

## ROBOT DINO



Figure 1 : robot de désherbage à guidage autonome

### I - Introduction :

Le sujet se propose d'étudier le bienfondé pour un maraîcher d'investir dans l'achat d'un robot de désherbage développé par la société **Naïo** sous le nom de « **ROBOT DINO** ». Pour répondre à cette question le sujet développe une analyse tant économique que technique et environnemental.

Cette analyse se décompose en 5 étapes de la manière suivante :

**Etape 1** : L'analyse du besoin.

**Etape 2** : La gestion du positionnement des socs de binage.

**Etape 3** : Le dispositif de maintien du contact entre la roue du soc et le sol.

**Etape 4** : La gestion de l'alignement latéral des socs de binage.

**Etape 5** : L'élaboration d'une synthèse du travail effectué.

### Etape 1 : L'analyse du besoin.

---

**Objectif de cette partie : Justifier** la pertinence de l'utilisation du robot DINO par un maraîcher.

---

Le maraîcher a deux impératifs : **La qualité et le coût**.

Un maraîcher a accepté de comparer ses pratiques de désherbage avec un désherbage effectué uniquement par le robot. Pour cela, il a partagé ses parcelles en deux parties. L'une est désherbée par l'agriculteur et son matériel classique, l'autre uniquement par le robot.

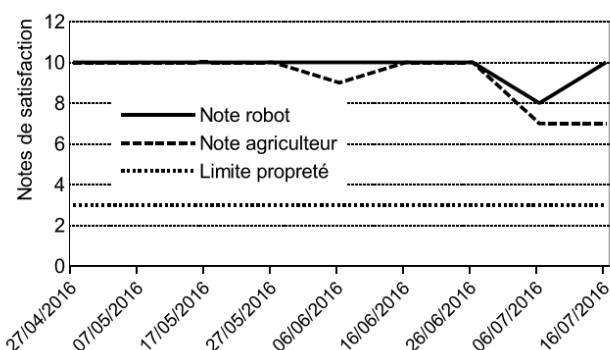


Figure 5 : notes de satisfaction attribuées au cours du temps sur les zones désherbées par le robot et par l'agriculteur

Une note de satisfaction de l'enherbement, allant de **0 à 10**, est attribuée aux parcelles. Une **note de 10** correspond à une parcelle **très propre**, sans mauvaise herbe. Une **note de 0** correspond à une parcelle **très sale**, non entretenue. Une parcelle notée à **plus de 7** est considérée comme **propre** et notée à **moins de 3** est considérée comme **sale**.

**Q1 - Expliquer**, à l'aide de la figure 5, pourquoi le robot DINO est particulièrement adapté au désherbage des légumes en planche.

On constate sur la figure 5 que, dans toutes les situations, le robot DINO a, d'une part, des performances supérieures à l'agriculteur et d'autre part des performances supérieures à la note de 7, donc le robot est particulièrement adapté au désherbage.

### Coût

La durée et les coûts du désherbage sont résumés dans le tableau ci-dessous, pour les deux modes de désherbage (par le robot DINO et par l'agriculteur).

Par le robot (1 900 m <sup>2</sup> ) (programmation et passage)		Par l'agriculteur (1 600 m <sup>2</sup> ) (travail manuel et mécanique)	
Temps	Coût en €	Temps	Coût en €
13h50	161,5	26h25	328

Tableau 1 : durées et coûts de désherbage

**Q2 -** Pour les deux modes de désherbage, **calculer** le temps et le coût total pour une surface de **1000 m<sup>2</sup>**.

### Hypothèse :

On suppose que l'analyse, sur les notions de surface et de coût, admet le principe de proportionnalité ; dans ce cas nous pouvons écrire les relations suivantes :

#### Pour le robot DINO :

Pour une surface de **1900 m<sup>2</sup>** le temps est de **13 h 50 min** et le coût de **161,50 €** donc pour une surface de **1000 m<sup>2</sup>** :

$$13 \text{ h } 50 \text{ min} = 830 \text{ min} \text{ donc le temps pour } 1000 \text{ m}^2 = \frac{1000}{1900} * 830 = 486.84 \text{ min soit } 7 \text{ h } 16 \text{ min et } 50 \text{ s}$$

$$161,50 \text{ €} \text{ donc le coût pour } 1000 \text{ m}^2 = \frac{1000}{1900} * 161,50 \text{ €} = 85 \text{ €}$$

Pour une surface de **1600 m<sup>2</sup>** le temps est de **26 h 25 min** et le coût de **328,00 €** donc pour une surface de **1000 m<sup>2</sup>** :

$$26 \text{ h } 25 \text{ min} = 1585 \text{ min} \text{ donc le temps pour } 1000 \text{ m}^2 = \frac{1000}{1600} * 1585 = 990.63 \text{ min soit } 16 \text{ h } 30 \text{ min et } 38 \text{ s}$$

$$328,00 \text{ €} \text{ donc le coût pour } 1000 \text{ m}^2 = \frac{1000}{1600} * 328,00 \text{ €} = 205 \text{ €}$$

En France, la surface moyenne d'une exploitation maraîchère est de **65000 m<sup>2</sup>** (6,5 hectares).

**Q3 - Calculer** la différence de coût entre les deux modes de désherbage pour une surface moyenne.

#### Pour le robot DINO :

pour **1000 m<sup>2</sup>** le coût est de **85 €** donc pour **65000 m<sup>2</sup>** le coût sera de **65 \* 85 = 5 525 €**

#### Pour l'agriculteur :

pour **1000 m<sup>2</sup>** le coût est de **205 €** donc pour **65000 m<sup>2</sup>** le coût sera de **65 \* 205 = 13 325 €**

La différence de coût entre les deux modes de désherbage pour une surface moyenne de **65000 m<sup>2</sup>** est de :

$$13 325 - 5 525 = 7 800 \text{ €}$$

Le prix d'achat du robot est estimé à **70 000 €**. Il faut, en moyenne, **3 opérations de binage par an et par exploitation**.

**Q4 -** Pour une exploitation moyenne, **calculer** le nombre de désherbages et le nombre d'années nécessaires pour amortir le prix d'achat du robot.

Pour une exploitation moyenne de **65000 m<sup>2</sup>** le gain entre les deux modes de désherbage est de **7 800 €** pour une opération de binage, on peut déterminer le nombre de binages  $N_{\text{Binages}}$  nécessaire pour amortir le coût d'investissement lié à l'achat du robot DINO de la manière suivante :

$$N_{\text{Binages}} = \frac{70 000}{7 800} = 8,97 \text{ soit } 9 \text{ opérations de binages.}$$

Comme il faut **3 opérations de binage par an**, on peut déterminer le nombre d'années  $N_{\text{années}}$  nécessaire pour avoir un retour sur investissement de la manière suivante :

$$N_{\text{années}} = \frac{N_{\text{Binages}}}{3} = 3 \text{ années.}$$

**Q5 - Expliquer** pourquoi il est judicieux pour le maraîcher d'acquérir ce robot.

Compte tenu des résultats précédents on constate que le maraîcher a toutes les données pour motiver l'acquisition du robot DINO en effet en termes :

- De coût : l'investissement de **70 000 €** reste raisonnable et le retour sur investissement **n'est que de 3 ans**,
- Environnemental : le fait d'utiliser un tel robot permet de minimiser, d'une part l'emploi de produits dangereux et d'autre part l'empreinte carbone,
- Temporel : l'emploi d'un tel robot devrait permettre au maraîcher de disposer de temps pour développer son activité.

**Etape 2 : La gestion du positionnement des socs de binage.**

**Objectif de cette partie : Assurer un parallélisme de qualité du porte-outils avec le plan des roues motrices pour différentes hauteurs du passe-pied.**

Lors du binage d'une planche de légumes, les roues motrices du robot roulent dans des espaces non cultivés, appelés passe-pieds (figure 6). Les plants sont situés entre ces passe-pieds, dans un plan horizontal situé au niveau ou au-dessus de celui des passe-pieds.

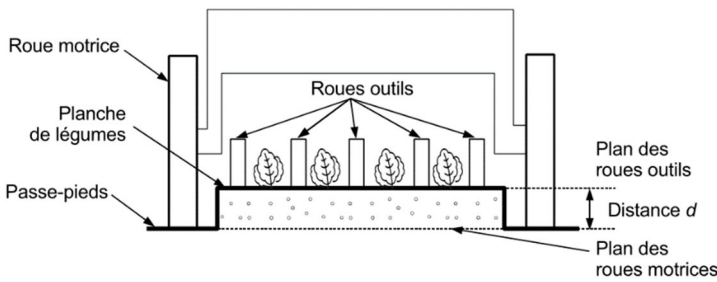


Figure 6 : schéma en coupe d'une planche et définition des plans horizontaux des roues motrices et des roues outils

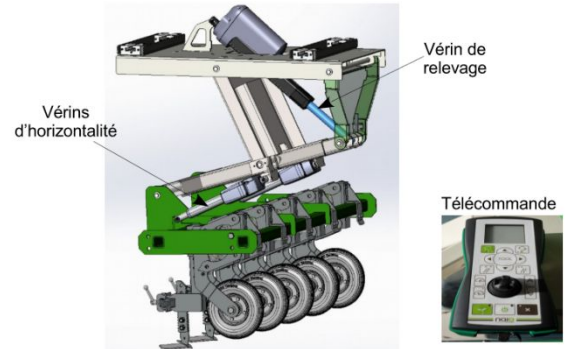


Figure 7 : perspective du porte-outils avec les socs (sans le châssis et les roues motrices)

Le positionnement du porte-outils se fait à l'aide de 3 vérins : **un vérin dit de relevage et deux vérins synchronisés, dits d'horizontalité** (voir figure 7). À l'aide de la télécommande, l'agriculteur actionne le vérin de relevage. Simultanément, l'unité de commande pilote les vérins d'horizontalité afin de maintenir le porte-outils parallèle au plan horizontal des roues motrices, confondu avec celui des passe-pieds.

En début de planche, le porte-outils est descendu jusqu'à ce que les roues outils touchent le sol.

Le schéma de la figure 8 définit la distance **h** de positionnement vertical des roues outils et du porte-outils et l'angle **α** associé au défaut de parallélisme du porte-outils par rapport au plan du passe-pieds.

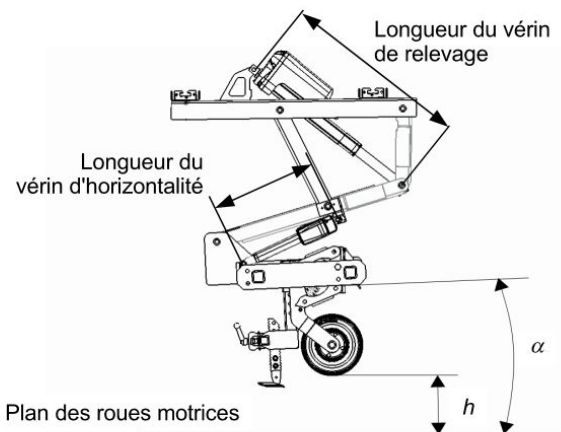


Figure 8 : réglage du porte-outils par rapport au plan des roues motrices

Avec ces notations et en tenant compte des variations de la distance entre le plan des roues motrices et le plan des roues outils (distance **d** figure 6) et du dégagement nécessaire hors travail, les exigences sur le positionnement du porte-outils sont définies dans le tableau 2.

L'utilisation d'un logiciel de simulation permet d'obtenir les courbes de la figure 9. Elles présentent l'évolution théorique des longueurs des vérins (définis figure 8) en fonction de la position **h** du porte-outils par rapport au plan des roues motrices pour **α = 0 degré**.

Fonction	Critère	Niveau
Assurer le déplacement vertical du porte-outils	distance <i>h</i> maximale	30 cm
	distance <i>h</i> minimale	0 cm
	précision de positionnement sur <i>h</i>	± 7 mm
	précision de positionnement sur les vérins d'horizontalité	± 5 mm
Assurer un binage de qualité	défaut de parallélisme du porte-outils par rapport au plan des roues motrices $\alpha$	5° maximal

Tableau 2 : exigences de positionnement du porte-outils

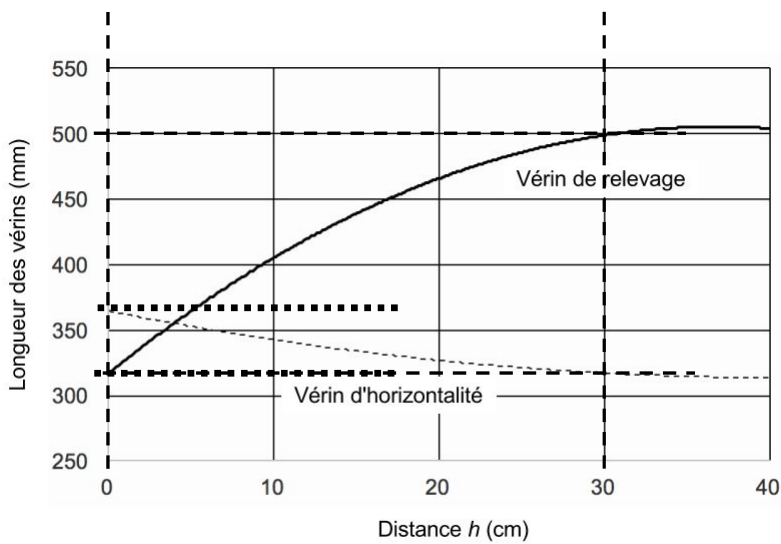


Figure 9 : longueurs théoriques des vérins en fonction de  $h$  pour  $\alpha=0$  degré

#### Validation des exigences sur la distance $h$ :

**Q6 - Relever**, à partir des courbes de la figure 9, les longueurs minimales et maximales des vérins permettant d'assurer les exigences de positionnement sur  $h$  définies dans le tableau 2.

On positionne deux verticales, l'une pour  $h = 0$  cm et l'autre pour  $h = 30$  cm, on détermine deux points d'intersections pour chacun des deux cas, on trace une horizontale pour chacun des 4 points d'intersections,

Pour  $h = 0$  cm

$$L_{V \text{ horizontalité}} = 370 \text{ mm}, L_{V \text{ relevage}} = 320 \text{ mm}$$

Pour  $h = 30$  cm

$$L_{V \text{ horizontalité}} = 320 \text{ mm}, L_{V \text{ relevage}} = 500 \text{ mm}$$

	Mini	Maxi
$L_{V \text{ horizontalité}}$	320 mm	370 mm
$L_{V \text{ relevage}}$	320 mm	500 mm

Pour des raisons économiques, ces vérins sont choisis identiques.

**Q7 - En déduire** la longueur minimale et la course nécessaire des vérins.

On retiendra la solution la plus contraignante à savoir **le vérin de relevage**, donc le service achat doit mentionner une longueur minimale  $L_{V \text{ mini}} = 320$  mm et une course  $C_{V \text{ mini}} = 180$  mm.

#### Détermination de la précision minimale sur la longueur des vérins d'horizontalité

Les vérins de relevage et d'horizontalité interviennent dans le positionnement vertical du porte-outils ainsi que dans son positionnement angulaire. Nous allons déterminer la précision sur leur longueur nécessaire pour assurer les exigences de positionnement du porte-outils.

Le couplage des incertitudes et les choix opérés par le constructeur permettent de restreindre l'étude aux vérins d'horizontalité : ils doivent assurer une précision souhaitée de  $\pm 5$  mm afin de respecter le critère de précision de positionnement sur  $h$ . L'étude est réalisée pour  $h = 10$  cm. La figure 10 présente un agrandissement autour de cette position.

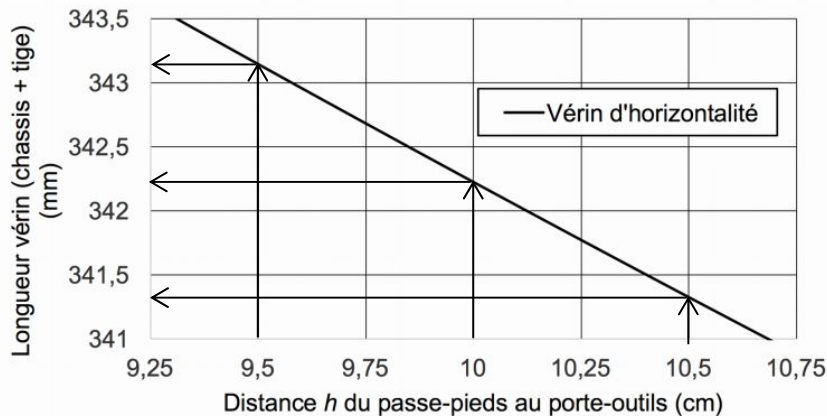


Figure 10 : longueur du vérin d'horizontalité en fonction de  $h$ , autour de  $h=10$  cm

**Q8 - Déterminer**, à partir de la figure 10, la valeur de la précision nécessaire sur le déplacement des vérins d'horizontalité pour atteindre l'exigence de  $\pm 5$  mm sur le positionnement.

Il faut déterminer la valeur de la longueur du vérin pour  $h = 9,5$  cm,  $h = 10$  cm et pour  $h = 10,5$  cm soit respectivement :

$$L_V = 341,35 \text{ mm}, L_V = 342,25 \text{ mm} \text{ et pour } L_V = 343,15 \text{ mm}$$

Donc pour garantir l'exigence de  $\pm 5$  mm il faut que  $L_V = 342,25 \text{ mm} \pm 0,9 \text{ mm}$ .

Afin d'assurer la qualité du binage, le défaut de parallélisme  $\alpha$  du porte-outils par rapport au plan des roues motrices doit rester **inférieur à 5°**. Une étude géométrique permet de relier la précision sur le déplacement du vérin d'horizontalité, notée  $\Delta x$ , au défaut de parallélisme  $\alpha$  (voir figure 11).

$$\alpha = \frac{x}{a \cdot b \cdot \sin \beta} \Delta x$$

avec :  $\alpha$  en radians  
 $a = 400 \text{ mm}$   
 $b = 113 \text{ mm}$   
 $\beta = 43,6^\circ$   
 $x = 327,5 \text{ mm}$

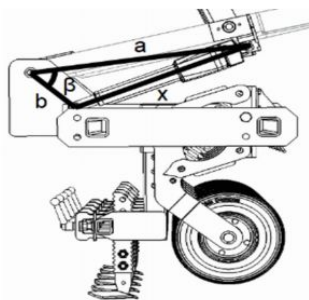


Figure 11 : défaut angulaire  $\Delta x$  en fonction du défaut de parallélisme  $\alpha$

**Q9 - Calculer** la variation de longueurs des vérins d'horizontalité induisant **une variation angulaire de 5°** sur l'orientation du porte-outils.

$$\alpha = \frac{x}{a \cdot b \cdot \sin(\beta)} * \Delta x \text{ donc } \Delta x = \frac{\alpha * a * b * \sin(\beta)}{x}$$

Application numérique :

$$\text{pour } \alpha = 5^\circ = \frac{5}{180} * \pi = 0,0873 \text{ rad alors } \Delta x = \frac{\frac{5}{180} * \pi * 400 * 113 * \sin(43,6)}{327,5} = 8,3 \text{ mm}$$

**Q10 - En déduire** la valeur de la précision nécessaire sur les vérins pour assurer à la fois le positionnement et l'orientation du porte-outils.

Compte tenu du travail précédent il faut retenir la plus contraignante des deux à savoir une incertitude de  $\pm 0,9 \text{ mm}$ .

#### Validation de la résolution de la consigne

Afin de mettre en œuvre le robot DINO dans le champ pour lequel la distance entre les planches de légumes et le passe-pieds est de **10 cm**, le calculateur envoie des consignes de position au vérin de relevage, puis au vérin d'horizontalité, via un bus CAN.

Le tableau 3 détaille la structure des données transmises sur le bus. Le vérin d'horizontalité est piloté par un bloc de puissance de **type 8** à l'intérieur duquel se trouve une carte **dont l'adresse est 5**.

11 bits d'identification			16 bits de données	
Numéro du type	Adresse de la carte	Identifiant Message	DATA 0	DATA 1
4 bits	3 bits	4 bits	8 bits (poids faible)	8 bits
Données codées en hexadécimal				
Type 2	2	de 0 jusqu'à 7	consigne position (mm) octet 0	consigne position (mm) octet 1
			courant max (A) x 4	tension nominale mot (V)
			courant moteur (A) x 4	position actuelle (mm) flottant octet 0
			température	
			version soft maj	version soft min
			major SW version	minor SW version
			board number	rev number
Type 8	8	de 0 jusqu'à 7	Consigne 0...100 %	statut
			courant max (A) x 4	tension nominale mot (V)
			courant moteur (A) x 4	position actuelle (%)
			température	
			version soft maj	version soft min
			board number	rev number

Les vérins choisis par le constructeur ont une longueur comprise entre **310 mm et 510 mm**.

La carte pilote la position de la tige du vérin par rapport au corps du vérin.

Pour une consigne de **0 %**, la tige est rentrée et la longueur du vérin est donc de **310 mm**. Pour une consigne de **100 %**, la tige est sortie de **200 mm**, course maximale du vérin.

Pour piloter la longueur du vérin d'horizontalité l'identifiant du message correspond à une consigne de position. Cette consigne de position en pourcentage est envoyée sur un octet. La valeur **255** (en décimal) correspond à **100 %**.

Tableau 3 : commande électrique des vérins par des cartes et blocs de puissance

**Q11 - Déterminer** la valeur hexadécimale des **11 bits d'identification du vérin d'horizontalité**.

Le numéro du type est défini sur **4 bits** pour le choix du constructeur, **le type est 8** donc **1000**<sub>(2)</sub>

L'adresse de la carte est définie sur **3 bits** pour le choix du constructeur, **l'adresse est 5** donc **101**<sub>(2)</sub>

L'identifiant du message est défini sur **4 bits** pour le choix du constructeur, **l'identifiant est 0** donc **0000**<sub>(2)</sub>

Conclusion la valeur des **11 bits d'identification du vérin d'horizontalité** à pour valeur en hexadécimal **850#**

**Q12 - Déterminer** la valeur (en décimal, arrondie à l'entier naturel inférieur) de la consigne de position à envoyer sur **DATA 0** afin que la longueur du vérin d'horizontalité soit de **340 mm**.

Pour une consigne de **0 %** la longueur est de **310 mm** et la valeur de **DATA 0** associée est de  $0_{(10)}$ , pour une course de **200 mm** la consigne est de **100 %** et la valeur de **DATA 0** associée est de  $255_{(10)}$ , donc pour une longueur de **340 mm** soit une course de **30 mm**, alors pour cette course la valeur de **DATA 0** sera :

$$\text{DATA 0} = \frac{30}{200} * 256 = 38,4 \text{ comme } \text{DATA 0} \in \mathbb{N} \text{ on retiendra } \text{DATA 0} = 38_{(10)}$$

**Q13 - Déterminer** la précision, en millimètres, de la commande du vérin d'horizontalité.

La plus petite valeur quantifiable s'exprime de la manière suivante :

$$\Delta L = \frac{200}{256} = 0,781 \text{ mm}$$

**Q14 - Vérifier** la compatibilité de la précision, en millimètres, de la commande du vérin d'horizontalité avec la précision déterminée précédemment.

L'incertitude recherchée est de  $\pm 0,9 \text{ mm}$ . donc la quantification  $\Delta L = 0,781 \text{ mm}$  permet de garantir la précision.

### Etape 3 : Le dispositif de maintien du contact entre la roue du soc et le sol.

**Objectif de cette partie : Valider** que l'action de la roue sur le sol permet d'amorcer le binage.

Afin d'assurer un binage de qualité, le soc doit être maintenu à 2 cm sous terre. Cette position est obtenue lorsque la roue du soc est en contact avec le sol (figure 12). À cette fin, l'ensemble constitué de la roue et du soc est relié au porte-outils par une structure en parallélogramme déformable qui permet à la roue de rester en contact avec le sol pour des variations de niveau de  $\pm 3 \text{ cm}$ .

En fonctionnement, lorsque le soc est sous terre, son angle d'incidence assure le maintien du contact de la roue avec le sol. En début d'opération et après un demi-tour effectué pour passer d'une rangée de plants à une autre, le porte-outils est descendu en position de travail et le soc repose sur le sol, mais pas la roue. Un effort minimal, obtenu par un ressort, est nécessaire pour assurer l'amorçage du binage (tableau 4).

Fonction	Critère	Niveau	Flexibilité
Assurer l'amorçage du binage	Effort du soc sur le sol	120 N	$\pm 20 \%$

Tableau 4 : exigence sur l'effort d'amorçage

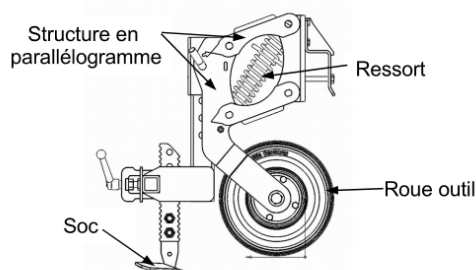


Figure 12 : ensemble outil (roue outil, soc, ressort et structure en parallélogramme)

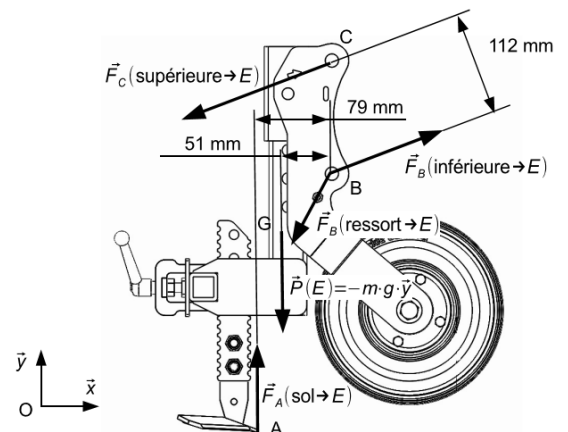


Figure 13 : géométrie et actions mécaniques sur l'ensemble isolé E

La figure 13 représente l'**ensemble isolé E** ainsi qu'un modèle des actions mécaniques s'exerçant sur cet ensemble afin de déterminer l'**action du soc sur le sol**. Les hypothèses sont :

- Modèle plan ( $O, \vec{x}, \vec{y}$ )
- Configuration correspondant à la position de référence (0 mm) de l'ensemble outil par rapport au porte-outils ;
- Robot à l'arrêt.

Les actions mécaniques qui s'appliquent sur l'**ensemble isolé E** sont :

Les actions à distance :

- L'action de la pesanteur  $\vec{P}(E)$  au point **G** avec  $m = 6,25 \text{ kg}$  et  $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Les actions de contact :

- L'action du sol sur le soc au point **A** notée  $\vec{F}_A$  (**sol**  $\rightarrow$  **E**) ;
- L'action du ressort de l'amortisseur au point **B** notée  $\vec{F}_B$  (**ressort**  $\rightarrow$  **E**) ;
- L'action de la biellette inférieure au point **B** notée  $\vec{F}_B$  (**inférieure**  $\rightarrow$  **E**) ;
- L'action de la biellette supérieure au point **C** notée  $\vec{F}_C$  (**supérieure**  $\rightarrow$  **E**).

**Q15 - Exprimer** l'équation scalaire issue du théorème du moment dynamique appliqué en **B** à l'ensemble isolé **E** dans son mouvement par rapport au sol.

Rappel :

Le théorème du moment dynamique s'exprime de la manière suivante :

$$\sum_{i=1}^{i=n} \overline{\mathcal{M}}_i [\vec{F}_{(E \rightarrow E)}] = \vec{0}$$

Ce qui se traduit ici par la relation suivante :

$$\overline{\mathcal{M}}_B[\vec{P}(E)] + \overline{\mathcal{M}}_B[\vec{F}_A(\text{sol} \rightarrow E)] + \overline{\mathcal{M}}_B[\vec{F}_B(\text{ressort} \rightarrow E)] + \overline{\mathcal{M}}_B[\vec{F}_B(\text{inférieure} \rightarrow E)] + \overline{\mathcal{M}}_B[\vec{F}_C(\text{supérieure} \rightarrow E)] = \vec{0}$$

Comme on considère que le modèle est plan alors on peut effectuer une projection sur l'axe  $(O, \vec{z})$  de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \overline{\mathcal{M}}_B[\vec{P}(E)] &= -0,051 * m * g \\ \overline{\mathcal{M}}_B[\vec{F}_A(\text{sol} \rightarrow E)] &= +0,079 * \|\vec{F}_A\| \\ \overline{\mathcal{M}}_B[\vec{F}_B(\text{ressort} \rightarrow E)] &= 0 \\ \overline{\mathcal{M}}_B[\vec{F}_B(\text{inférieure} \rightarrow E)] &= 0 \\ \overline{\mathcal{M}}_B[\vec{F}_C(\text{supérieure} \rightarrow E)] &= -0,112 * \|\vec{F}_C\| \end{aligned}$$

Conclusion :

$$-0,051 * m * g + 0,079 * \|\vec{F}_A(\text{sol} \rightarrow E)\| - 0,112 * \|\vec{F}_C(\text{supérieure} \rightarrow E)\| = 0$$

Pour la position de référence de la figure 13, la résolution des équations scalaires issues du principe fondamental de la dynamique permet de déterminer la norme de l'action de la biellette supérieure au point C :

$$\|\vec{F}_C(\text{supérieure} \rightarrow E)\| = 55 \text{ N}$$

**Q16 - Déterminer** l'action du sol sur le soc au point A. **Calculer** l'écart entre cette valeur et celle indiquée dans le cahier des charges puis **conclure**.

$$\|\vec{F}_A(\text{sol} \rightarrow E)\| = \frac{0,112 * \|\vec{F}_C(\text{supérieure} \rightarrow E)\| + 0,051 * m * g}{0,079} = \frac{0,112 * 55 + 0,051 * 6,25 * 9,81}{0,079} = 117,56 \text{ N}$$

L'écart absolu est de  $120 - 117,56 = 2,44 \text{ N}$

L'erreur relative est de  $\frac{2,44}{120} = 2 \%$ , valeur nettement inférieur à la valeur de la flexibilité adoptée dans le CDC.

Par suite d'un demi-tour effectué pour passer d'une rangée à l'autre, l'effort d'amorçage doit respecter le cahier des charges malgré les variations de hauteur du sol de  $\pm 3 \text{ cm}$ . Une simulation réalisée à partir d'un modèle numérique (figure 14) donne l'évolution de cet effort en fonction de la position verticale du point **A** (direction  $(O, \vec{y})$ ). La position **0** correspond à la position de référence.

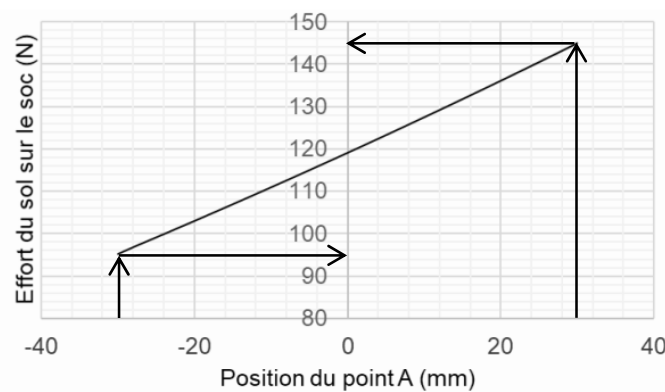


Figure 14 : effort de binage

**Q17 - Comparer** l'effort sur le soc obtenu par simulation et celui spécifié dans le cahier des charges. **Conclure**.

Le cahier des charges stipule les variations de hauteur du sol de  $\pm 3 \text{ cm} = \pm 30 \text{ mm}$ , on relève sur la figure 14 les valeurs suivantes de l'effort du sol sur le soc :

de **95 N à 145 N**

Le CDC stipule :

**120 N à  $\pm 20 \%$  soit de 96 N à 144 N**

On peut donc considérer que le CDC est respecté.

## Etape 4 : La gestion de l'alignement latéral des socs de binage.

**Objectif de cette partie : Vérifier** les performances du dispositif de positionnement latéral rapide des socs de binage.

Pour que le robot DINO soit performant et concurrentiel, il doit assurer le positionnement des socs au plus près des plants sans les détériorer. Pour cela, un vérin électrique latéral (figure 15) permet de déplacer rapidement et précisément le porte-outils par rapport au châssis du robot.

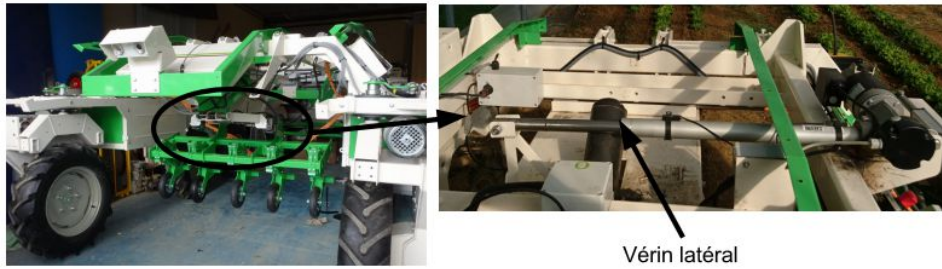


Figure 15 : positionnement général et vérin électrique latéral

Ce système automatisé utilise les images d'une caméra située au-dessus du porte-outils afin de contrôler à tout instant la position des socs par rapport aux plants. Les performances attendues sont récapitulées tableau 5.

Fonction	Critères sur le système asservi	Niveau
Assurer le positionnement latéral rapide du porte-outils	Dépassement acceptable	0 cm
	Écart statique en régime permanent	0 cm
	Temps de réponse	< 0,3 s pour 1 cm < 3 s pour 10 cm

Tableau 5 : exigences de positionnement latéral du porte-outils par le vérin électrique

Afin de valider les performances, il est nécessaire de modéliser la chaîne d'énergie et la chaîne d'acquisition du système. Cette chaîne d'acquisition permet d'obtenir la position des plants par rapport aux socs et de piloter la chaîne d'énergie en conséquence.

### Modélisation de la chaîne d'énergie

Les constituants de la chaîne d'énergie sont détaillés figure 16 et l'objectif est de valider le modèle multiphysique représenté figure 17. Dans ces modèles, la position de l'écrou du dispositif vis/écrou correspond à la position latérale de la tige du vérin électrique et donc des socs.

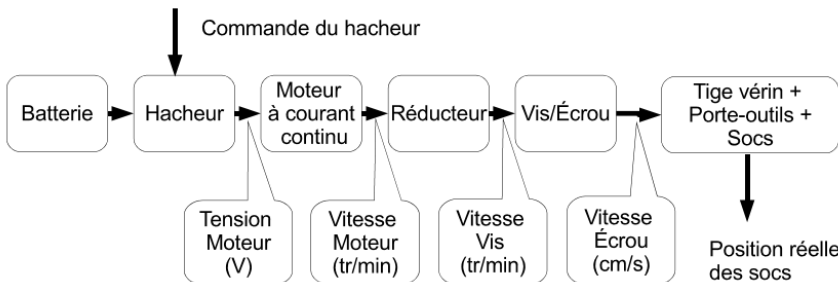


Figure 16 : chaîne d'énergie du déplacement latéral rapide par le vérin électrique

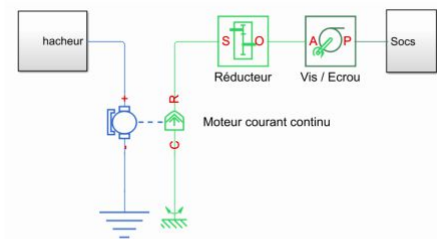


Figure 17 : modélisation multiphysique de la chaîne d'énergie

Les données et paramètres renseignés dans le modèle sont les suivants :

- Tension nominale de la batterie **12 V** ;
- Résistance de l'induit du moteur  **$R = 0,2 \Omega$**  ;
- Constante de force contre électromotrice (fcém) du moteur à courant continu  **$k_m = 0,0307 \text{ V} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{s}$**  ;
- Rapport de réduction du réducteur  **$k_r = \frac{1}{6,25}$**  ;
- Pas de la vis  **$p = 5 \text{ mm}$**  ;
- Couple de frottement sec ramené sur l'axe moteur modélisant l'ensemble des frottements secs (contact des socs avec le sol et balais-collecteur)  **$C = 70 \text{ mm}_A \text{N}$** .

**Q18 - Déterminer** la vitesse de translation de la tige du vérin à partir des données du constructeur, en supposant que le moteur tourne à la vitesse de rotation nominale est de  **$3600 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$**  durant tout le déplacement.

$$V_{\text{tige}} = k_r * p * N_m = \frac{1}{6,25} * 5 * 3600 = 2880 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} \text{ soit } \frac{2880}{60} = 48 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$$



Afin de valider le modèle multiphysique du vérin électrique latéral, l'expérience suivante est réalisée :

Les socs sont rentrés dans le sol à **2 cm** de profondeur et un ordre de déplacement de **10 cm** est donné au vérin électrique pendant que le robot avance. Les résultats expérimentaux et ceux provenant de l'utilisation du modèle multiphysique sont tracés sur la figure 18.

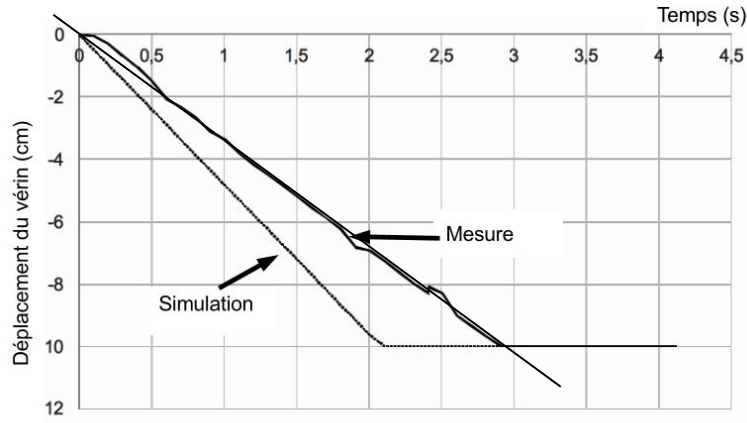


Figure 18 : mesure et simulation du déplacement du vérin

**Q19** - À partir des résultats de mesure et de simulation (figure 18), **déterminer** les vitesses expérimentales et simulées de translation de la tige du vérin. **Conclure** quant à la vitesse de rotation du moteur au cours de son fonctionnement.

Hypothèse : on assimile la courbe réelle à une droite comme le montre le tracé sur la figure 18.

La courbe représente l'évolution de la position en fonction du temps, la vitesse correspond à la dérivée de la position par rapport au temps donc :

$$V_{\text{vérin simulé}} = \left| -\frac{10}{2,1} \right| = 4,76 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1} = 47,62 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$V_{\text{vérin réelle}} = \left| -\frac{10}{2,9} \right| = 3,448 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1} = 34,48 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$$

Conclusion :

La vitesse de rotation du moteur sera inférieure à la vitesse nominale.

**Q20 - Quantifier** les écarts sur la valeur finale du déplacement et le temps de réponse entre d'une part le système simulé et le système réel, et d'autre part entre le système réel et le système souhaité. **Conclure** sur la validité du modèle.

On constate sur la figure 18 que pour les deux situations :

- Il n'existe pas de dépassement indiciel,
- Le régime établi est systématiquement atteint en moins de **3 s**,
- La position en régime établi est systématiquement égale à **10 cm**.

Pour ces trois critères les deux situations sont conformes au CDC.

Les seuls écarts constatés concernent la durée du régime transitoire de **2,1 s** pour le système simulé, de **2,9 s** pour le système réel soit les écarts suivants :

- **Réel/simulé 0,8 s**, il faudrait affiner la modélisation.
- **Réel/souhaité 0,1 s**, le résultat est très correct.

Le schéma équivalent, en régime établi, de l'induit du moteur à courant continu du vérin électrique est donné à la figure 19 :

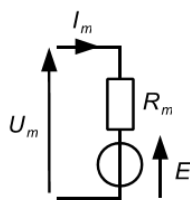


Figure 19 : schéma équivalent de l'induit

$$E = k_m * \omega_m,$$

$E$  représente la f.c.é.m. en  $V$ ,

$\omega_m$  représente la vitesse angulaire de rotation du moteur en  $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$

$k_m$  représente la constante de force électromotrice en  $V \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{s}$ ,

$$C_m = k_c * I_m,$$

$C_m$  représente le couple moteur en  $\text{m}_A \text{N}$ ,

$I_m$  représente le courant d'induit du moteur en  $A$ ,

$k_c$  représente la constante de couple  $\text{m}_A \text{N} \cdot A^{-1}$ .

**Remarque :** en valeur numérique  $k_m = k_c$

Pour réduire les écarts entre le système simulé et le système réel, deux essais sont effectués pour déterminer expérimentalement les paramètres suivants :

- La résistance d'induit  $R_m$ ,
- La constante de fcém  $k_m$ ,
- Le couple total de frottement sec ramené sur l'axe moteur  $C_0$ .

Lors du premier essai, les conditions sont les suivantes :

- Rotor moteur bloqué ;
- Tension d'alimentation du moteur de **1,3 V** ;
- Courant d'induit mesuré de **2 A**.

**Q21 - En déduire** la valeur mesurée de la résistance d'induit  $R_m$ .

Cet essai est réalisé à rotor bloqué en régime établi dans ces conditions  $E = 0 \text{ V}$  et  $U_L(t) = L * \frac{dI_m(t)}{dt} = 0 \text{ V}$  conclusion par application de la loi d'Ohm nous avons :

$$U_m = R_m * I_m \text{ donc } R_m = \frac{U_m}{I_m} = \frac{1,3}{2} = 0,65 \Omega$$

Lors d'un deuxième essai similaire à celui ayant donné les résultats de la figure 18, les conditions sont :

- Tension d'alimentation maximale de 12 V ;
- En charge (socs dans la terre).

Le relevé de la vitesse angulaire de rotation du moteur et du courant d'induit consommé pendant le test est donné à la figure 20.

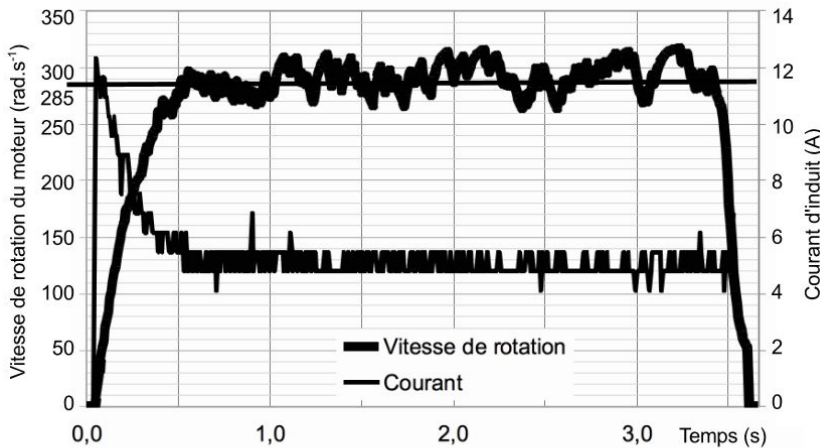


Figure 20 : vitesse de rotation et courant du moteur à courant continu du vérin pendant l'essai en charge (deuxième essai)

**Q22 - Déterminer** à partir de la réponse expérimentale en régime permanent de l'essai en charge, la constante de fcém  $k_m$  et le couple de frottement sec  $C_0$ . **Justifier** l'écart entre le temps de réponse mesuré et celui issu de simulation déterminé à la question Q20.

Pour déterminer la valeur de  $k_m$ , il faut déterminer la valeur de  $E$ , pour cela on applique la loi de la maille qui permet d'écrire que :

$$U_m = R_m * I_m + E \text{ donc } E = U_m - R_m * I_m$$

On relève qu'en régime établi  $I_m = 5 \text{ A}$  donc :

$$E = 12 - 0,65 * 5 = 8,75 \text{ V}$$

On relève qu'en régime établi  $\omega_m = 285 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$  A donc :

$$k_m = \frac{E}{\omega_m} = \frac{8,75}{285} = 0,0307 \text{ V} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{s}$$

Pour déterminer  $C_0$ , on utilise l'équation électromécanique suivante :

$$C_0 = k_c * I_m = 0,0307 * 5 = 0,1535 \text{ m}_\Lambda \text{N} = 153,5 \text{ mm}_\Lambda \text{N}$$

### Modélisation de la chaîne d'acquisition

La structure de la chaîne d'acquisition qui permet d'obtenir une image de la position des socs par rapport aux lignes de plants est définie sur la figure 21.

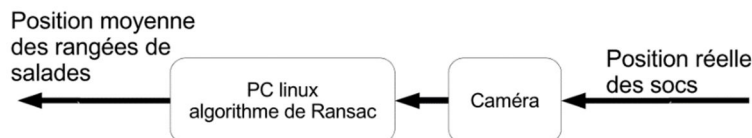


Figure 21 : chaîne d'acquisition de la position réelle des socs

La mesure est obtenue par traitement des images provenant de l'objectif grand angle de la caméra. Le comportement de la chaîne d'acquisition peut être assimilé à un coefficient multiplicateur si le temps de calcul est suffisamment petit, c'est-à-dire inférieur à **30 ms**.

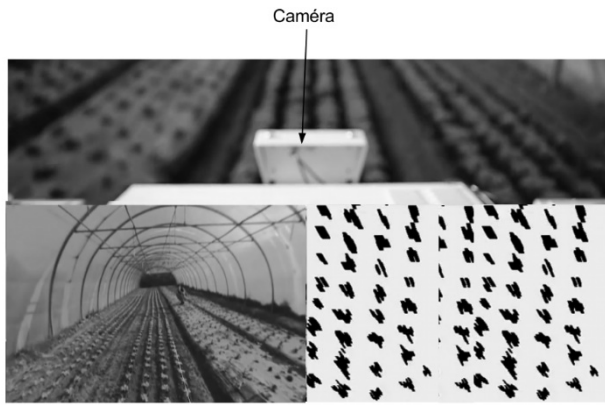


Figure 22 : photo de la caméra (en haut), vidéo prise par la caméra (en bas à gauche), traitement des images de la caméra (en bas à droite)

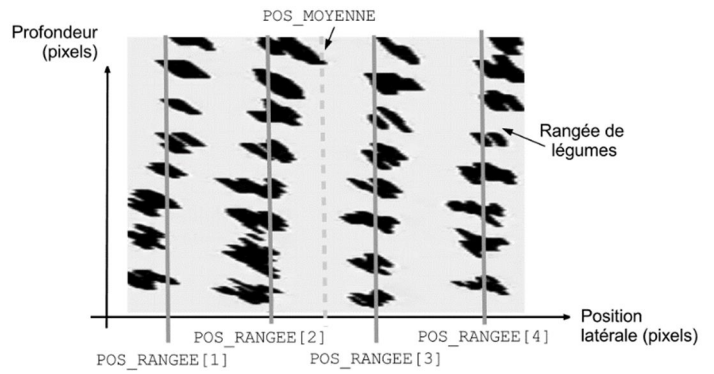


Figure 23 : droites et position des rangées de salades à partir de l'image de la caméra

L'image initiale, qui comprend quatre rangées de plants, est convertie en niveaux de gris, puis en noir et blanc. L'objectif est de traiter cette information (points noirs sur fond blanc) afin de déterminer la position des plants et de commander le vérin latéral en conséquence. Pour cela, les étapes suivantes sont réalisées :

- Identification de quatre droites modélisant les quatre rangées de légumes ;
- Détermination de l'écart entre la position des rangées et la position de la caméra.

L'identification mathématique des quatre droites représentant les quatre rangées est basée sur la méthode de **RANSAC** acronyme de **RANDom SAmple Consensus** (voir article sur internet). L'algorithme de cette méthode choisit aléatoirement des couples de points noirs. Chaque couple de points définit une droite dont les coordonnées sont stockées dans un tableau de flottants de taille 2. Pour chaque droite, l'algorithme calcule un score d'autant plus important que la droite passe par d'autres points noirs ou en est proche. La droite retenue est celle qui a le meilleur score et donc celle qui passe par un maximum de plants. La position de ces droites **POS\_RANGEE** est alors déterminée pour chaque rangée.

Le porte-socs s'aligne sur la position moyenne des rangées de salades notée **POS\_MOYENNE**. Le pseudo-code décrivant ce comportement est donné ci-dessous. Les phrases notées en italique et précédées par # sont des commentaires. Les fonctions suivantes sont utilisées :

- « **Initialisation ( )** » initialise toutes les variables ainsi que la caméra ;
- « **Calcul\_Droite (i)** » renvoie un tableau de REEL contenant les coordonnées de la droite déterminée à partir de deux points choisis aléatoirement dans la rangée i ;
- « **Score\_Droite (D)** » renvoie le score de la droite D donnée en paramètre ;
- « **Calcul\_Pos\_Rangée (D)** » renvoie un nombre REEL donnant la position latérale de la droite D donnée en paramètre.

### Pseudo-code du comportement

```

1. # Début des déclarations des variables
2. Nb_Iterations_max : ENTIER
3. Score : ENTIER
4. Score_max : ENTIER
5. D : FLOTTANT[2]      # tableau contenant les coordonnées
                       # de la droite courante
6. D_max : FLOTTANT[2] # tableau contenant les coordonnées
                       # de la droite ayant le score
                       # maximal
7. POS_RANGEE : FLOTTANT[4] # tableau contenant les positions de
                             # chaque rangée
8. POS_MOYENNE : FLOTTANT # position moyenne des rangées de
                             # salades, correspondant à la
                             # position numérisée
9. i : ENTIER           # Variable d'incréméntation
10. j : ENTIER          # Variable d'incréméntation
11.
12. # Début du programme
13. Initialisation()
14. Nb_Iterations_max ← 100
15.
16. POUR i DE 1 à 4 FAIRE
17.   POUR j DE 1 à Nb_Iterations_max FAIRE
18.     D ← Calcul_Droite(i)
19.     Score ← Score_droite(D)
20.     SI ..... ALORS
21.       .....
22.       .....
23.     FIN SI
24.   FIN POUR
25.   POS_RANGEE[i] ← Calcul_Pos_Rangée(D_max)
26. FIN POUR
27. POS_MOYENNE ← .....

```

Quelques explications préalables :

**14. Nb\_Iterations\_max ← 100 :**

on affecte **100** à la variable « **Nb\_Iterations\_max** »

**16. POUR i DE 1 à 4 FAIRE :**

On débute une boucle FAIRE qui sera effectuée **4 fois**

**17. POUR j DE 1 à Nb\_Iterations\_max FAIRE :**

On introduit une boucle FAIRE dans une boucle FAIRE, ici cette boucle sera effectuée **100 fois** car la variable « **Nb\_Iterations\_max** » = **100**.

**18. D ← Calcul\_Droite (i) :**

On affecte à la variable « **D** » un tableau de REEL, cette démarche sera effectuée **100 fois** pour chacune des valeurs de la variable « **i** ».

**19. Score ← Score\_Droite (D) :**

On affecte à la variable « **Score** » le score obtenu par la variable « **Score\_Droite (D)** »

Des ligne **20.** à **23.** : On effectue une analyse conditionnelle sur la variable « **Score** ».

**24. FIN POUR :**

On ferme la deuxième boucle FAIRE, cette action sera réalisée **100 fois**.

**25. POS\_RANGEE (i) ← Calcul\_Pos\_Rangée (D\_max) :**

On affecte à la variable « **POS\_RANGEE (i)** » la valeur du calcul de la position latérale de la droite (D).

**26. FIN POUR :**

On ferme la première boucle FAIRE, cette action sera réalisée **4 fois**.

**27. POS\_MOYENNE ← ..... :**

On affecte à la variable « **POS\_MOYENNE** » le calcul de la moyenne des variables « **POS\_RANGEE (i)** »

**Q23 - Recopier et compléter** les lignes 17 à 24 de l'algorithme de RANSAC permettant de déterminer la droite de score maximal.

```
17. POUR j DE 1 à Nb_Iterations_max FAIRE
18.     D ← Calcul_Droite(i)
19.     Score ← Score_droite(D)
20.     SI Score > Score_max ALORS # on ouvre une analyse conditionnelle SI : Si la variable « Score » est supérieure
                                   à la variable « score_max » on effectue la ligne 21., si non on effectue la ligne 22.
21.         D_max ← D
22.         Score ← Score_max
23.     FIN SI # on ferme l'analyse conditionnelle SI, cette action sera réalisée 100 fois.
24. FIN POUR
```

**Q24 - Recopier et compléter** la ligne 27, permettant de déterminer la position moyenne des rangées, notée « POS\_MOYENNE », à partir des résultats de l'algorithme de RANSAC.

27. POS\_MOYENNE ← {POS\_RANGEE (1) + POS\_RANGEE (2) + POS\_RANGEE (3) + POS\_RANGEE (4)} / 4 # on effectue un calcul de valeur moyenne simple.

Le traitement informatique est effectué par un calculateur spécifique fonctionnant sous Linux. La simplification suivante est effectuée : chaque itération de la boucle POUR des lignes 17 à 24 est réalisée en **20 µs**, le temps des autres instructions est négligé.

Le cahier des charges impose un temps de traitement de l'information inférieur à **30 ms** pour que la chaîne d'acquisition soit assimilée à un gain. Dans l'algorithme de RANSAC, plus le nombre d'itérations maximal est grand, plus l'algorithme est précis. Il existe donc un compromis entre temps de calcul et précision de l'asservissement.

**Q25 - Déterminer** le nombre d'itérations maximal « Nb\_Iterations\_max » possible permettant de respecter le temps de traitement de l'information du cahier des charges. **Conclure.**

Compte tenu des données on peut écrire que :

$$4 * 20 \cdot 10^{-6} * \text{Nb\_Iterations\_max} < t_{\text{traitement}}$$
$$\text{Nb\_Iterations\_max} < \frac{30 \cdot 10^{-3}}{4 * 20 \cdot 10^{-6}} < 375$$

On constate que cette valeur est pratiquement **4 fois supérieure** à celle utilisée dans l'exemple, on peut espérer que la précision de l'asservissement sera correcte.

#### Vérification des performances du système rebouclé

L'alignement latéral des socs de binage est obtenu par la mise en œuvre des chaînes d'énergie et d'acquisition à l'intérieur d'un système asservi. Pour rappel, les performances attendues de l'asservissement sont les suivantes :

- Pas de dépassement pour ne pas risquer de dégrader les plants ;
- Pas d'écart statique en régime permanent sur la position des socs ;
- Temps de réponse à **5 %** inférieur à **0,3 s** pour une consigne de **1 cm**.

L'exploitation d'un modèle multiphysique permet d'obtenir la courbe de la figure 24.

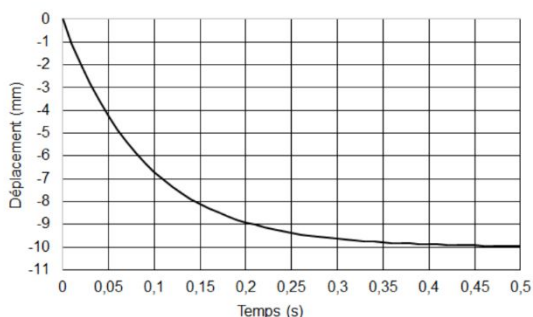


Figure 24 : évolution du déplacement latéral du soc pour une consigne de -1 cm

**Q26 - Vérifier** si toutes les performances exigées par le cahier des charges données sur le tableau 5 sont respectées.

**Conclure** quant à la qualité de l'alignement des socs par cette solution intégrant un traitement algorithmique de l'image.

On constate **qu'il n'y a pas de dépassement indiciel**, qu'en régime établi **l'erreur de position est nulle** et enfin **que le temps de réponse à 5 % est inférieure à 0,3 s**, conclusion les réglages effectués permettent de répondre à l'ensemble des critères du CDC.

#### Etape 5 : La gestion de l'alignement latéral des socs de binage.

**Q27 - Conclure** sur la pertinence économique, écologique et technique de la mise en œuvre du robot DINO.

Le robot étudié permet de répondre aux attentes relatives à la pratique agricole du désherbage en termes de temps et de coût, il contribue à l'objectif de diminution de l'empreinte carbone et au respect de l'environnement puisqu'il n'utilise pas de produit chimique, il reste à déterminer l'impact environnemental du recyclage en fin de vie, en particulier le traitement des accumulateurs.