latéraux sont utilisés pendant le déplacement en ligne droite. Ils sont utilisés en différentiel tel que :  $u_{\text{mes}}(t) = u_{\text{cap gauche}}(t) - u_{\text{cap droit}}(t)$ .



**Notation :** transformée de Laplace de la tension  $u_{\text{mes}}(t) : U_{\text{mes}}(p)$ .

La fonction de transfert  $H_3(p) = \frac{U_{\text{mes}}(p)}{Y(p)}$  du bloc « capteur de distance » est supposée réduite à un gain pur noté  $K_c$ . On note  $u_{\text{capt}0}$  la tension fournie par les 2 capteurs latéraux lorsque le robot est centré entre les 2 rangs de culture distants de 70 cm.



**Question 8** Réaliser un schéma en vue de dessus permettant de visualiser le robot positionné dans l'allée avec ses 2 capteurs latéraux. Indiquer sur ce schéma les distances entre les capteurs et les rangées de culture.

**Correction**

**Question 9** Quelle est la valeur de la tension  $u$  à 0,1 V près? Quelle est la tension  $u_{\text{capt droit}}$  lorsque le robot est décalé de  $y = +5$  cm suivant l'axe  $\vec{y}$  entre ces 2 rangs de culture? Quelle est la tension  $u_{\text{capt gauche}}$  à ce même instant?

**Correction**

**Question 10** En déduire le gain  $K_c$  du bloc « capteur de distance » autour de ce point de fonctionnement et préciser son unité.

**Correction**

### Réglage du gain d'adaptation

Le bloc d'adaptation est un gain proportionnel noté  $K_a$  qui permet de convertir la consigne  $y_{\text{consigne}}(t)$  en une tension  $u_{\text{consigne}}(t)$  image de la consigne.

**Question 11** Comment choisir le gain d'adaptation  $K_a$  pour que la position  $y(t)$  en sortie de l'asservissement soit correctement asservie sur la position de consigne  $y_{\text{consigne}}(t)$  (on cherche dans ce cas à obtenir un écart  $\varepsilon(p)$  nul lorsque la consigne et la sortie sont égales).

**Correction**

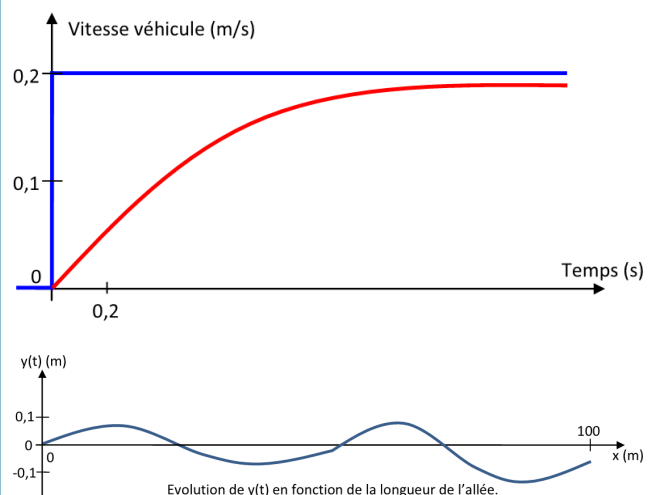
On considère dans un premier temps que le correcteur est un correcteur proportionnel. On note donc la la fonction de transfert de ce dernier  $C(p) = K_p$ .

**Question 12** Déterminer la fonction de transfert boucle ouverte  $FTBO(p) = \frac{U_{\text{mes}}(p)}{\varepsilon(p)}$ . Donner la classe et l'ordre de cette fonction de transfert.

**Correction**

### Analyse des performances obtenues.

On donne ci-dessous la courbe donnant l'évolution du paramètre  $y(t)$  sur une allée de 100 m pour un premier réglage de correcteur. On donne d'autre part la réponse du véhicule en vitesse de translation pour une consigne échelon de 0,2 m/s.



**Question 13** Déterminer si ce réglage semble adapté vis-à-vis des exigences du cahier des charges. Justifier la réponse en laissant notamment apparaître les tracés utiles sur les courbes.

**Correction**