

# Robotisation du désherbage mécanique des vignes

Corrigé UPSTI



<https://vitibot.fr/img/bakus-vigne.jpg>

## 1 Génération des consignes d'orientation des roues avant et arrière pour le guidage du robot Bakus

### - Objectif

Élaborer les lois permettant de générer les consignes d'orientation à envoyer à chacune des quatre roues orientables du robot, afin qu'il puisse se déplacer le long d'un rang de vigne avec la même précision qu'un tracteur piloté par un chauffeur.

### 1.1 Changement de variables $(y_{G_2}, \theta) \rightarrow (y_F, y_R)$

#### - Objectif

Simplifier l'approche du problème d'asservissement du couple de variables  $(y_{G_2}, \theta)$  au point de fonctionnement  $(0, 0)$  à l'aide d'un changement de variables approprié.

**Question 1** À partir de la figure A uniquement :

- déterminer les expressions linéarisées à l'ordre 1 de  $y_F$  et  $y_R$ , notées respectivement (E1) et (E2) en fonction de  $y_{G_2}$ ,  $\theta$  et  $L$  puis en déduire l'expression de  $\theta$  en fonction de  $y_F$ ,  $y_R$  et  $L$  notée (E3) ;
- déduire de ces résultats que chercher à asservir le couple de variables  $(y_{G_2}, \theta)$  au point de fonctionnement  $(0, 0)$  est équivalent à asservir  $(y_F, y_R)$  au même point de fonctionnement.

#### Expression (E1)

En se plaçant dans le quadrilatère  $FF_0G_0G_2$ , on a  $\overrightarrow{FF_0} + \overrightarrow{F_0G_0} + \overrightarrow{G_0G_2} + \overrightarrow{G_2F} = \vec{0}$ .

Tout d'abord, on a  $\overrightarrow{G_0F_0} = L \cos \theta \vec{x}_0$ . On a alors :  $y_F \vec{y}_0 - L \cos \theta \vec{x}_0 - y_{G_2} \vec{y}_0 + L \vec{x}_2 = \vec{0}$ .

On demande d'exprimer  $y_F$  ; donc on projette cette expression suivant  $\vec{y}_0$ . On obtient donc  $y_F - y_{G_2} + L \vec{x}_2 \cdot \vec{y}_0 = 0$  soit  $y_F - y_{G_2} + L \sin \theta = 0$  et  $y_F - y_{G_2} + L \theta = 0$  (E1).

#### Expression (E2)

En se plaçant dans le quadrilatère  $G_2G_0R_0R$ , on a  $\overrightarrow{G_2G_0} + \overrightarrow{G_0R_0} + \overrightarrow{R_0R} + \overrightarrow{RG_2} = \vec{0}$ .

On a de même  $\overrightarrow{R_0G_0} = L \cos \theta \vec{x}_0$ . On a alors :  $y_{G_2} \vec{y}_0 - L \cos \theta \vec{x}_0 - y_R \vec{y}_0 + L \vec{x}_2 = \vec{0}$ .

On demande d'exprimer  $y_R$  ; donc on projette cette expression suivant  $\vec{y}_0$ . On obtient donc  $y_{G_2} - y_R + L \vec{x}_2 \cdot \vec{y}_0 = 0$  soit  $y_{G_2} - y_R + L \sin \theta = 0$  et  $y_{G_2} - y_R + L \theta = 0$  (E2).

### Expression (E3)

On a d'une part  $y_{G_2} = y_F + L \theta$  (E1) et d'autre part  $y_{G_2} = y_R - L \theta$  (E2). En conséquence,  $y_F + L \theta = y_R - L \theta$  soit  $\theta = \frac{y_R - y_F}{2L}$  (E3).

### Bilan - À REVOIR

Au point de fonctionnement  $(0, 0)$ , piloter un couple de variables  $(y_{G_2}, \theta)$  permet de piloter de façon unique un couple  $(y_F, y_R)$ . Réciproquement, piloter un couple de variables  $(y_F, y_R)$  permet de piloter de façon unique un couple  $(y_{G_2}, \theta)$  - CQFD.

## 1.2 Modélisation cinématique étendue du robot

### - Objectif

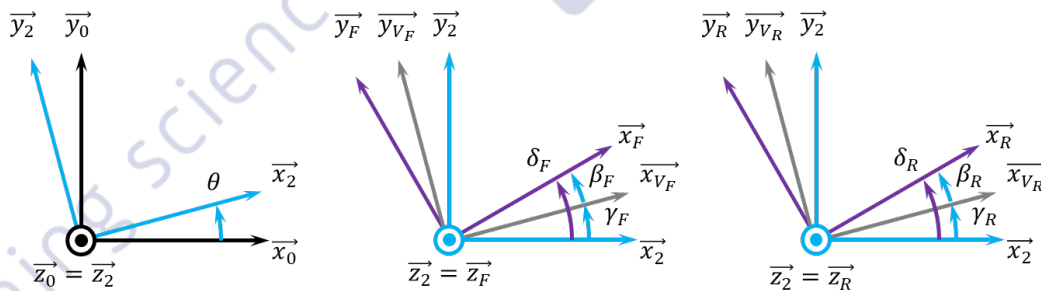
Établir un modèle exploitable décrivant les déplacements du robot Bakus sur le sol naturel, c'est-à-dire en tenant compte d'un éventuel glissement des roues sur le sol lorsqu'il est en dévers (phénomène de dérive latérale et angulaire).

#### 1.2.1 Notations et hypothèses

#### 1.2.2 Mise en équation du modèle cinématique étendu du robot Bakus

**Question 2** À partir de la figure A, déterminer les relations donnant les expressions de :

- $\dot{y}_F$  et  $\dot{y}_R$  en fonction de  $V_F$ ,  $V_R$ ,  $\theta$ ,  $\delta_F$ ,  $\delta_R$ ,  $\beta_F$  et  $\beta_R$  ;
- $\dot{x}_{G_2}$  en fonction de  $V_{G_2}$ ,  $\gamma_{G_2}$  et  $\theta$ .



### Expression de $\dot{y}_F$

On a  $\vec{V}_{2/0}(F) = \vec{V}_F = \dot{x}_F \vec{x}_0 + \dot{y}_F \vec{y}_0$  (problème plan). Par ailleurs, en projetant  $\vec{V}_F$  dans la base  $\mathcal{B}_0$ , on a  $\vec{V}_F = V_F \vec{x}_{V_F} = V_F (\cos(\gamma_F + \theta) \vec{x}_0 + \sin(\gamma_F + \theta) \vec{y}_0)$ . Enfin,  $\delta_F = \gamma_F + \beta_F \Leftrightarrow \gamma_F = \delta_F - \beta_F$ . En projetant  $\vec{V}_{2/0}(F)$  sur  $\vec{y}_0$  on a  $V_F \sin(\delta_F - \beta_F + \theta) = \dot{y}_F$ .

### Expression de $\dot{y}_R$

De manière analogue, on a  $V_R \sin(\delta_R - \beta_R + \theta) = \dot{y}_R$ .

### Expression de $\dot{x}_{G_2}$

On a  $\vec{V}_{2/0}(G_2) = \vec{V}_G = \dot{x}_{G_2}\vec{x}_0 + \dot{y}_{G_2}\vec{y}_0$ . Par ailleurs, en projetant  $\vec{V}_{G_2}$  dans la base  $\mathcal{B}_0$ , on a  $\vec{V}_{G_2} = V_{G_2}\vec{x}_{V_{G_2}} = V_{G_2}(\cos(\gamma_{G_2} + \theta)\vec{x}_0 + \sin(\gamma_{G_2} + \theta)\vec{y}_0)$ . En projetant  $\vec{V}_{2/0}(G_2)$  sur  $\vec{x}_0$  on a  $V_{G_2}\cos(\gamma_{G_2} + \theta) = \dot{x}_{G_2}$ .

**Question 3** Montrer rigoureusement que  $\vec{V}_{G_2} \cdot \vec{x}_2 = \vec{V}_F \cdot \vec{x}_2 = \vec{V}_R \cdot \vec{x}_2$ . En déduire une relation entre  $V_{G_2}$ ,  $\gamma_{G_2}$ ,  $V_F$ ,  $\gamma_F$ ,  $V_R$  et  $\gamma_R$ .

On a  $\vec{V}_{G_2} \cdot \vec{x}_2 = (\vec{V}_{I_{20}} + \vec{G_2 I_{20}} \wedge \vec{\Omega_{2/0}}) \cdot \vec{x}_2$ .  $\vec{V}_{I_{20}} = \vec{0}$ ; donc  $\vec{V}_{G_2} \cdot \vec{x}_2 = ((\rho\vec{y}_2 - (h+L)\vec{x}_2) \wedge \vec{\Omega_{2/0}}) \cdot \vec{x}_2$ .  $(\vec{x}_2 \wedge \vec{u}) \cdot \vec{x}_2 = 0$ ; donc  $\vec{V}_{G_2} \cdot \vec{x}_2 = (\rho\vec{y}_2 \wedge \dot{\theta}\vec{z}_2) \cdot \vec{x}_2 = \rho\dot{\theta}$ .

De même,  $\vec{V}_F \cdot \vec{x}_2 = (\vec{V}_{I_{20}} + \vec{F I_{20}} \wedge \vec{\Omega_{2/0}}) \cdot \vec{x}_2 = ((\rho\vec{y}_2 - (h+2L)\vec{x}_2) \wedge \vec{\Omega_{2/0}}) \cdot \vec{x}_2 = (\rho\vec{y}_2 \wedge \dot{\theta}\vec{z}_2) \cdot \vec{x}_2 = \rho\dot{\theta}$ .

Enfin,  $\vec{V}_R \cdot \vec{x}_2 = (\vec{V}_{I_{20}} + \vec{R I_{20}} \wedge \vec{\Omega_{2/0}}) \cdot \vec{x}_2 = ((\rho\vec{y}_2 - h\vec{x}_2) \wedge \vec{\Omega_{2/0}}) \cdot \vec{x}_2 = (\rho\vec{y}_2 \wedge \dot{\theta}\vec{z}_2) \cdot \vec{x}_2 = \rho\dot{\theta}$ .

On a donc  $\vec{V}_{G_2} \cdot \vec{x}_2 = \vec{V}_F \cdot \vec{x}_2 = \vec{V}_R \cdot \vec{x}_2 = \rho\dot{\theta}$ .

Par ailleurs :

- $\vec{V}_{G_2} \cdot \vec{x}_2 = V_{G_2}\vec{x}_{V_{G_2}} \cdot \vec{x}_2 = V_{G_2}\cos\gamma_{G_2}$ ;
- $\vec{V}_F \cdot \vec{x}_2 = V_F\vec{x}_{V_F} \cdot \vec{x}_2 = V_F\cos\gamma_F$ ;
- $\vec{V}_R \cdot \vec{x}_2 = V_R\vec{x}_{V_R} \cdot \vec{x}_2 = V_R\cos\gamma_R$ .

On a donc  $V_{G_2}\cos\gamma_{G_2} = V_F\cos\gamma_F = V_R\cos\gamma_R$ .

**Question 4** À partir du résultat obtenu à la question 3, donner les expressions de  $V_F$  et  $V_R$  en fonction de  $V_{G_2}$ ,  $\delta_F$ ,  $\beta_F$ ,  $\delta_R$  et  $\beta_R$ .

A FINIR!!

On a  $V_F = V_{G_2} \frac{\cos\gamma_{G_2}}{\cos\gamma_F} = V_{G_2} \frac{\cos\gamma_{G_2}}{\cos(\delta_F - \beta_F)}$ .

De même,  $V_R = V_{G_2} \frac{\cos\gamma_{G_2}}{\cos\gamma_R} = V_{G_2} \frac{\cos\gamma_{G_2}}{\cos(\delta_R - \beta_R)}$ .

### 1.3 Mesure en estimation des variables du modèle cinématique étendu

#### - Objectif -

Donner les moyens au robot de mesurer ou, à défaut, d'estimer les valeurs des variables  $\delta_F$ ,  $\delta_R$ ,  $y_{G_2}$ ,  $\theta$ ,  $\dot{y}_F$  et  $\dot{y}_R$  et  $V_{G_2}$  du modèle cinématique étendu.

#### 1.3.1 Variables mesurées directement par des capteurs dédiés

**Question 5** Compte-tenu du contexte d'utilisation du robot, justifier l'intérêt d'avoir choisi des codeurs absolus plutôt que relatifs (incrémentaux) pour obtenir les valeurs mesurées de  $\delta_F$  et  $\delta_R$ .

A FAIRE

#### 1.3.2 Variables estimées par analyse d'images des huit caméras TOF du robot

**Question 6** À partir des équations (I.2) et (I.3), donner l'expression des variables estimées  $\hat{\beta}_F$  et  $\hat{\beta}_R$  en fonction des variables mesurées  $\dot{y}_F$ ,  $\dot{y}_R$ ,  $V_{G_2}$ ,  $\theta$ ,  $\delta_F$  et  $\delta_R$ .

On a  $\dot{y}_F = V_{G_2}(\theta + \delta_F - \beta_F)$  et  $\dot{y}_R = V_{G_2}(\theta + \delta_R - \beta_R)$ . Par conséquent,  $\hat{\beta}_F = \theta + \delta_F - \frac{\dot{y}_F}{V_{G_2}}$  et  $\hat{\beta}_R = \theta + \delta_R - \frac{\dot{y}_R}{V_{G_2}}$ .

#### 1.4 Génération des consignes d'orientation des roues $(\delta_F^*, \delta_R^*)$ pour l'asservissement latéral et angulaire du robot enjambeur le long d'un rang de vigne

##### - Objectif

Établir les lois de génération de consigne de l'asservissement latéral du robot Bakus pour qu'il puisse suivre avec précision la trajectoire  $\mathcal{T}$ , malgré un glissement éventuel des roues sur le sol naturel

##### 1.4.1 Passage du domaine temporel au domaine spatial : $t \rightarrow x_{G_2}$

##### - Objectif

Rendre le modèle cinématique étendu indépendant de la vitesse linéaire  $V_{G_2}$  du robot le long d'un rang de vigne, afin de découpler la gestion des écarts latéraux  $y_F$  et  $y_R$  et celui de la vitesse d'avance  $V_{G_2}$ .

**Question 7** À partir des équations (E3), (I.1), (I.2) et (I.3) établies à partir du modèle cinématique étendu de la figure A, montrer que :

$$y'_F = \theta + \delta_F - \beta_F$$

$$y'_R = \theta + \delta_R - \beta_R$$

$$\theta' = \frac{y'_F - y'_R}{2L}.$$

##### A FAIRE

D'après (E3),  $\theta = \frac{y_R - y_F}{2L}$ , d'après (I.1), (I.2) et (I.3),  $\dot{x}_{G_2} = V_{G_2}$ ,  $\dot{y}_F = V_{G_2}(\theta + \delta_F - \beta_F)$  et  $\dot{y}_R = V_{G_2}(\theta + \delta_R - \beta_R)$ .

##### 1.4.2 Asservissement de la variable de déplacement latéral $y_F$ à une consigne $y_F^* = 0$

##### - Objectif

Justifier le choix du modèle du comportement en déplacement latéral  $y_F$  du robot assurant sa convergence à une valeur de consigne  $y_F^*$  et son réglage

**Question 8** Par analogie avec un modèle temporel usuel d'ordre 2 à identifier, de paramètres caractéristiques  $\omega_{0F}$ ,  $\xi_F$  et  $K_F$  :

- en justifiant la réponse, tracer l'allure de l'évolution de  $y_F(x_{G_2})$  imposée par le modèle 1 (I.7) pour une consigne  $y_F^* = 0$  en fonction de  $x_{G_2}$ , lorsque  $y_F(x_{G_2} = 0) = y_{F0} > 0$  ( $y_{F0}$  étant une valeur constante),  $y'_F(x_{G_2} = 0) = 0$ ,  $K_{pF} = \frac{K_{dF}^2}{4}$  et  $K_{dF} \simeq 5$ ;
- préciser sur le graphe les éléments caractéristiques de la courbe tracée pour  $x_{G_2} = 0$ ;
- justifier pourquoi le paramètre  $K_{pF}$  a été réglé de telle sorte que  $K_{pF} = \frac{K_{dF}^2}{4}$ , compte-tenu du contexte de fonctionnement du robot enjambeur.

### Identification des caractéristiques $\omega_{0F}$ , $\xi_F$ et $K_F$

En utilisant l'analogie avec un modèle temporel, on a  $s'' + 2\xi_F\omega_{0F}s' + \omega_{0F}^2s = K_F e\omega_0^2$  à identifier avec la relation  $y_F'' + K_{dF}y_F' + K_{pF}y_F = K_{pF}y_F^*$ . On a alors  $\omega_{0F}^2 = K_{pF}$ ,  $K_{pF} = K_F\omega_{0F}^2$  soit  $K_F = 1$ . De plus,  $2\xi_F\omega_{0F} = K_{dF}$  soit  $\xi_F = \frac{K_{dF}}{2\omega_{0F}} = \frac{K_{dF}}{2\sqrt{K_{pF}}}$ .

On a donc  $\omega_{0F} = \sqrt{K_{pF}}$ ,  $\xi_F = \frac{K_{dF}}{2\sqrt{K_{pF}}}$  et  $K_F = 1$ .

### Tracer de l'allure de l'évolution de $y_F(x_{G_2})$

Justifier que  $K_{pF} = \frac{K_{dF}^2}{4}$

**Question 9** Expliquer ce que représente  $x_{F_{r5\%}}$  dans le cas de ce modèle spatial (I.8), analogue du temps de réponse à 5 % dans le cas d'un modèle temporel. Préciser son unité. Compte-tenu de la valeur prise précédemment pour le réglage de  $K_{pF}$ , donner alors une expression littérale approchée de  $x_{F_{r5\%}}$  en fonction de  $K_{dF}$ . Effectuer l'application numérique et conclure sur la pertinence de la valeur numérique de  $K_{dF}$ , vu le contexte d'utilisation du robot enjambeur.

TODO

### 1.4.3 Génération des consignes d'orientation $\delta_F^*$ et $\delta_R^*$ des roues médianes

#### - Objectif -

Établir deux relations permettant de déterminer la consigne d'orientation de la roue médiane avant  $\delta_F^*$  et celle de la roue médiane arrière  $\delta_R^*$  (figure A).

**Question 10** À partir des relations issues du modèle cinématique étendu du robot (figure A), de la relation issue du modèle 1 choisi pour le comportement de  $y_F(x_{G_2})$ , et en sachant que les relations (E1) et (E2) trouvées à la question 1 permettent de considérer que les valeurs des variables  $y_F$  et  $y_F$  sont connues si  $y_{G_2}$  et  $\theta$  le sont aussi (trajectoire  $\mathcal{T}$  connue) :

- déterminer l'expression de  $y_F''$ , en fonction de  $\delta_F$ ,  $\beta_F$ ,  $\delta_R$ ,  $\beta_R$  et  $L$ . Pour ce faire, commencer par exprimer  $y_F''$  à partir de la relation (I.4), en tenant compte de l'hypothèse relative aux valeurs de  $\delta_F' - \beta_F'$ ;
- en tenant compte du point de fonctionnement souhaité, déterminer ensuite l'expression de  $\delta_F$  de la roue médiane avant 5, en utilisant la relation (I.7), puis les relations (I.4) et (E3) ;
- en identifiant précisément les variables qui sont mesurées et estimées, et en supposant que les dispositifs d'orientation des roues fonctionnent parfaitement et assurent ainsi que  $\delta_F^* = \delta_F$ , montrer alors que l'expression de  $\delta_F^*$  est de la forme  $\delta_F^* = C_1\beta_F + C_2(\delta_R - \beta_R)C_3y_F + C_4y_R$  ;
- donner les expressions littérales de  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  et  $C_4$  en fonction de  $K_{dF}$ ,  $K_{pF}$  et  $L$ .

TODO

## 2 Optimisation énergétique du mouvement de retrait d'une lame déca-vaillonneuse, choix d'un actionneur et conception de sa commande

#### - Objectif -

Adapter un outil intercep non motorisé utilisé avec les tracteurs traditionnels afin de concevoir un outil avec motorisation électrique pour le robot Bakus.



## 2.1 Modélisation du mouvement des lames, tracé numérique des relations entre paramètres géométriques d'entrée et de sortie puis estimation de la puissance épargnée

### - Objectif -

Choisir un mécanisme de transformation du mouvement qui permette de diminuer d'au moins 15 % la puissance de cette action mécanique lorsque l'outil est en position moyenne de retrait par rapport à la position déployée :  $\Delta\%P_{(\text{sol} \rightarrow 4/0)} > 15\%$  (II.1).

**Question 11** Écrire sous forme vectorielle la relation de fermeture de la chaîne géométrique liée au modèle de la figure E et donner les équations scalaires associées en projection sur les vecteurs de la base  $\mathcal{B}_2$ .

TODO

**Question 12** En exprimant les fonctions  $f_1$ ,  $f_2$  et  $f_3$  en fonction des paramètres  $l_1$ ,  $l_3$ ,  $l_4$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $\cos \theta_{10}$  et  $\sin \theta_{10}$ , montrer qu'il est possible d'obtenir à partir des équations de la question précédente une seule équation de la forme  $f_1(\theta_{10}) - f_2(\theta_{10}) \sin(\theta_{40}) - f_3(\theta_{10}) \cos(\theta_{40}) = 0$ .

TODO

**Question 13** En faisant l'hypothèse que quelle que soit la position de la lame  $\overrightarrow{V}_{4/0}(B) \simeq V_{\text{amax}} \overrightarrow{x}_0$ , exprimer sous forme littérale la puissance de l'action mécanique du sol sur l'outil dans son mouvement par rapport au sol 0 notée  $P_{(\text{sol} \rightarrow 4/0)}$  en fonction de  $F_{\text{sol}}$ ,  $V_{\text{amax}}$ ,  $\alpha_4$  et  $\theta_{40}$ . Calculer alors la variation relative de cette puissance en pour cent notée  $\Delta\%P_{(\text{sol} \rightarrow 4/0)}$  entre la position moyenne de retrait ( $\theta_{10} \simeq 0,3 \text{ rad}$ ) et la position déployée de l'intercep et conclure vis-à-vis de l'objectif de cette partie ( $\Delta\%P_{(\text{sol} \rightarrow 4/0)} > 15\%$ ).

TODO

## 2.2 Modélisation cinétique du mécanisme intercep, quantification de la dépense énergétique liée au retrait compte tenu des exigences du désherbage mécanique

### - Objectif -

Ajouter, dimensionner et commander un actionneur électrique permettant d'assurer le mouvement de retrait puis le déploiement de la lame.

### 2.2.1 Expression de l'énergie cinétique du mécanisme intercep

#### - Objectif -

Exprimer l'énergie cinétique du mécanisme intercep dans un référentiel galiléen en fonction du seul paramètre cinématique  $\dot{\theta}_{40}$ .

**Question 14** Exprimer la projection du moment cinétique en  $G_4$  du solide 4 dans son mouvement par rapport à 2 sur  $\overrightarrow{z}_0 = \overrightarrow{z}_2$ , notée  $\overrightarrow{\sigma}_{4/2}(G_4) \cdot z_2$ , puis exprimer l'énergie cinétique du solide 4 dans son mouvement par rapport à 2,  $\mathcal{E}_{c(4/2)}$  en fonction de  $I_{zz}$ ,  $\dot{\theta}_{40}$ ,  $M_4$  et  $V_G = \left\| \overrightarrow{V}_{4/2}(G_4) \right\|$ .

TODO

**Question 15** Exprimer le vecteur vitesse du point  $G_4$  fixe dans 4 dans son mouvement par rapport à 2, noté  $\overrightarrow{V}_{4/2}(G_4)$ , sous sa forme la plus simple.

TODO

**Question 16** En complément du programme de la figure 6, écrire une fonction Python `ktheta` qui prend en paramètre les tableaux `theta40` et `theta10` et renvoie un tableau image de la fonction  $k_\theta(\theta_{40})$  telle que  $\dot{\theta}_{10} = k_\theta(\theta_{40}) \dot{\theta}_{40}$ .

TODO

**Question 17** Exprimer l'énergie cinétique du solide 4 dans son mouvement par rapport à 2, notée  $\mathcal{E}_{c(4/2)}$ , en fonction de  $I_{zz}$ ,  $\dot{\theta}_{40}$ ,  $M_4$  et  $(d(\theta_{40}))^2$ .

TODO

### 2.2.2 Implantation et choix de l'actionneur

#### - Objectif -

À partir de l'équation de mouvement du mécanisme intercep, identifier les cas extrêmes et choisir un actionneur.

**Question 18** Exprimer sous forme littérale :

- la puissance des inter-efforts entre les solides 5 et 6 notée  $\mathcal{P}_{(5 \leftrightarrow 6)}$  en fonction de  $F_{\text{mot}}$  et  $\dot{\lambda}$  ;
- la puissance de l'action mécanique du sol sur 4 dans son mouvement par rapport à 2 notée  $\mathcal{P}_{(\text{sol} \rightarrow 4/2)}$  en fonction de  $F_{\text{sol}}$ ,  $\dot{\theta}_{10}$ ,  $\theta_{40}$ ,  $l_1$ ,  $l_4$ ,  $\theta_{41}$  et  $\alpha_4$ .

TODO

**Question 19** Exprimer la masse équivalente  $M_{eq}$  en fonction de  $I_{zz}$ ,  $M_4$ ,  $d(\theta_{40})$  et  $k(\theta_{40})$  telle que l'énergie cinétique de l'ensemble  $\{1+4+5+6\}$  dans son mouvement par rapport à 2 soit égale à  $\frac{1}{2} M_{eq} \dot{\lambda}^2$ .

TODO

**Question 20** En indiquant le système isolé et le théorème utilisé, exprimer littéralement  $F_{\text{mot}}$  en fonction de  $\ddot{\lambda}$ ,  $M_{eq}$ ,  $F_{\text{sol}}$  et  $k_p(\theta_{40})$ . Effectuer l'application numérique dans le pire des cas pour l'actionneur ( $F_{\text{sol}} = F_{d\text{MAX}} = 5 \text{ kN}$ ), indiquer la position choisie pour la valeur de  $\theta_{40}$  (figure 9) et l'état (1 ou 2 de la figure C) le plus critique.

TODO

**Question 21** Conclure sur le choix de l'actionneur en proposant une des références du tableau 2.

TODO

### 2.3 Commande de l'actionneur

#### - Objectif -

Valider le pilotage séquentiel de l'actionneur et choisir un correcteur pour la boucle de vitesse vis-à-vis des exigences du désherbage mécanique.

**Question 22** À partir du diagramme d'état de la figure C, compléter les chronogrammes de la figure D du document réponse. Justifier la pertinence de la prise en compte des deux événements « `after(0,25s)` » et

« after(0,1 s) » vis-à-vis de l'exigence 1.2 sur la protection des ceps en indiquant les problèmes qu'ils pallient. Justifier également que le choix d'une chaîne de transmission réversible permet d'assurer le déverrouillage de l'outil.

TODO

**Question 23** Proposer, en justifiant la réponse, la forme du correcteur à choisir parmi  $K_P$ ,  $\frac{1}{T_{ip}}$ ,  $K_i \frac{1 + T_{ip}}{T_{ip}}$  et  $K_d \frac{1 + T_{dp}}{1 + \alpha T_{dp}}$  afin qu'un simple réglage manuel de la position de la barre palpeuse permette de satisfaire l'exigence 1.2.2 (il n'est pas demandé de régler les paramètres du correcteur choisi). TODO

### 3 Synthèse

**Question 24** À partir des courbes de la figure 11, issues de la simulation numérique effectuée :

- expliquer ce qui se passe physiquement au niveau du contact roues-sol au cours du temps ;
- analyser l'allure et l'amplitude des évolutions de  $\delta_F$  et  $\delta_R$ . Justifier si ce résultat est conforme à celui qui est attendu de la part du robot.

TODO

**Question 25** À partir des courbes issues de la simulation numérique effectuée (figures 11 et 12) :

- vérifier si les hypothèses émises (relatives à la valeur des différents angles, ainsi qu'à leur variation le long de la trajectoire à suivre), afin de déterminer des lois simples pour obtenir les valeurs d'angle de consigne d'orientation des roues avant et arrière  $\delta_F^*$   $\delta_R^*$ , sont validées. Justifier quantitativement la réponse ;
- conclure quant à la validité des lois de génération de consigne d'orientation des roues proposées et des valeurs des paramètres  $K_{dF}$ ,  $K_{pF}$  et  $K_{dR}$  retenues, vis-à-vis du cahier des charges en terme de précision de guidage du robot enjambeur ;
- conclure quant à l'aptitude du robot Bakus à pouvoir désherber mécaniquement sous un rang de vigne à l'aide d'un outil intercep, en tenant compte de l'exigence de guidage.

TODO