

# D'après CCINP PSI 2021 - Étude du robot TROOPER

Certaines questions sont modifiées ou déplacées, d'autres supprimées, d'autres ajoutées  
Il y a énormément de questions indépendantes.

## Partie I - Problématique et objectif

En culture hors-sol (figure 1), il faut constamment déplacer les pots pour profiter de la lumière, pour regrouper les cultures, isoler celles qui posent problème, ... Ce travail est pénible physiquement et les pépiniéristes peinent à trouver de la main d'œuvre pour réaliser ces tâches quotidiennes difficiles.

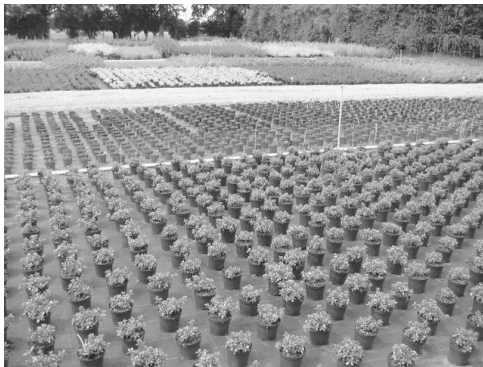


Figure 1 - Exemple de culture hors-sol



Figure 2 - Robot TROOPER de la société INSTAR ROBOTICS

La Startup INSTAR ROBOTICS, spécialisée dans le développement de robots d'assistance, a conçu le robot TROOPER qui permet de répondre à ce besoin (figure 2).

L'objectif du travail proposé dans cette épreuve est de justifier les solutions techniques retenues par la société INSTAR ROBOTICS dans le but de respecter le cahier des charges élaboré en partenariat avec des pépiniéristes.

## Partie II - Cahier des charges

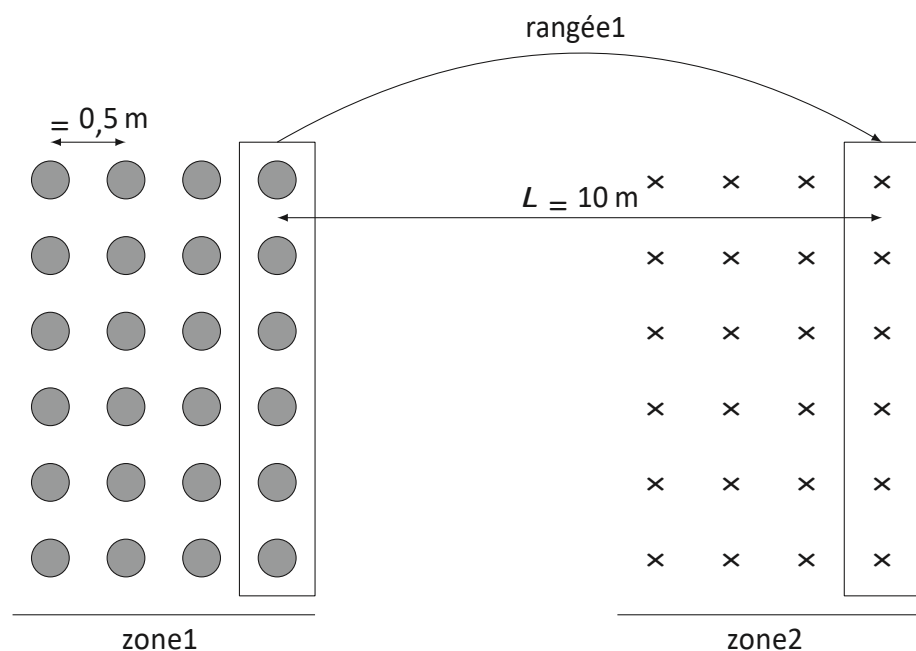
Les spécifications que doit respecter le robot sont directement liées aux contraintes imposées par la culture hors-sol.

Une des contraintes majeures est la vitesse à laquelle le robot doit se déplacer et réaliser les opérations de prise/dépose de pots afin d'être si possible aussi rapide qu'une personne.

Figure 3 - Tâche à effectuer par le robot

Un exemple de tâche à réaliser consiste à déplacer 4 rangées de 6 pots d'une zone à une autre. Le robot doit prendre les 6 pots de la rangée 1 de la zone 1, puis les déplacer dans la rangée 1 de la zone 2, de même pour les autres rangées.

Un employé qui utilise un chariot à pousser (pour déplacer 6 pots à chaque fois) met un temps total  $T_m$  pour réaliser cette tâche de repositionnement de 4 rangées de pots.



On note  $T_p$  le temps de prise d'une rangée de 6 pots, égal au temps de dépose (ce temps inclut toutes les manœuvres et est estimé à 30 s). On suppose que le robot se déplace à la vitesse constante  $V$  en ligne droite sur une distance  $L = 10\text{m}$  séparant les rangées de chaque zone (**figure 3**). La distance entre deux rangées d'une zone est notée  $\ell = 50\text{cm}$ .

**Q1.** Déterminer la vitesse  $V$ , supposée constante, à laquelle doit se déplacer le robot en ligne droite pour réaliser la tâche au maximum en  $T_m$  secondes en fonction de  $L$ ,  $\ell$ ,  $T_m$  et  $T_p$ . Faire l'application numérique pour une durée  $T_m$  de 320 secondes.

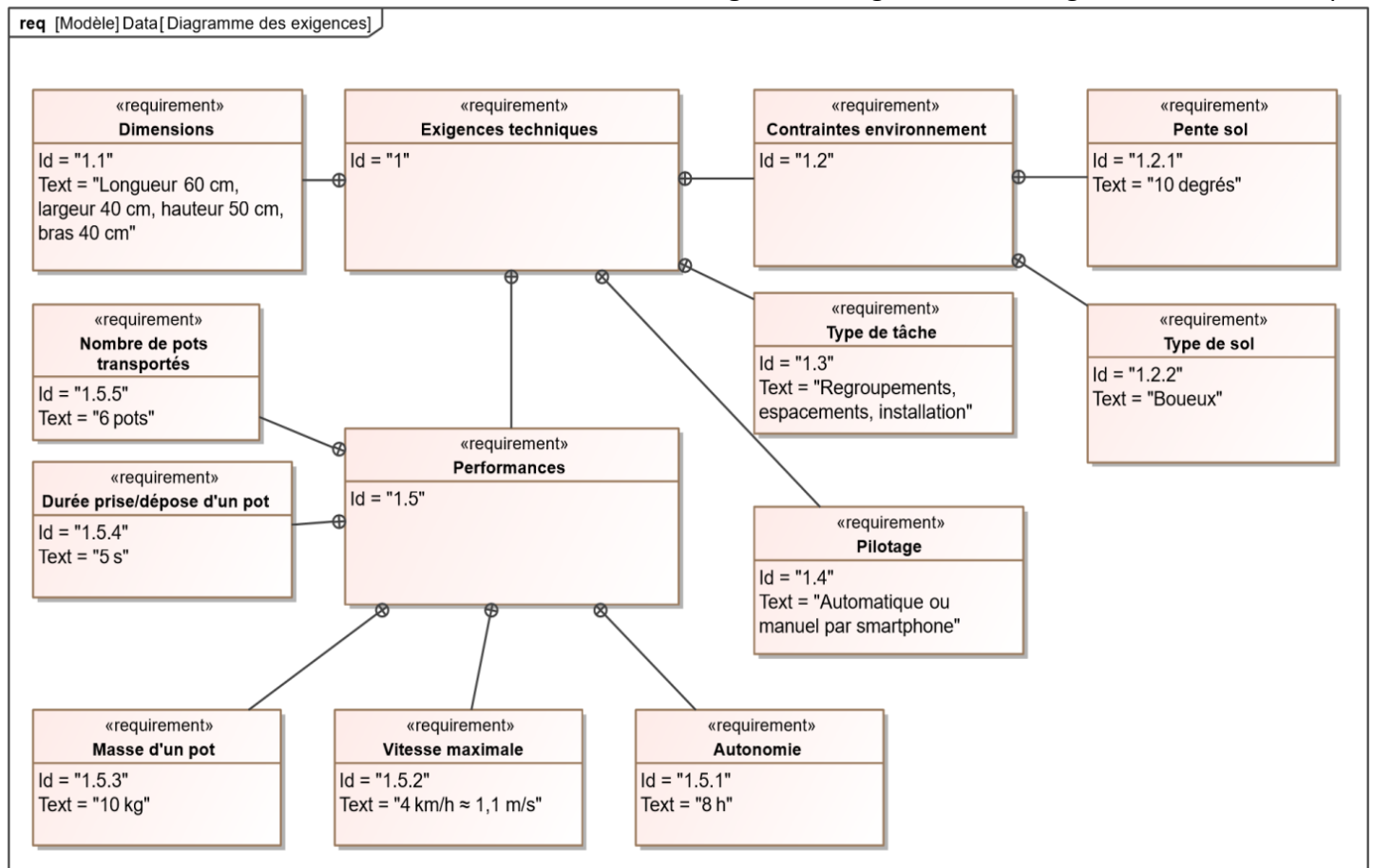
Les autres éléments du cahier des charges pourraient être justifiés de la même manière. Le diagramme des exigences de la **figure 4** liste les éléments principaux utiles pour le dimensionnement du robot.

Le robot est constitué de plusieurs chaînes d'énergie et d'information. Nous analyserons dans un premier temps les chaînes d'énergie et d'information relatives au déplacement du robot, puis, dans un second temps, celles relatives à la prise et dépose des pots.

Pour se déplacer, le robot utilise deux roues motorisées indépendantes à l'avant et deux roues folles à l'arrière. Le robot embarque une batterie pouvant délivrer jusqu'à 100 Volts. Une carte de commande dédiée à chaque moteur utilise l'information d'un codeur incrémental monté sur chaque axe moteur pour donner des ordres au hacheur pilotant ce même moteur. Un réducteur permet d'adapter la vitesse de rotation du moteur pour la transmettre à la roue. Pour permettre au robot de se diriger correctement, un dispositif LIDAR (Laser Imaging Detection And Ranging : émetteur/récepteur infrarouge) fournit des informations sur l'environnement à un micro-ordinateur qui se charge d'envoyer des consignes aux cartes de commande des moteurs. L'utilisateur peut communiquer avec le robot à l'aide d'une tablette en Bluetooth.

**Q2.** À l'aide des informations ci-dessus, compléter les chaînes de puissance et d'information pour le déplacement du robot sur le **Document Réponse**.

**Figure 4 - Diagramme des exigences du robot Trooper**



## Partie III - Déplacement du robot

Nous allons montrer tout d'abord la nécessité d'asservir en vitesse des deux moteurs (un moteur par roue avant) pour assurer un déplacement correct du robot.

### III.1 - Nécessité d'un asservissement en vitesse

Chaque roue motorisée du robot a un rayon  $r = 0.15$  m. La motorisation est assurée par un motoréducteur.

Le réducteur est de type épicycloïdal.

On donne les nombres de dents :  $Z_m = Z'_s = 20$ ,  $Z_s = 106$  et  $Z_1 = 146$

$$\overrightarrow{OL} \cdot \vec{x}_3 = R_m ; \overrightarrow{LC} \cdot \vec{x}_3 = R_s ; \overrightarrow{CK} \cdot \vec{x}_3 = R'_s ; \overrightarrow{OK} \cdot \vec{x}_3 = R_1$$

**Q3.** Déterminer le rapport du réducteur  $k_r = \omega_{r/1} / \omega_{m/1}$  en fonction des  $Z_i$ . Faites l'application numérique.

Les caractéristiques d'un moteur sont :

- $J_m = 3,4 \cdot 10^{-3}$  kg.m<sup>2</sup> inertie motoréducteur rapportée au moteur,
- $k_m = 0,2$  N.m.A<sup>-1</sup> constante de couple (= constante de vitesse),
- $R_m = 1 \Omega$  résistance interne du moteur,
- $N_{\max} = 3000$  tr/mn vitesse maximale (associée à  $\omega_{m/1}$ ).

**Q4.** Vérifier que les éléments choisis permettent de respecter le critère de vitesse maximale du diagramme des exigences.

On souhaite que le robot se déplace selon une loi trapèze de vitesse avec  $V_{\max}$  la vitesse maximale du robot (du diagramme des exigences) pour parcourir une distance

$D = 10$ m. On donne le temps total  $T = 10$ s et on cherche la durée d'accélération égale à la durée de décélération  $\delta t$ .

Pour la question suivante, on suppose, de manière simplifiée, que le robot suit parfaitement cette consigne.

**Q5.** Déterminer l'expression du temps  $\delta t$  pour respecter le déplacement souhaité en fonction de  $D$ ,  $T$  et  $V_{\max}$ . Faire l'application numérique.

On suppose que les deux moteurs sont identiques. Les équations qui caractérisent le comportement en ligne droite du robot sont les suivantes :

$$u_m(t) = R_m \cdot i_m(t) + k_m \cdot \omega_m(t) \quad (1)$$

$$2C_m(t) - C_r(t) = J \cdot \frac{d\omega_m(t)}{dt} \quad (2)$$

$$C_m(t) = k_m \cdot i_m(t) \quad (3)$$

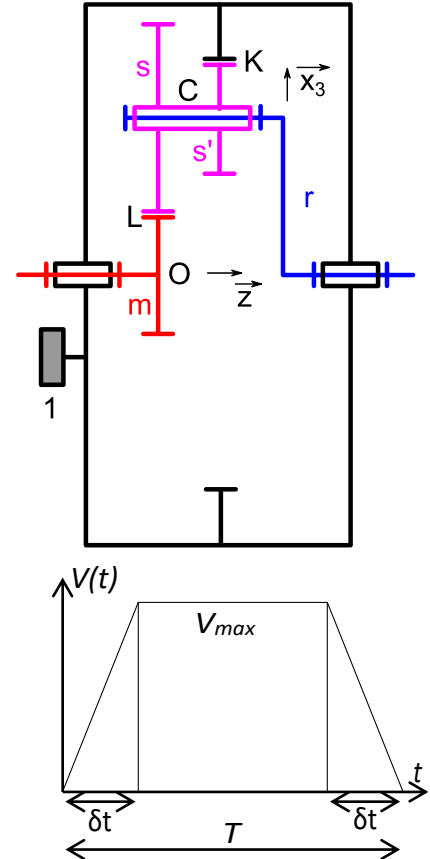
$$v(t) = k_t \cdot \omega_m(t) \quad (4)$$

$\omega_m(t)$  est la vitesse angulaire d'un moteur,  $u_m(t)$  sa tension de commande d'un moteur,  $i_m(t)$  le courant le traversant et  $C_m(t)$  le couple qu'il exerce.  $C_r(t)$  est un couple résistant global supposé nul dans un premier temps pour **Q6** et **Q7**.  $J$  est le moment d'inertie équivalent de l'ensemble en mouvement ramené sur un arbre moteur.  $v(t)$  est la vitesse du robot en ligne droite par rapport au sol.

**Q6.** Déterminer l'équation différentielle vérifiée par  $v(t)$  avec  $u_m(t)$  comme entrée.

Vérifier que  $v(t) = \alpha_0(t - \tau_m + \tau_m e^{-t/\tau_m})$  est solution de l'équation différentielle pour une consigne de tension  $u_m(t) = \frac{u_0}{\delta t} t \cdot u(t)$  où  $u(t)$  est un échelon unitaire.

On suppose que  $v(0) = 0$ . On donnera l'expression de  $\alpha_0$  et  $\tau_m$  en fonction de  $u_0$ ,  $\delta t$  et des constantes intervenant dans les équations du moteur.

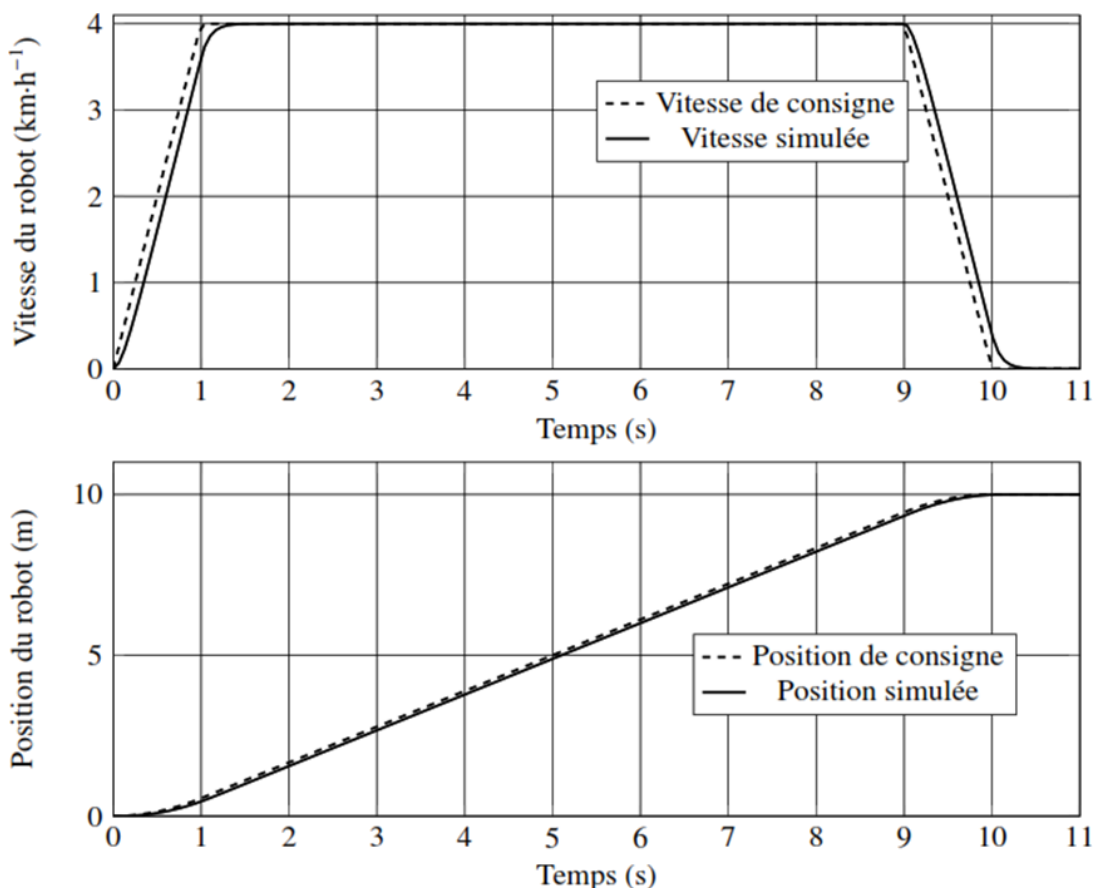


La **figure 5** montre la réponse du robot à une tension de commande en trapèze. La courbe de vitesse simulée est tracée ainsi que la courbe de vitesse de consigne fournie (avec agrandissement sur le coupon réponse).

**Q7.** En s'aidant de l'expression de la vitesse donnée précédemment, estimer la valeur de  $\tau_m$  à partir de la courbe de vitesse réelle. Faire apparaître le tracé sur la figure du **Document Réponse**.

Au vu des simulations effectuées, on constate qu'on peut confondre la vitesse de consigne avec la vitesse simulée et ainsi travailler directement avec le profil de vitesse de consigne pour des études cinématiques.

Le robot évolue sur un terrain souvent boueux et accidenté, ce qui engendre des perturbations sur les roues, le robot ne se déplace alors plus à la vitesse souhaitée. De plus, pour des courants trop faibles, les roues ne tournent pas à cause des frottements. La vitesse de déplacement du robot est donc asservie à une vitesse de consigne notée  $v_c(t)$ .



**Figure 5 - Simulation du déplacement du robot en réponse à une consigne en trapèze**

**Remarque :** Ces courbes sont obtenues avec le réglage du correcteur de la question 9/10.

Un adaptateur de gain  $K_a$  convertit la consigne  $v_c(t)$  (m/s) en une valeur numérique notée  $n_c(t)$ .

Cette valeur numérique est comparée à l'image  $n_m(t)$  de la vitesse de rotation des moteurs  $\omega_m(t)$  déterminée à l'aide d'un codeur incrémental de gain  $K_c$ .

Celui-ci délivre 628 informations (ou inc) par tour de moteur.

L'écart  $\varepsilon(t)$  ainsi formé est adapté par un ensemble correcteur amplificateur dont la fonction de transfert sera notée  $C(p)$  pour fournir la tension d'alimentation  $u_m(t)$  aux moteurs.

La vitesse de rotation des moteurs  $\omega_m(t)$  est adaptée par l'ensemble réducteur-roue de gain  $k_t$  pour obtenir la vitesse  $v(t)$  de déplacement du robot.

Des perturbations sur les moteurs sont prises en compte sous la forme d'un couple résistant noté  $C_r(t)$ .

**Q8.** À partir des équations (1), (2) et (3), déterminer la relation  $\Omega_m(p) = H_m(p) \cdot U_m(p) + H_r(p) \cdot C_r(p)$  où l'on précisera l'expression de  $H_m(p)$  et  $H_r(p)$  sous forme canonique.

**Q9.** Compléter le schéma-bloc de l'asservissement de vitesse linéaire du robot en utilisant les indications précédentes. Préciser la valeur numérique de  $K_c$  en  $inc/rad$ . Donner l'expression de  $K_o$  permettant d'assurer un asservissement correct.

On choisit de prendre un correcteur Proportionnel Intégral de la forme :  $C(p) = K_p \frac{1+\tau_i p}{\tau_i p}$

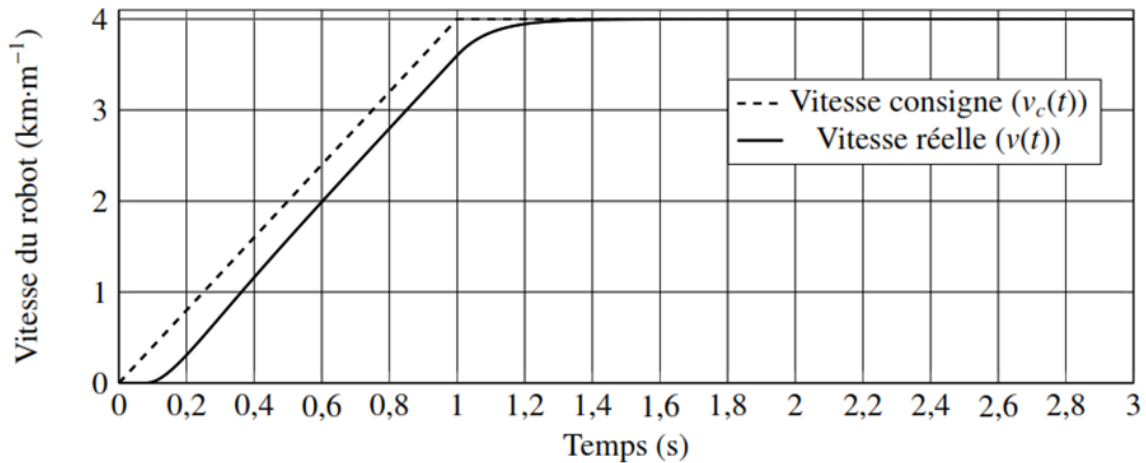
On prend pour valeur de  $\tau_i$  la valeur de la constante de temps du moteur :  $\tau_i = \tau_m$  (on parle d'un réglage par compensation)

Compte tenu de la valeur choisie pour  $K_o$ , le schéma-bloc de l'asservissement de vitesse peut être mis sous forme de schéma-bloc à retour unitaire dont la Fonction de Transfert en Boucle Ouverte figure ci-contre avec  $K_m K_c = 500 \text{ inc}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{V}^{-1}$  et  $\tau_m = 0,1 \text{ s}$ .

$$FTBO(p) = C(p) \frac{K_m K_c}{1 + \tau_m p}$$

**Q10.** Déterminer la valeur de  $K_p$  pour que le temps de réponse à 5 % en boucle fermée soit égal à 0,3s.

La **figure 6** représente la réponse du robot pour une consigne en trapèze en utilisant le correcteur bien réglé et en prenant en compte des perturbations de type frottement sec. Pour prendre en compte le couple  $C_r$  dans la simulation, un bloc non-linéaire a été introduit dans le schéma-bloc pour aboutir à cette réponse.



**Figure 6 - Simulation de la vitesse du robot asservi en réponse à une consigne en trapèze**

**Q11.** Entourer sur la courbe (sur la figure du **Document Réponse**) la zone qui montre que la perturbation a été prise en compte. Préciser quelle non-linéarité (à choisir parmi saturation, seuil, hystérésis) a été retenue. Conclure sur la pertinence de l'asservissement de vitesse mis en place vis-à-vis des performances attendues.

**Q12.** Déterminez les valeurs de l'erreur en régime permanent, en réponse à une rampe unitaire et à un échelon unitaire, en prenant en compte la perturbation. Commentez la courbe de la Figure 6.

### III.2 - Pilotage du robot

La société qui développe le robot propose une application sur tablette qui permet, soit de piloter manuellement le robot, soit de lui faire réaliser des tâches automatisées. Pour cela, le robot utilise le LIDAR qui détermine la position des pots environnants par rapport au robot.

Pour pouvoir se déplacer dans toutes les directions, il faut contrôler le comportement du robot et notamment définir correctement les consignes de vitesse de chaque roue motorisée.

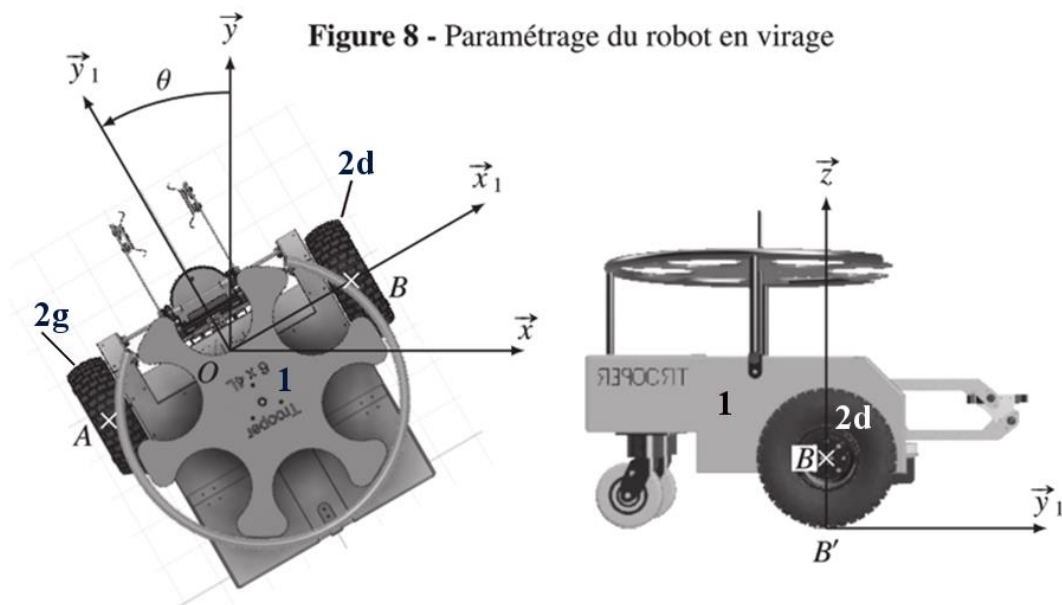


Figure 8 - Paramétrage du robot en virage

La distance séparant les centres des roues motrices au point  $O$  est notée  $e = AO = OB$ . Le rayon d'une roue est noté  $r$ .

Le mouvement du robot noté 1 par rapport au sol noté 0 est défini par le torseur

$$\{V_{1/0}\} = \begin{Bmatrix} \dot{\theta} \vec{z} \\ V \vec{y}_1 \end{Bmatrix}_O$$

On note  $A'$  le point de contact de la roue gauche avec le sol et  $B'$  le point de contact de la roue droite avec le sol. On note  $\omega_d$  (respectivement  $\omega_g$ ) les vitesses de rotation des roues droite (notée  $d$ ) et gauche (notée  $g$ ) par rapport au robot 1.

**Q13.** Déterminer la vitesse  $\vec{V}(B' \in g/0)$  en fonction de  $V$ ,  $\omega_d$ ,  $\dot{\theta}$ ,  $e$  et  $r$ . De même, sans détailler les calculs, donner l'expression de  $\vec{V}(A' \in g/0)$  en fonction de  $V$ ,  $\omega_g$ ,  $\dot{\theta}$ ,  $e$  et  $r$ .

**Q14.** En utilisant l'hypothèse de roulement sans glissement en  $A'$  et en  $B'$ , montrer que  $\dot{\theta} = C_1(\omega_g - \omega_d)$  et  $V = C_2(\omega_d + \omega_g)$  où  $C_1$  et  $C_2$  sont des constantes positives à exprimer en fonction des données.

Il existe deux modes de pilotage manuel (Figure 9).

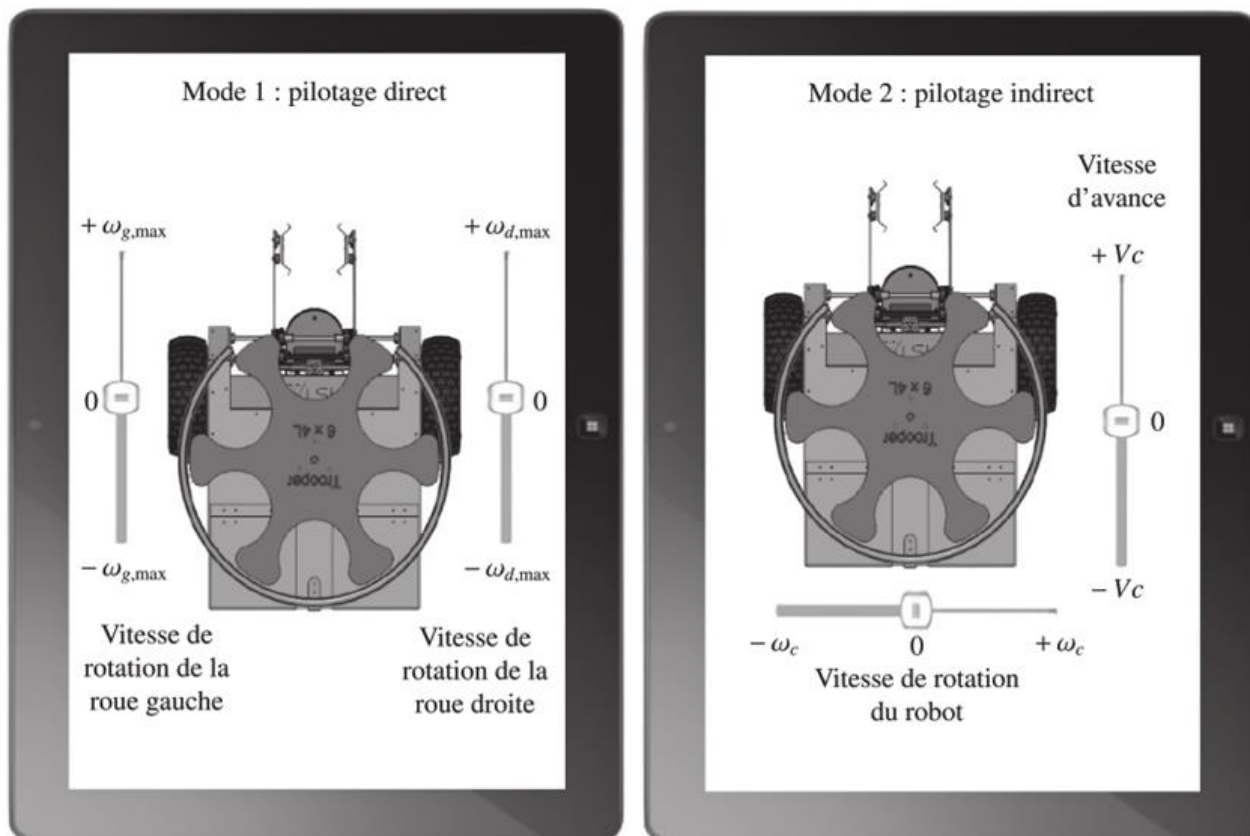


Figure 9 - Application de pilotage du robot



Dans le premier cas (pilotage direct), on contrôle la vitesse de chaque roue grâce à deux curseurs : le robot est difficile à déplacer.

Dans le second cas (pilotage indirect), un premier curseur permet de spécifier la vitesse du centre du robot entre  $-V_c$  et  $+V_c$  et un autre curseur permet de contrôler la vitesse de rotation du robot  $\dot{\theta}$  entre  $-\omega_c$  et  $+\omega_c$  (rotation autour de l'axe  $(O, \vec{z})$ ). En utilisant le curseur de vitesse d'avance uniquement on peut faire avancer ou reculer le robot. Si on utilise uniquement le deuxième curseur (vitesse de rotation du robot), on peut le faire tourner sur place vers la gauche ou vers la droite.

**Q15.** Indiquer dans le tableau les consignes qu'il faut imposer à chaque roue pour obtenir les quatre déplacements souhaités en fonction de  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $V_c$  et  $\omega_c$ .

### III.3 – Basculement lors de la saisie des pots

Lors de la prise d'un pot, il est possible que le robot bascule. Pour éviter ce problème, la batterie a été placée à l'arrière pour décaler le centre de gravité. L'objectif des questions suivantes est de déterminer la masse d'un pot provoquant le basculement du robot.

**Q16.** Décrire la situation la plus défavorable en fonction de la position des bras et du nombre de pots sur le robot.

On utilise le paramétrage de la **Figure 14**.

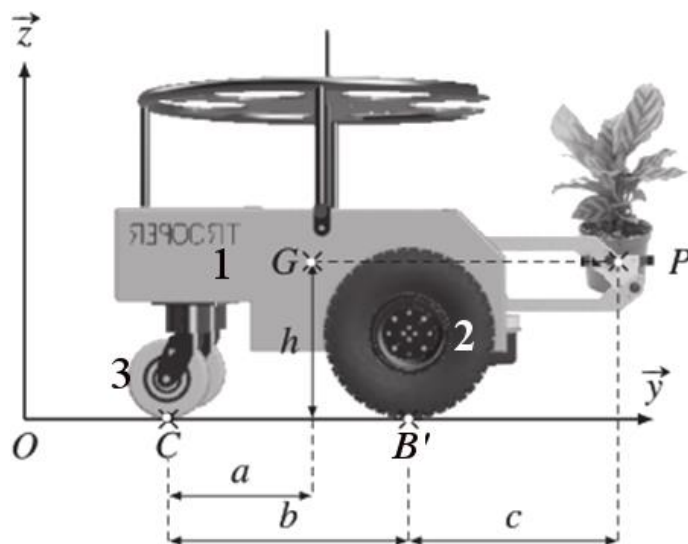
On note  $M = 60\text{kg}$  la masse du robot à vide et  $m = 10\text{kg}$  la masse d'un pot.

Le centre de gravité du robot à vide est noté  $G$  et le centre de gravité du pot est noté  $P$ .

Le problème est supposé symétrique et plan, ce qui permet de considérer un demi-robot, de masse  $M/2$ , en contact en deux points  $C$  et  $B'$  avec le sol et qui porte un demi-pot de masse  $m/2$ .

On suppose que les actions en  $C$  et  $B'$  sont des glisseurs.

$$\{T_{02}\} = \begin{Bmatrix} T_{02}\vec{y}_0 + N_{02}\vec{z}_0 \\ \vec{0} \end{Bmatrix}_{B'} ; \{T_{03}\} = \begin{Bmatrix} -T_{03}\vec{y}_0 + N_{03}\vec{z}_0 \\ \vec{0} \end{Bmatrix}_C$$



**Figure 14 - Paramétrage pour l'étude du basculement**

**Q17.** En précisant le système isolé et en choisissant une seule équation issue du principe fondamental de la statique, déterminer l'expression de l'effort normal sur la roue arrière  $N_{03}$  en fonction de  $g$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $M$  et  $m$ .

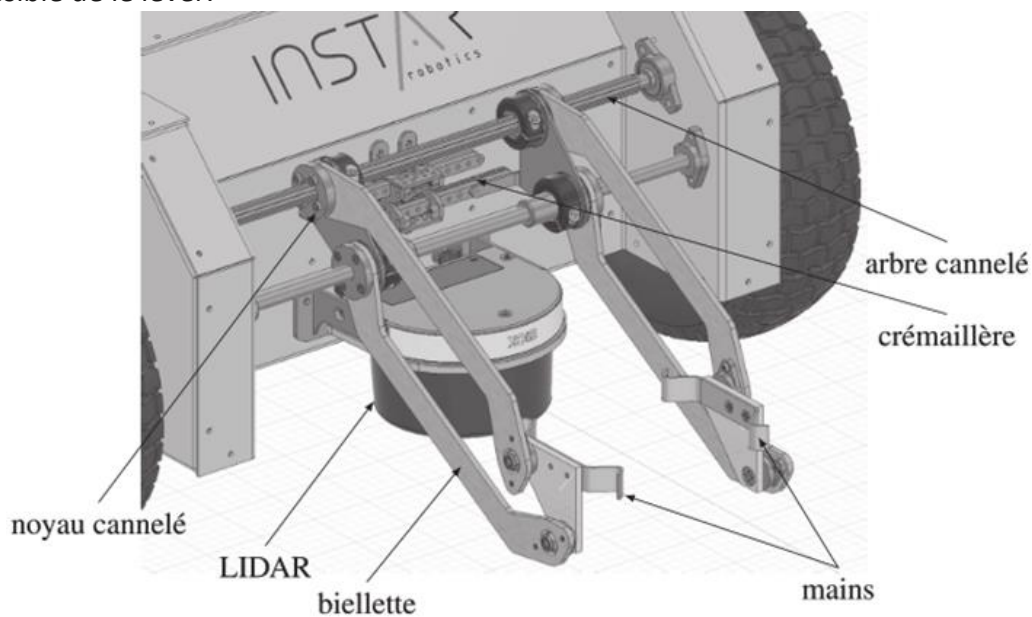
**Q18.** Énoncer la condition de basculement du robot et déterminer la masse maximale d'un pot qui entraîne le basculement du robot. Conclure vis-à-vis du diagramme des exigences.

## Partie IV - Prise des pots

La deuxième fonction principale du robot est de pouvoir prendre et déposer des pots d'une taille donnée. L'objectif de cette partie est d'analyser le mécanisme de prise et dépose des pots.

### IV.1 - Solution brevetée

La société INSTAR ROBOTICS a déposé un brevet concernant la solution permettant de prendre les pots (**Figure 10**). Cette solution utilise deux moteurs, l'un pour rapprocher les bras et l'autre pour les lever et placer un pot dans une zone pouvant contenir 6 pots (magasin). Des capteurs permettent de détecter lorsque les bras sont en position ouverte (bras complètement écartés) ou en position fermée (pinces en contact l'une avec l'autre). De même, des capteurs permettent de détecter la position haute et la position basse des bras. En position haute, il suffit d'ouvrir les bras pour que le pot soit bien placé dans la zone de stockage des pots. Pour détecter qu'il est possible de lever un pot, le courant  $i$  parcourant les moteurs est utilisé. S'il dépasse une valeur  $i_0$ , cela veut dire que le pot est serré suffisamment fort entre les deux mains et qu'il est possible de le lever.



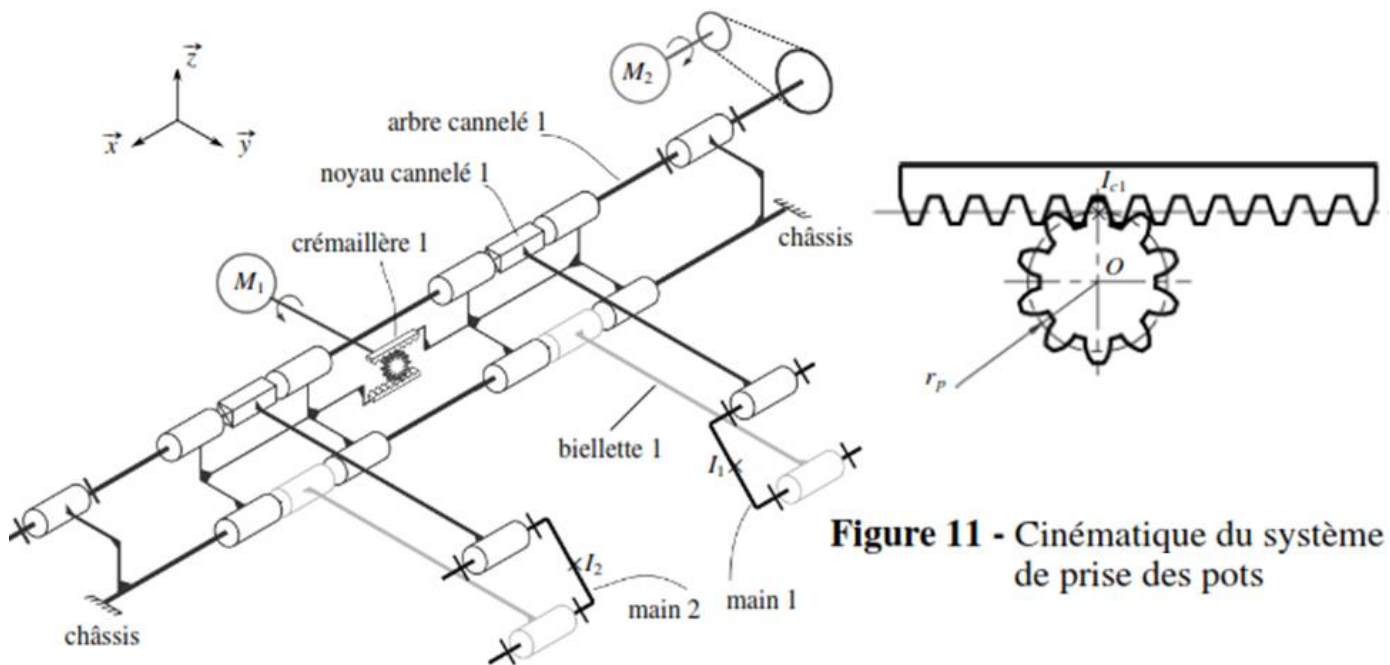
La zone de stockage des pots est mise en mouvement par un moteur asservi en position qui réalise  $1/6^e$  de tour lorsqu'un pot est correctement positionné.

**Q19.** Proposer une solution mécanique (uniquement le nom de la solution) permettant de réaliser  $1/6^e$  de tour sans avoir besoin d'asservir le moteur.

La solution retenue pour prendre les pots est donnée sur le schéma cinématique de la **Figure 11**.

**Q20.** Indiquer quel moteur entraîne le rapprochement des bras ( $M_1$  ou  $M_2$ ) et celui qui permet de soulever le pot. Justifier pourquoi les " mains " se déplacent toujours parallèlement au sol et ce que cela implique sur les pots.





**Figure 11 - Cinématique du système de prise des pots**

Les motoréducteurs retenus pour prendre et soulever les pots délivrent un couple maximal de 12N.m. Leur vitesse maximale est égale à  $200\text{tr}\cdot\text{min}^{-1}$ . Le pignon du dispositif pignon-crémaillère possède  $Z = 20$  dents. Le pas entre les dents sur la crémaillère est égal à  $p = 10\text{mm}$ . Le rayon du pignon vaut ainsi  $r_p = \frac{Zp}{2\pi}$ . On suppose que les pinces sont en contact ponctuel avec un pot de masse  $m = 10\text{kg}$  sans contact avec le sol. Le coefficient de frottement entre les pinces et le pot est pris égal à  $f_p = 0,3$ . L'accélération de la pesanteur est notée  $-g\vec{z}$  avec  $g = 10\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ .

On note :

- $\{T_{main1 \rightarrow pot}\} = \left\{ \begin{array}{c} N_1\vec{x} + T_1\vec{z} \\ \vec{0} \end{array} \right\}_{I_1}$  l'action mécanique de la main 1 sur le pot;
- $\{T_{main2 \rightarrow pot}\} = \left\{ \begin{array}{c} -N_2\vec{x} + T_2\vec{z} \\ \vec{0} \end{array} \right\}_{I_2}$  l'action mécanique de la main 2 sur le pot.

L'action mécanique d'une crémaillère sur le pignon est simplement modélisée par un glisseur de résultante portée par  $x$  appliquée en un point  $I_{ci}$  ( $i = 1$  ou  $i = 2$ ). On suppose l'ensemble à l'équilibre.

**Q21.** En isolant uniquement le pot, déterminer les composantes normales minimales  $N_1$  et  $N_2$  à appliquer de chaque côté du pot.

**Q22.** Préciser la démarche de résolution permettant de déterminer le couple exercé par le motoréducteur pour maintenir à l'équilibre le pot (isolements et théorèmes). En déduire que le couple minimal vaut  $C_0 = r_0 mg$  en donnant l'expression de  $r_0$  en fonction de  $r_p$  et  $f_p$ . Sachant que  $r_0 = 106\text{mm}$ , vérifier si le motoréducteur retenu est satisfaisant.

**FIN DU SUJET**