

**Concours général des lycées - Sciences de l'ingénieur**  
**Session 2022**  
**Rapport du jury**

## 1. Composition du jury

---

- Pascale Costa, inspectrice générale de l'éducation, du sport et de la recherche, présidente du Jury
- Stéphanie Texier, inspectrice d'académie-inspectrice pédagogique régionale de l'académie de Créteil, vice-présidente du Jury
- François Brugier, professeur, lycée Le Corbusier, Aubervilliers, académie de Créteil
- Isabelle Brunel, professeure, lycée Langevin, Martigues, académie d'Aix-Marseille
- Céline De Loor, professeure, lycée Dumas, Alès, académie de Montpellier
- François Golanski, professeur, lycée des métiers Raspail, académie de Paris
- Hélène Leroux, professeure, lycée François 1<sup>er</sup>, Fontainebleau, académie de Créteil
- Luc Nadalon, professeur, lycée polyvalent de Cachan, Cachan, académie de Créteil

## 2. Quelques chiffres

---

	Candidats inscrits		Candidats présents	% de filles
	France	Étranger		
Session 2022	103	7	103	16

La répartition des candidats est assez représentative de celle des classes de spécialité sciences de l'ingénieur.

Le jury incite les enseignants de terminale à encourager leurs élèves à présenter le concours général, c'est un exercice très formateur qui valorise leurs élèves et leur établissement.

## 3. Le palmarès de la session 2022

---

Le jury félicite l'ensemble des candidats à l'épreuve de sciences de l'ingénieur du concours général des lycées. Cette année trois prix, cinq accessits et dix mentions ont été attribués.

Les trois premiers candidats ont reçu leur prix lors d'une cérémonie en Sorbonne à Paris en présence du ministre de l'Éducation nationale et de la jeunesse le 7 juillet 2022.

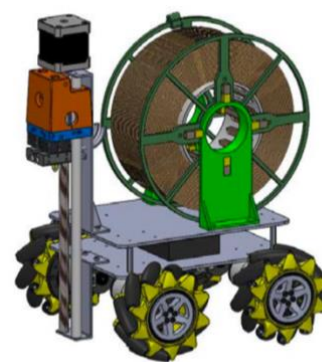
## 4. Présentation du support de l'épreuve

---

Le sujet portait sur un « Robot Printer ». Ce robot permet de faire collaborer plusieurs imprimantes 3D mobiles, dans le but de fabriquer des pièces de grandes dimensions sans avoir recours à une imprimante elle-même de grande dimension.

L'objectif du sujet était de confronter les performances estimées (analyse, simulation) ou mesurées aux performances attendues du cahier des charges ; la problématique essentielle du sujet concernait les exigences de précision en position du robot.

Le robot étudié est une base mobile, constituée de quatre roues motorisées de type *mecanum* indépendantes. Une carte à microcontrôleur assure à la fois la communication avec un ordinateur de commande (transmission des consignes d'impression) et le pilotage des 4 moteurs pour imposer au robot la trajectoire requise.



Au moment de la conception de ce sujet, le système était en cours de développement, en phase de prototype. Les solutions techniques retenues n'étaient donc pas encore validées et les conclusions restaient ouvertes : les candidats étaient ainsi amenés à porter des conclusions objectives basées sur l'analyse quantitative des données du sujet sans a priori sur la validité des options proposées.

Après une partie consacrée à la présentation du contexte, la deuxième partie amenait les candidats à conduire une brève analyse fonctionnelle et structurelle du robot. L'objectif de la troisième partie était de caractériser la trajectoire du robot en tenant compte de la cinématique complexe des roues *mécanum* puis de vérifier le non-bascullement du robot pendant les phases de fonctionnement les plus critiques. La quatrième partie permettait de justifier la nécessité d'un asservissement de position afin de répondre aux exigences de précision. Les candidats étaient conduits, dans la cinquième partie, à caractériser la chaîne d'information, avec, en particulier, l'élaboration d'un programme Python de traitement des données issues de codeurs incrémentaux. Au cours de la dernière partie, l'analyse du système permettait de conclure qu'il serait nécessaire de faire évoluer l'architecture mécanique du robot, une amélioration possible du robot étant finalement évaluée sur des critères du cahier des charges liés à l'étendue de la zone imprimable.

## 5. Analyse des résultats

---

La partie B portant sur l'analyse du fonctionnement globale du système a généralement été bien traitée.

La partie C1, portant sur la cinématique a été moins bien traitée dans l'ensemble que le reste du sujet. Cette partie, présentée avec un questionnement progressif et rigoureux dans ses notations vectorielles, nécessitait une bonne maîtrise des notions de cinématique du solide. Cette maîtrise a manqué à la très grande majorité des candidats. Sans surprise, la répartition du nombre de candidats n'ayant pas traité une question à mesure de l'avancée dans la partie est très marquée et le niveau de réussite parmi les candidats ayant traité les questions est décroissant.

En revanche, les questions C1.12 et C1.13, qui permettaient de conclure sur le respect des trajectoires à partir de résultats de mesures ont été bien traitées, y compris par les candidats n'ayant pas réussi les questions précédentes. Les candidats ont globalement su repérer l'indépendance de ces questions par rapport aux développements précédents.

La partie dynamique C2 a été assez peu traitée. La majorité des candidats à tout de même pu aborder le bilan des actions et le calcul des moments des actions mécaniques. L'essentiel des développements analytiques était fourni dans le sujet, mais la plupart des candidats n'a pas réussi à exploiter les équations vectorielles pour établir les équations issues du principe fondamental de la dynamique.

La partie D, portant sur le suivi de trajectoire et l'analyse d'une solution d'asservissement en vitesse des roues, a été mieux traitée. C'est dans cette partie que la qualité rédactionnelle et les capacités d'analyse de la plupart des candidats ont pu être appréciées. La question D5, un peu plus exigeante sur les capacités de modélisation d'un asservissement a été moins traitée et moins bien réussie par les candidats l'ayant traitée. La mise en relation des courbes de vitesses de rotation des roues et du comportement du robot a été bien appréhendée.

La partie E, portant sur l'acquisition et le traitement des données par le microcontrôleur n'a été traitée que par une moitié des candidats. Une très grande disparité entre des candidats sur cette partie du programme a été remarquée. Même si ce n'est pas la majorité, certains candidats montrent une bonne maîtrise face à un programme simple. Ils sont capables de compléter un programme python, en tenant compte du besoin et du contexte, et de le commenter de façon très pertinente et synthétique.

La partie F avait pour objectif d'évaluer une modification portant sur la géométrie dans le but de respecter les exigences de précision et de dimension de zone d'impression. Bien qu'indépendante des parties précédentes, cette partie a été assez peu traitée, avec une réussite moyenne de moins de 30% parmi les candidats l'ayant abordée. Très peu de candidats ont su mener un raisonnement sur les longueurs des solides indéformables pour estimer les zones atteignables par la buse d'impression.

Sur les 103 copies corrigées, une vingtaine démontrent un niveau de compréhension de la problématique posée et de maîtrise des compétences du programme de spécialité sciences de l'ingénieur très honorable. Il est intéressant de noter que la plupart de ces copies sont également remarquables par leur qualité de rédaction (clarté, qualité de l'expression, lisibilité, mise en valeur des résultats importants, etc.).

## 6. Commentaires généraux

---

Le jury encourage vivement les élèves de première et de terminale souhaitant se présenter au concours général des lycées à se préparer spécifiquement pour cette épreuve. Pour cela, il faut développer des compétences et connaissances portant sur l'ensemble des attendus du programme de la spécialité sciences de l'ingénieur. Une maîtrise, même très bonne, de seulement quelques parties du programme ne permet pas de se classer parmi les meilleurs candidats. Certains ont montré, cette année encore, une aisance remarquable sur l'ensemble du sujet proposé.

À l'issue de cette session, on peut noter certains points du programme ayant posé des difficultés à beaucoup de candidats :

- modéliser les mouvements (trajectoires et mouvements, composition des vitesses, torseurs cinématiques) ;
- modéliser les actions mécaniques (torseurs d'actions mécaniques transmissibles) ;
- traduire un algorithme en un programme exécutable (langage de programmation Python) ;
- associer un modèle à un système asservi (relation entre les blocs du schéma d'asservissement et les effets sur le comportement du système).

## 7. Éléments de correction

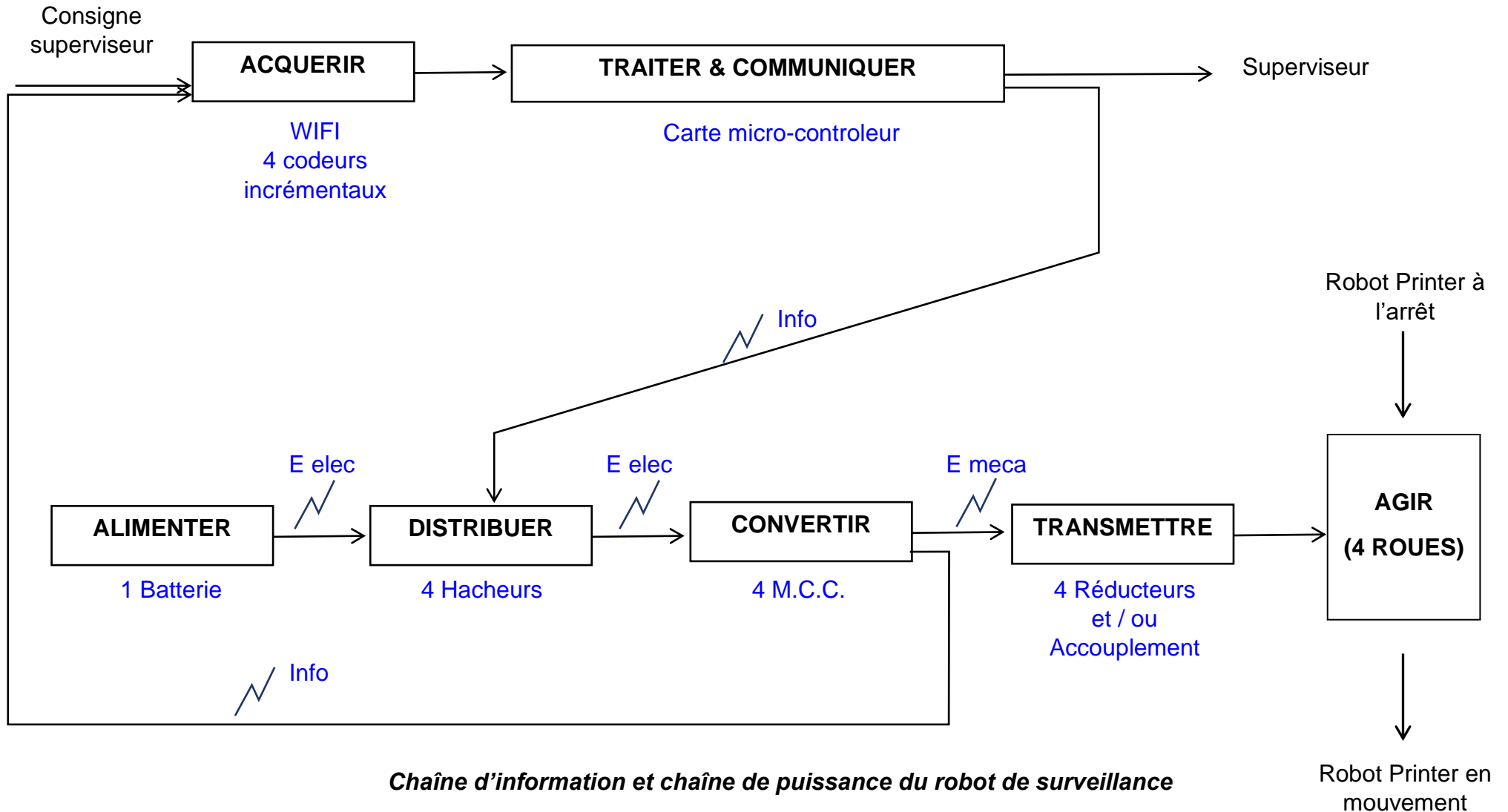
---

Le corrigé de l'épreuve écrite ci-après n'est qu'une proposition qui n'a d'autre but que celui d'aider les futurs candidats dans leur préparation au concours général des lycées. Il ne s'agit donc absolument pas d'un modèle normatif.

## CORRIGE CAHIER REPONSE

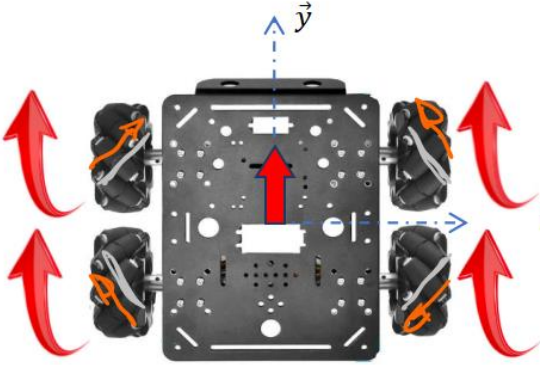
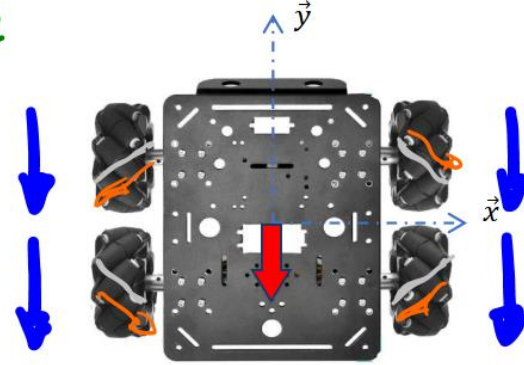
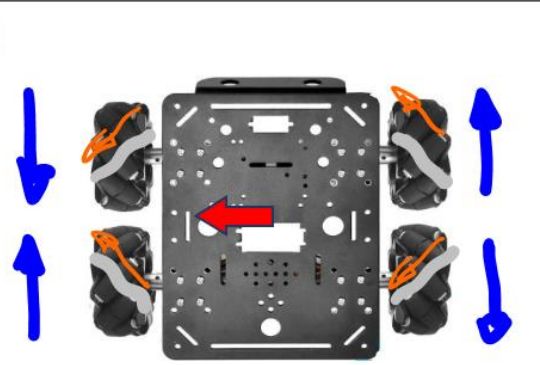
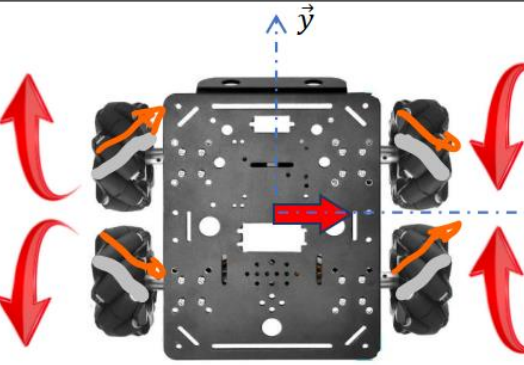

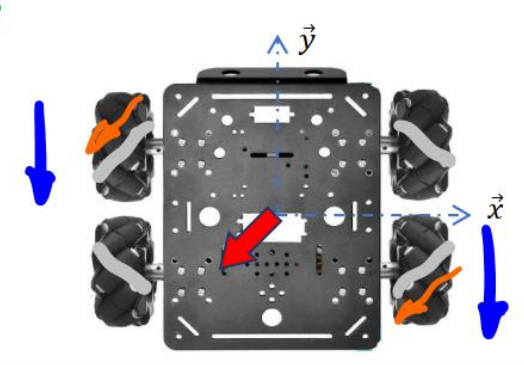
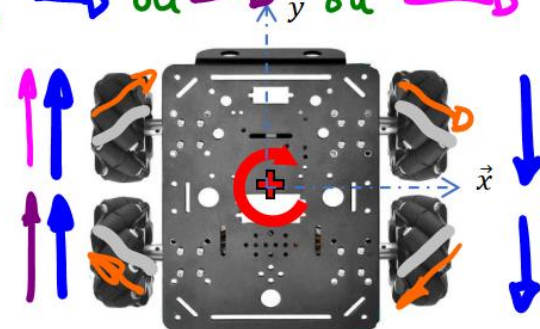
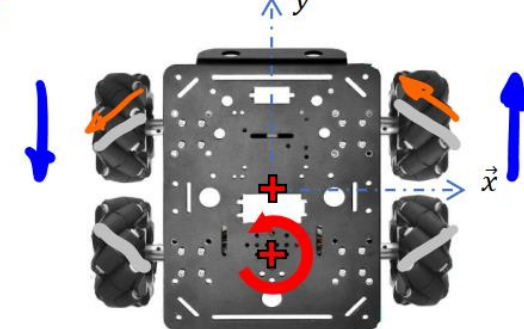
**Question B.1 : Compléter** la chaîne d'énergie et la chaîne d'information en indiquant les constituants réalisant les fonctions.

**Question B.2 : Indiquer** la nature des flux (énergie électrique, énergie mécanique ou information).

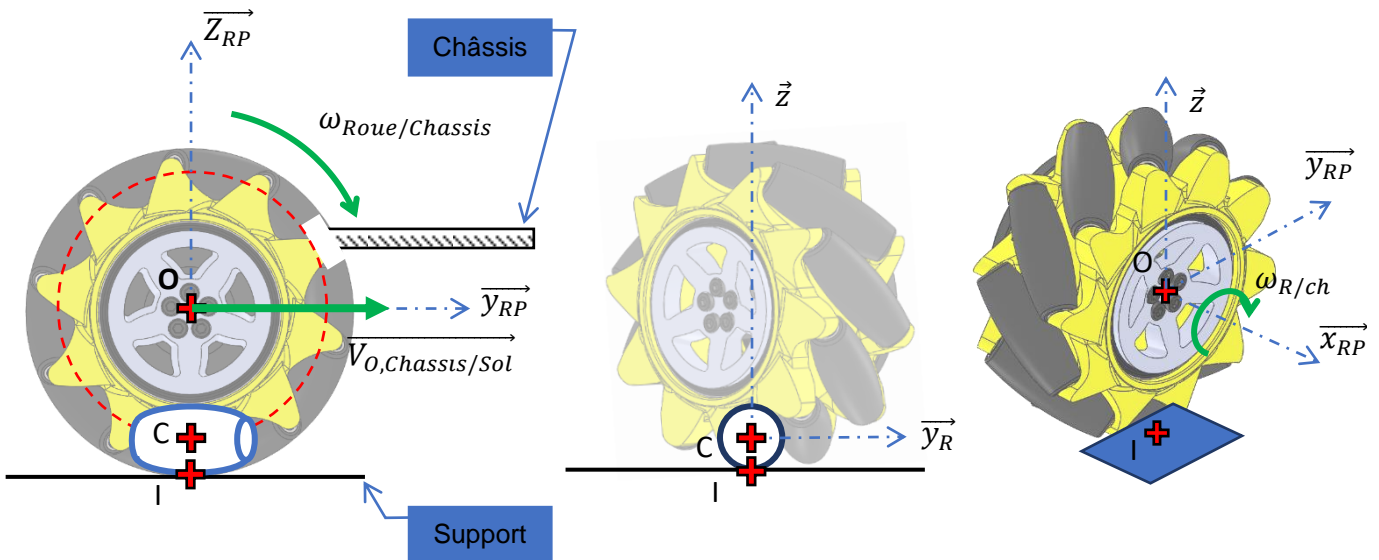


**Chaîne d'information et chaîne de puissance du robot de surveillance**

**Question B.3 :** Etablir par des flèches de même type, sur les six autres figures, les sens de rotation des roues pour les autres mouvements de translation et de rotation (axe de lacet) du Robot Printer.

<p>Marche Avant</p> 	<p>Marche Arrière</p> <p>2</p> 
<p>Déplacement à gauche</p> <p>3</p> 	<p>Déplacement à droite</p> 
<p>Déplacement oblique gauche</p> <p>5</p> 	<p>Déplacement oblique droite</p> <p>6</p> 
<p>Rotation autour de G</p> <p>7</p> 	<p>Rotation autour au centre de l'essieu arrière</p> <p>8</p> 

**Question C1.1 :** Représenter, sans échelle particulière, sur la vue de côté du robot (dans le plan  $(0, \vec{y}_{RP}, \vec{z}_{RP})$ ), le vecteur vitesse du point O du châssis par rapport au support  $\vec{V}_{O,RP/S}$ .



Donner l'expression, dans la base  $B_S$  du plan support S, du torseur cinématique en O (centre de la roue) du châssis par rapport au support en fonction de la vitesse d'avance du Robot Printer.

$$\{v_{RP/Sol}\} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & v \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_S$$

**Question C1.2 :** A partir des hypothèses on peut établir que  $\vec{V}_{I,Ga/S} = \vec{0}$  ; justifier pourquoi.

$\vec{V}_{I,Ga/S} = \vec{0}$  car au point I entre le galet et le support on a fait l'hypothèse d'adhérence, c'est-à-dire de roulement sans glissement.

**Question C1.3 :** Établir la relation de composition entre  $\vec{V}_{I,Ga/J}$  et  $\vec{V}_{I,J/S}$ .

$$\vec{V}_{I,Ga/S} = \vec{V}_{I,Ga/J} + \vec{V}_{I,J/S}$$

En utilisant la réponse à la question C1.2., établir que  $\vec{V}_{I,Ga/J} = -\vec{V}_{I,J/S}$ .

$$\vec{V}_{I,Ga/S} = \vec{0} = \vec{V}_{I,Ga/J} + \vec{V}_{I,J/S} \quad \text{d'où } \vec{V}_{I,Ga/J} = -\vec{V}_{I,J/S}$$

**Question C1.4 :** Donner l'expression des composantes du torseur cinématique en C du galet Ga par rapport à la Jante J dans la base liée  $B_{Ga}$  au galet.

$$\{v_{Ga/J}\} = \begin{Bmatrix} \omega_{Ga} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{Ga}$$



**Question C1.5 :: Déterminer** alors l'expression de  $\overrightarrow{V_{I,Ga/J}}$  dans la base  $B_{RP}$  en fonction de  $\omega_{Ga/J}$ , de  $\alpha$  et de  $r$ .

$$\begin{aligned}\overrightarrow{V_{I,Ga/J}} &= \overrightarrow{V_{C,Ga/J}} + \overrightarrow{IC} \wedge \overrightarrow{\Omega_{Ga/J}} \\ &= \vec{0} + (r) \cdot \vec{z} \wedge \omega_{Ga} \cdot \overrightarrow{x_{RP}} \\ &= r \cdot \omega_{Ga} \cdot \overrightarrow{y_{Ga}} \\ &= r \cdot \omega_{Ga} \cdot (-\sin \alpha \cdot \overrightarrow{x_{RP}} + \cos \alpha \cdot \overrightarrow{y_{RP}})\end{aligned}$$

**Question C1.6 :** Établir la relation entre  $\overrightarrow{V_{O,J/S}}$  et  $\overrightarrow{V_{O,RP/S}}$  en utilisant la composition des vitesses.

$$\overrightarrow{V_{O,J/RP}} = \overrightarrow{V_{O,J/S}} + \overrightarrow{V_{O,S/RP}}$$

Un des termes de cette relation est nul, **justifier** pourquoi.

$\overrightarrow{V_{O,J/RP}} = \vec{0}$  car O appartient à l'axe de rotation entre la jante et le robot printer

**En déduire** la relation entre  $\overrightarrow{V_{O,J/S}}$  et  $\overrightarrow{V_{O,RP/S}}$ .

donc  $\overrightarrow{V_{O,J/S}} = \overrightarrow{V_{O,RP/S}}$

**Question C1.7 :** Établir la relation entre  $\overrightarrow{\Omega_{J/RP}}$  et  $\overrightarrow{\Omega_{J/S}}$  en utilisant la composition des vitesses.

$$\overrightarrow{\Omega_{J/RP}} = \overrightarrow{\Omega_{J/S}} + \overrightarrow{\Omega_{S/RP}}$$

Un des termes de cette relation est nul, **justifier** pourquoi.

$\overrightarrow{\Omega_{S/RP}} = \vec{0}$  car le Robot Printer est en translation

**En déduire** l'expression de  $\overrightarrow{\Omega_{J/S}}$  en fonction  $\omega_{mot}$ .

donc  $\overrightarrow{\Omega_{J/RP}} = \overrightarrow{\Omega_{J/S}} = \omega_{mot} \overrightarrow{x_{RP}}$

**Question C1.8 :** Déterminer alors l'expression de  $\overrightarrow{V_{I,J/S}}$  dans la base  $B_{RP}$ , lorsque le robot est en translation selon l'axe  $\overrightarrow{y_{RP}}$ , en fonction de  $v$  de  $D$  et de  $\omega_{mot}$ .

$$\begin{aligned}\overrightarrow{V_{I,J/S}} &= \overrightarrow{V_{O,J/S}} + \overrightarrow{IO} \wedge \overrightarrow{\Omega_{J/S}} \\ &= \overrightarrow{V_{O,RP/S}} + \overrightarrow{IO} \wedge \overrightarrow{\Omega_{J/RP}} \\ &= v \cdot \overrightarrow{y_{RP}} + \frac{D}{2} \cdot \vec{z} \wedge \omega_{mot} \cdot \overrightarrow{x_{RP}} \\ &= \left( v + \frac{D}{2} \cdot \omega_{mot} \right) \cdot \overrightarrow{y_{RP}}\end{aligned}$$

**Question C1.9 :** En partant de la relation établie à la question C1.3 et en utilisant les expressions trouvées aux questions C1.5 et C1.8, **déterminer** par projection dans la base  $B_{RP}$  deux équations scalaires entre les paramètres  $\omega_{Ga}$ ,  $\omega_{mot}$ ,  $\alpha$ ,  $v$ ,  $r$  et  $D$ .

Équations vectorielles	Équations scalaires :
$\overrightarrow{V_{I,Ga/S}} = \overrightarrow{V_{I,Ga/J}} + \overrightarrow{V_{I,J/S}} = \vec{0}$	$\overrightarrow{x_{RP}} / \quad r \cdot \omega_{Ga} \cdot \sin \alpha = 0$
$\overrightarrow{V_{I,Ga/J}} = r \cdot \omega_{Ga} \cdot (-\sin \alpha \cdot \overrightarrow{x_{RP}} + \cos \alpha \cdot \overrightarrow{y_{RP}})$	$\overrightarrow{y_{RP}} / \quad v + \frac{D}{2} \cdot \omega_{mot} + r \cdot \omega_{Ga} \cdot \cos \alpha = 0$
$\overrightarrow{V_{I,J/S}} = \left( v + \frac{D}{2} \cdot \omega_{mot} \right) \cdot \overrightarrow{y_{RP}}$	

**Question C1.10 :** En **déduire** la valeur de  $\omega_{Ga}$  et une relation scalaire entre  $v$ ,  $D$  et  $\omega_{mot}$ .

De  $r \cdot \omega_{Ga} \cdot \sin \alpha = 0$  on tire que  $\omega_{Ga} = 0$

De  $v + \frac{D}{2} \cdot \omega_{mot} \cdot -r \cdot \omega_{Ga} \cdot \cos \alpha = 0$  on en déduit  $v = -\frac{D}{2} \cdot \omega_{mot}$

**Question C1.11** Lorsque le robot est en translation selon l'axe  $\vec{x}_{RP}$ , **déterminer** ce que devient la relation trouvée à la question C.1.8 ?

$$\begin{aligned} \vec{V}_{I,J/S} &= \vec{V}_{O,RP/S} + \vec{IO} \wedge \vec{\Omega}_{J/JP} \\ &= v \cdot \vec{x}_{RP} + \frac{D}{2} \cdot \omega_{mot} \cdot \vec{y}_{RP} \end{aligned}$$

En **déduire** le nouveau système d'équations scalaires entre les paramètres  $\omega_{Ga}$ ,  $\omega_{mot}$ ,  $\alpha$ ,  $v$ ,  $r$  et  $D$ .

$\vec{x}_{RP} / v - r \cdot \omega_{Ga} \cdot \sin \alpha = 0$  **1**

$\vec{y}_{RP} / \frac{D}{2} \cdot \omega_{mot} + r \cdot \omega_{Ga} \cdot \cos \alpha = 0$  **2**

La valeur de  $\omega_{Ga}$  est elle nulle ? Justifier votre réponse

A partir de l'équation 2 on peut déduire que si  $\omega_{mot}$  est non nul, alors  $\omega_{Ga}$  est non nul (constat : le galet tourne sur son axe lors du déplacement latéral).

**Déduire** de ces équations et de la valeur de  $\alpha$  une relation entre  $v$ ,  $D$  et  $\omega_{mot}$ .

$\alpha = 45^\circ$  induit que  $\sin \alpha = \cos \alpha$

On en déduit que  $r \cdot \omega_{Ga} = v = -\frac{D}{2} \cdot \omega_{mot}$  on retrouve  $v = -\frac{D}{2} \cdot \omega_{mot}$  comme pour le mouvement d'avance du RP.

Conclure quant à l'intérêt pour la commande de déplacement du Robot Printer de la présence des galets dans la roue Mecanum.

Les galets permettent au robot de se déplacer latéralement en conservant le même axe de rotation des roues. Les lois de commande de déplacement sont identiques. Avec une même commande de rotation des moteurs, on est capable de se déplacer de l'avant vers l'arrière ou de droite à gauche.

On peut donc composer les mouvements pour obtenir un déplacement quelconque du robot sur le plan support S.

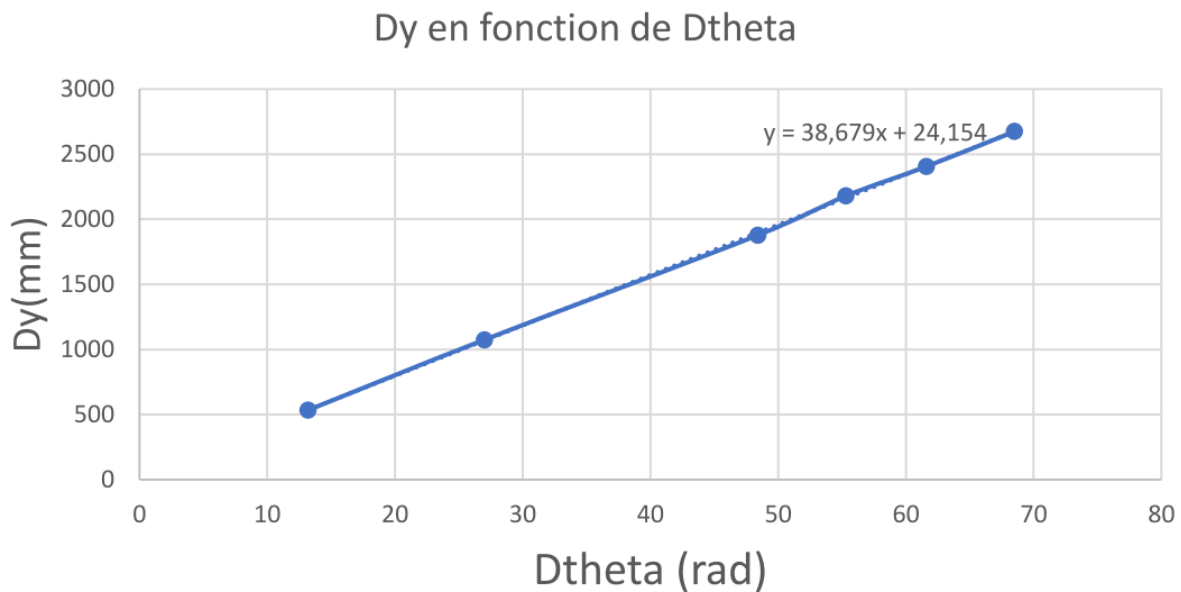
**Question C1.12 :** A partir de relevés effectués sur les courbes de la figure C4, **compléter** le tableau ci-dessous. **Tracer** la courbe représentant l'évolution réelle du déplacement  $\Delta y$  en fonction de l'angle de rotation des roues  $\Delta \theta$ .

Durée de l'essai $\Delta t$ (s)	Déplacement du RP durant l'essai $\Delta y$ (expérimental) (mm)	Rotation des roues du RP durant l'essai	
		$\Delta \theta$ (tours)	$\Delta \theta$ (rad)
3	534	2,1	13,2
5	1074	4,3	27
8	1877	<b>7,7</b>	<b>48,4</b>
9	2179	8,8	55,3
10	2405	9,8	61,6
11	2674	<b>10,9</b>	<b>68,5</b>

(relevé par pointeur laser) (relevé par les codeurs)



## Courbe de variation de distance parcourue en fonction de l'angle de rotation des roues



Déterminer le coefficient directeur de l'approximation affine à la courbe d'évolution du déplacement.

$$\frac{D}{2} = \frac{|\Delta y|}{|\Delta \theta|} = \frac{2674 - 534}{68,5 - 13,2} = \frac{2140}{55,3} = 38,68 \text{ mm}$$

Commenter la valeur obtenue

La valeur obtenue est proche du rayon de la roue, la relation théorique, est donc proche de la relation obtenue par mesure.

**Question C1.13 :** Etablir l'expression de la consigne de rotation  $\Delta\theta_c^{av}$  permettant de déplacer le robot de  $\Delta y_c^{av}$  vers l'avant. On précisera les unités dans l'expression.

$$\Delta\theta_c^{av} = \frac{\Delta y_c^{av}}{R_{moy}} = \frac{\Delta y_c^{av}}{38,68} \text{ où } \Delta y_c^{av} \text{ en mm et } \Delta\theta_c^{av} \text{ en radians.}$$

**Expliquer** ce qu'il reste à vérifier pour répondre à l'objectif de cette partie.

On a vérifié expérimentalement la loi de commande en translation vers l'avant et l'arrière.

Il resterait à déterminer expérimentalement la relation pour un mouvement de translation latérale.

Compte tenu de la différence de mouvement des galets entre le mouvement longitudinal et le mouvement latéral (rotation des galets sur leur axe propre), la loi de commande expérimentale peut être légèrement différente.

**Question C2.1 :** Dresser le bilan des actions mécaniques extérieures exercées sur le robot printer RP sous forme de torseurs.

$$\{\mathfrak{S}_{\text{Poids/BaseMobile}}\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -m_{BM} \cdot g \\ 0 \end{Bmatrix}_R \quad \{\mathfrak{S}_{\text{Poids/Bobine}}\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -m_{Bob} \cdot g \\ 0 \end{Bmatrix}_R$$

$$\{\mathfrak{S}_{\text{Poids/Tete}}\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -m_{Tet} \cdot g \\ 0 \end{Bmatrix}_R \quad \{\mathfrak{S}_{\text{Sol/RouesAV}}\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ A_Y \\ A_Z = +m_{Total} \cdot g \\ 0 \end{Bmatrix}_R \quad A_Y < 0$$

**Question C2.2 :** A partir des positions des points  $G_{Bob}$ ,  $G_{BM}$  et  $G_{Tet}$ , **déterminer** l'expression analytique du moment en A de chaque action mécanique.

	Sur $\vec{y}_{RP}$ (mm)	Sur $\vec{z}_{RP}$ (mm)	Masse (kg)	
C	0	40		$\begin{aligned} \vec{M}_{A, P_{Bob}} &= \vec{M}_{G_{Bob}, P_{Bob}} + \vec{A}G_{Bob} \wedge \vec{P}_{Bob} \\ &= \vec{0} - (-100 \cdot \vec{y}_{RP} + 190 \cdot \vec{z}_{RP}) \wedge m_{Bob} \cdot g \cdot \vec{z}_{RP} \\ &= 100 \cdot m_{Bob} \cdot g \cdot \vec{x}_{RP} \end{aligned}$
$G_{BM}$	- 50	70	$m_{BM} = 1,3$	$\begin{aligned} \vec{M}_{A, P_{BM}} &= \vec{M}_{G_{BM}, P_{BM}} + \vec{A}G_{BM} \wedge \vec{P}_{BM} \\ &= \vec{0} - (-50 \cdot \vec{y}_{RP} + 70 \cdot \vec{z}_{RP}) \wedge m_{BM} \cdot g \cdot \vec{z}_{RP} \\ &= 50 \cdot m_{BM} \cdot g \cdot \vec{x}_{RP} \end{aligned}$
$G_{Bob}$	- 100	190	$m_{Bob} = 1,3$	
$G_{Tet}$	60	200	$m_{Tet} = 1,8$	$\begin{aligned} \vec{M}_{A, P_{Tet}} &= \vec{M}_{G_{Tet}, P_{Tet}} + \vec{A}G_{Tet} \wedge \vec{P}_{Tet} \\ &= \vec{0} - (60 \cdot \vec{y}_{RP} + 200 \cdot \vec{z}_{RP}) \wedge m_{Tet} \cdot g \cdot \vec{z}_{RP} \\ &= -60 \cdot m_{Tet} \cdot g \cdot \vec{x}_{RP} \end{aligned}$

**Question C.2.3 :** Déterminer l'expression du moment dynamique  $\overrightarrow{\delta}_{A,RP/S}$  dans la base  $B_{RP}(\vec{x}_{RP}, \vec{y}_{RP}, \vec{z}_{RP})$  en fonction de l'accélération  $a$  et des grandeurs caractéristiques du Robot Printer

Au moment de l'étude du basculement, A est un point fixe du RP, donc :

$$\begin{aligned} \overrightarrow{\delta}_{A,RP/S} &= \vec{A}G_{BM} \wedge m_{BM} \cdot \vec{a} + \vec{A}G_{Tet} \wedge m_{Tet} \cdot \vec{a} + \vec{A}G_{Bob} \wedge m_{Bob} \cdot \vec{a} \\ \overrightarrow{\delta}_{A,RP/S} &= (-50 \cdot \vec{y}_{RP} + 70 \cdot \vec{z}_{RP}) \wedge m_{BM} \cdot a \cdot \vec{y}_{RP} + (60 \cdot \vec{y}_{RP} + 200 \cdot \vec{z}_{RP}) \wedge m_{Tet} \cdot a \cdot \vec{y}_{RP} \\ &\quad + (-100 \cdot \vec{y}_{RP} + 190 \cdot \vec{z}_{RP}) \wedge m_{Bob} \cdot a \cdot \vec{y}_{RP} \end{aligned}$$

$$\overrightarrow{\delta}_{A,RP/S} = 70 \cdot m_{BM} \cdot a \cdot \vec{x}_{RP} + 200 \cdot m_{Tet} \cdot a \cdot \vec{x}_{RP} + 190 \cdot m_{Bob} \cdot a \cdot \vec{x}_{RP}$$

$$\overrightarrow{\delta}_{A,RP/S} = (70 \cdot m_{BM} + 200 \cdot m_{Tet} + 190 \cdot m_{Bob}) \cdot a \cdot \vec{x}_{RP}$$

**Question C.2.4 :** Appliquer le Théorème du Moment Dynamique réduit en A, en projection sur  $\vec{x}_S$ .

$$\begin{aligned} \vec{M}_{A, P_{Bob}} + \vec{M}_{A, P_{BM}} + \vec{M}_{A, P_{Tet}} &= \overrightarrow{\delta}_{A,RP/S} \\ (100 \cdot m_{Bob} + 50 \cdot m_{BM} + 60 \cdot m_{Tet}) \cdot g \cdot \vec{x}_{RP} &= (70 \cdot m_{BM} + 200 \cdot m_{Tet} + 190 \cdot m_{Bob}) \cdot a \cdot \vec{x}_{RP} \\ (100 \cdot m_{Bob} + 50 \cdot m_{BM} + 60 \cdot m_{Tet}) \cdot g &= (70 \cdot m_{BM} + 200 \cdot m_{Tet} + 190 \cdot m_{Bob}) \cdot a \end{aligned}$$

**Déterminer** alors la valeur numérique de la décélération  $\|\vec{a}\|$  permettant d'éviter le basculement du robot printer RP par rapport au plan support S.

Application numérique :	Résultat :
$a = \frac{(100 \cdot m_{Bob} + 50 \cdot m_{BM} + 60 \cdot m_{Tet}) \cdot g}{(70 \cdot m_{BM} + 200 \cdot m_{Tet} + 190 \cdot m_{Bob})} = \frac{(100 \times 1,3 + 50 \times 1,3 + 60 \times 1,8) \times 9,81}{(70 \times 1,3 + 200 \times 1,8 + 190 \times 1,3)}$ $a = 4,26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$	

**Établir**, en le justifiant, si cette valeur est compatible avec l'exigence Id= "1.1.5".

La valeur calculée est compatible avec l'exigence id1.1.5. car  $a > 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  ce qui veut dire que le robot Printer peut se déplacer à sa valeur d'accélération  $a_{\max}$  sans risque de basculer.

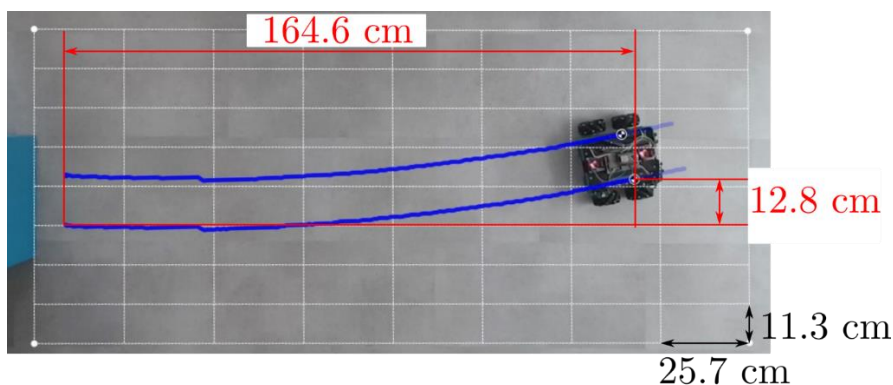
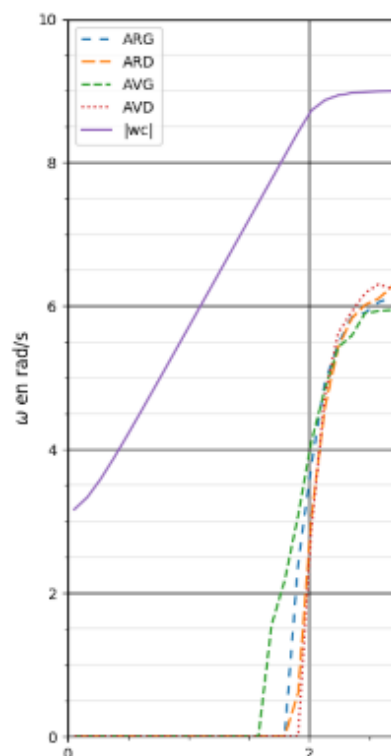
Sur les visualisations, on constate qu'au démarrage, le robot a tendance à partir sur la droite, puis de s'écarter vers la gauche.

**Question D1 :** Décrire ce qui permet, sur les courbes, de retrouver ce comportement.

Sur la figure de vitesses,

- Entre les instants  $t = 1,6 \text{ s}$  et  $t = 2,0 \text{ s}$ , on constate que les vitesses des **roues AVG et ARG sont plus élevées que celles des roues AVD et ARD**. Les vitesses étant plus élevées à gauche qu'à droite, le véhicule a tendance à aller **vers la droite**.
- Ensuite les **roues droites tournent plus vite**, le robot se dirige ensuite **vers la gauche**.

**Question D2 :** Par un tracé sur la figure du document réponse, déterminer l'écart (absolu) maximal entre la trajectoire visée et la trajectoire obtenue.



On observe un écart absolu maximal de **12,8 cm**.

**En déduire** l'écart relatif et **conclure** quant au respect de l'exigence Id= "1.1.3.1"

Pour comparer à l'exigence, il est nécessaire de calculer l'écart relatif qui est alors

$$\frac{12,8}{164,6} \times 100 = 7,8\%$$

Cet écart est très largement supérieur à la limite de **0,05%** fixée par l'exigence 1.1.3.1. **L'exigence 1.1.3.1 n'est pas respectée.**

**Question D3 :** A partir de la figure du document **DT6a**, **déterminer** (en pourcentage de la consigne) la valeur moyenne de l'erreur en régime permanent commise sur la vitesse des roues.

Cette erreur est-elle la même pour toutes les roues ?

**Décrire** ce qu'il faut vérifier en priorité pour respecter l'exigence **Id= "1.1.3.1"** : une erreur faible vis-à-vis de la consigne ou une erreur identique pour toutes les roues ?

$$\text{Erreur relative} = \frac{(\text{consigne} - \text{vitesse})}{\text{consigne}} \times 100$$

Roue	AVD	AVG	ARD	ARG
Consigne (rad/s)	9			
Vitesse en régime permanent	6.4	6.2	6.4	6.2
Erreur relative (%)	28.9	31.1	28.9	31.14

Comme on l'a vu à la question D1, c'est la différence de vitesse entre les roues qui a tendance à faire tourner le robot. Un écart de vitesse par rapport à la consigne identique pour toutes les roues se traduirait par une distance parcourue plus faible ou plus grande que prévue, mais c'est sans rapport avec l'exigence 1.1.3.1.

Pour vérifier l'exigence 1.1.3.1, la priorité est d'obtenir des **vitesse identiques pour toutes les roues**.

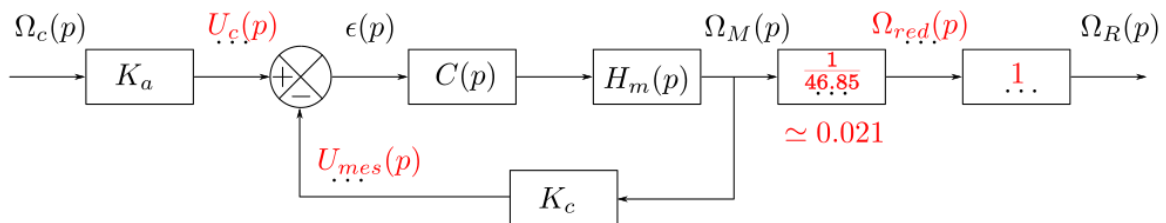
**Question D4 :** **Compléter** les pointillés en indiquant les variables manquantes.

En utilisant le document technique DT3, **établir** la relation entre la vitesse du moteur  $\omega_m(t)$  et la vitesse en sortie du réducteur  $\omega_{red}(t)$ . **En déduire** la valeur du gain  $K_{red}$ .

**Établir** la relation entre la vitesse en sortie du réducteur  $\omega_{red}(t)$  et la vitesse des roues  $\omega_R(t)$ .

**Compléter** alors le schéma bloc en ajoutant les fonctions de transfert manquantes.

L'accouplement réalise une liaison complète entre la roue et l'arbre de sortie du réducteur : le gain correspondant est alors unitaire.



Détermination du gain  $K_{red}$ .

D'après le document technique  $K_{red} = \frac{1}{46.85} \sim 0.021$ .

$$K_{accouplement} = 1$$

**Question D5 :** **Exprimer**  $U_c(p)$  en fonction de  $\Omega_c(p)$ ,  $K_a$  puis  $U_{mes}(p)$  en fonction de  $\Omega_R(p)$ ,  $K_c$  et  $K_{red}$ .

**En déduire**  $\epsilon(p)$  en fonction de  $K_a, K_c, K_{red}$  et  $\Omega_c(p)$  lorsque  $\Omega_R(p) = \Omega_c(p)$ .

**Déterminer** la valeur à choisir pour  $K_a$  ?

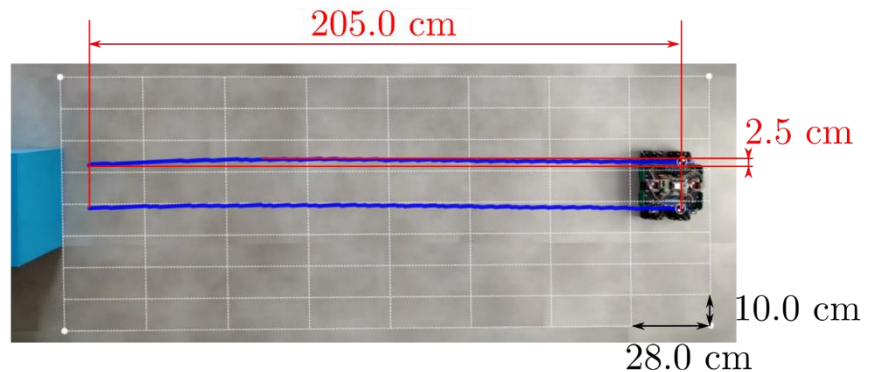
$$U_c = K_a \times \Omega_c \quad \text{et} \quad U_{mes} = \frac{K_c}{K_{red}} \times \Omega_R(p). \quad \text{Or } \epsilon = U_c - U_{mes}$$

$$\text{donc pour } \Omega_R = \Omega_c, \text{ on a } \epsilon = \left( K_a - \frac{K_c}{K_{red}} \right) \Omega_c(p).$$

Ainsi pour respecter la condition donnée on doit respecter la condition  $K_a = \frac{K_c}{K_{red}}$ .

**Question D6 :** L'asservissement en vitesse a-t-il permis d'améliorer le comportement du robot ?  
 Par un relevé sur la figure du document réponse, **déterminer l'écart (absolu) maximal** entre la trajectoire visée et la trajectoire obtenue.  
**En déduire** l'écart relatif et **conclure** quant au respect de l'exigence Id= "1.1.3.1".

On constate sur la séquence que la trajectoire est beaucoup plus proche d'une translation rectiligne. **L'asservissement en vitesse**, en permettant d'obtenir des vitesses de roues très proches les unes des autres, **a permis d'améliorer le comportement du robot.**



**L'écart maximal absolu est de 2,5 cm.**

**Sur la longueur totale de déplacement cela correspond à  $\frac{2,5}{205,0} \times 100 = 1,2\%$ .**

**Cet écart relatif est supérieur à 0.05%, l'exigence « Id 1.1.3.1 » n'est donc pas respectée.**

**Question D7 :** En comparant les courbes de vitesses et positions obtenues pour la commande en boucle ouverte (DT6a) et celles obtenues en boucle fermée ouverte (DT6b), **expliquer** les améliorations apportées par l'asservissement en vitesse.

On constate une bien meilleure précision en vitesse.

Les quatre courbes de vitesses sont en moyenne centrées sur la consigne.

Ceci doit permettre un bien meilleur respect de la trajectoire rectiligne.

Les quatre courbes de positions sont presque superposées alors que des écarts sont nettement visibles sur la courbe E3.

Ces observations sont conformes à celles observées directement sur la trajectoire.

**Question D8 :** Commenter les courbes ci-dessous pour  $t \in [0; 1s]$ .

**Établir** l'effet de ce défaut sur la trajectoire ?

**Établir** si la précision en régime permanent de cet asservissement de vitesse peut compenser ce défaut.

**Conclure** sur la possibilité de se contenter du seul asservissement en vitesse des roues pour répondre à l'exigence Id= "1.1.3.1"?



Au tout début du mouvement, on voit **des pics de vitesse**. On peut remarquer que les **quatre roues ont des pics d'amplitudes différentes**.

L'effet est que ces pics peuvent induire une **rotation du robot**. Une fois cette rotation installée, si les quatre vitesses sont identiques, le robot continuera en ligne droite, mais en s'éloignant de sa trajectoire initiale.

La précision en régime permanent qui permet d'égaliser les vitesses de rotation des 4 roues ne **peut donc pas compenser ce défaut d'orientation en début de course**.

Un simple asservissement de vitesse ne **permettra donc pas de répondre à l'exigence « Id 1.1.3.1 »** indiquant que l'écart de position du robot entre la trajectoire réelle et la trajectoire de consigne ne doit pas dépasser 0,05 %.

## E- ACQUISITION ET GESTION DES DONNEES

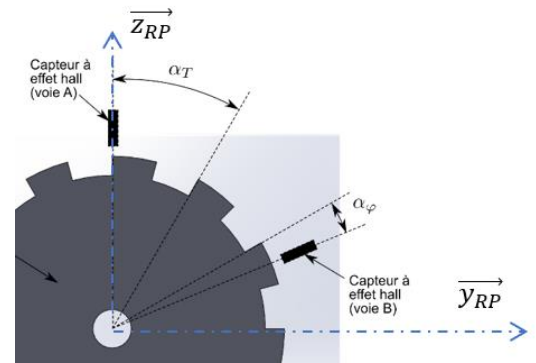
**Question E1 :** En utilisant le document DT3 et la figure F1, déterminer les valeurs numériques en degrés des angles  $\alpha_T$  et  $\alpha_\varphi$ .

Pour un tour de moteur, avec les deux voies, il y a 48 fronts (montant et descendants) soit 24 fronts par voie donc 12 fronts montant et 12 fronts descendant par tour  $\rightarrow \alpha_T = \frac{360}{12}$  soit  $\alpha_T = 30^\circ$

Autre solution : Il y a 12 secteurs sur le disque de codage  $\alpha_T = \frac{360}{12}$  soit  $\alpha_T = 30^\circ$

L'angle  $\alpha_\varphi$  permet le déphasage des deux signaux d'un quart de période :  $\alpha_\varphi = \frac{\alpha_T}{4}$  soit  $\alpha_\varphi = 7,5^\circ$ .

**Question E2** Dans le cas du relevé d'oscilloscope du document DT3, **déterminer** le sens de rotation (le sens positif est celui du sens trigonométrique sur la figure E1).



Le capteur de la voie A renvoie un front descendant avant le capteur voie B.

On tourne donc dans le sens **Négatif**.

**Question E3 :** A l'aide de tracés effectués sur le relevé d'oscilloscope ci-dessous, **déterminer** la vitesse de rotation du moteur (en tours par minute).

Avec une période  $T = 535 \mu s$ , la vitesse

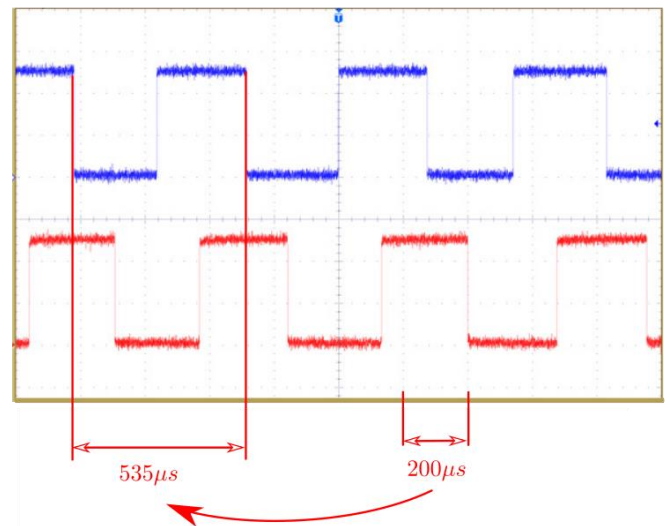
$$\text{est } \omega = \frac{\alpha_T}{T} = \frac{30}{535 \times 10^{-6}} = 56075^\circ/s \quad \text{Voie A}$$

$$\text{Soit } N_m = 9346 \text{ tr/min.}$$

Avec un rapport de réduction de 1/46,85 on a à la roue une vitesse

$$N_r = 199,5 \text{ tr/min.}$$

Voie B



**Question E4 :** Établir le calcul de la vitesse de rotation du moteur en tours par minute puis la vitesse de la roue en tours par minute. Le résultat sera exprimé en fonction des variables « compteur » et « delta\_t » et des valeurs numériques utiles (nombre de tops par tour, rapport de réduction).

Le signal du codeur émet 48 tops par tour de moteur.

Au bout de  $\Delta t$ , le nombre de tops est la valeur de la variable compteur.

Le moteur a tourné de compteur / 48 tours en  $\Delta t$ .

Sa vitesse (en tours par seconde) est  $\omega_m = \text{compteur} / (48 \times \text{delta}_t)$

Soit en tours par minute :  $\omega_m = 60 \times \text{compteur} / (48 \times \text{delta}_t)$ .

On en déduit la vitesse à la roue grâce au rapport de réduction  $\text{red} = 1/46,85$

$$\text{Soit } \omega_r = \frac{60 \times \text{compteur}}{48 \times 46,85 \times \text{delta}_t}$$

Pour réduire le nombre d'opération on calcule la constante :  $60 / (48 \times 46,85) = 0,026681$

$$\omega_r = \frac{0,026681 \times \text{compteur}}{\text{delta}_t}$$



**Compléter** l'instruction de la fonction python « calculerVitesse() » calculant la vitesse de rotation de la roue en tours par minute et affectant cette valeur à « *omega\_r* ».

```
Omega_r=0.026681*compteur/delta_t
```

**Question E5 : Déterminer** l'espace mémoire nécessaire au stockage de l'ensemble des données pendant un essai, en supposant que toutes les données calculées sont conservées en mémoire. Est-il possible de mener un essai complet en conservant toutes ces données en mémoire RAM ?

Il y a  $f_v$  calculs de vitesses par seconde et un essai dure  $t_{essai}$  secondes :

Il y a donc  $f_v \times t_{essai} = 40 \times 30 = 1\ 200$  échantillons à stocker pendant un essai.

Chaque échantillon représente 13 valeurs de type float (4 vitesses, 4 positions, 4 vitesses de consigne et le temps) plus 4 caractères de signe (1 octet) soit **108 octets par échantillon**.

**L'espace mémoire nécessaire est donc  $1\ 200 \times 108 = 129\ 600$  octets.**

**On dispose de  $0,2 \times 512\ 000 = 102\ 400$  octets**

**Il manque environ 27 200 octets pour enregistrer un essai complet.**

**Question E6 :** Sachant que la transmission entre le moteur et le sol est irréversible, **indiquer** la donnée qui peut être supprimée des données stockées ?

Puisque la transmission est irréversible, le sens de rotation du moteur ne peut pas être modifié autrement que par la consigne qui lui est envoyée. Il est donc **inutile de faire calculer le sens de rotation** qui est forcément connu pendant le fonctionnement, puisque décidé par le microcontrôleur.

**Question E7 : Compléter** les lignes 2, 7 et 9 de la fonction « stockerDonnees() ». **Rédiger** un bref commentaire python décrivant ce qui est fait aux lignes 7 et 9.

```
1. def stockerDonnees() :
2.     if countSave == N :                               # cas où on doit faire une sauvegarde
3.         temps.append(t)
4.         vitesse.append(omega_r)
5.         position.append(theta_r)
6.         consigne.append(omega_c)
7.         return 1                                     # on réinitialise countSave
8.     else :                                           # cas où on ne sauvegarde pas
9.         return countSave+1                           # on incrémente countSave
```

**Question E8 : Présenter** une autre stratégie possible afin de contourner le problème de stockage évoqué dans cette partie. **Exposer** la (ou les) éventuelle(s) difficulté(s) inhérente(s) à la solution proposée.

1 **Modifier la communication :** au lieu de stocker les données sur le robot, on peut choisir de **les transférer en temps réel sur le superviseur**.

Difficulté : le transfert étant réalisé en temps réel, il faut s'assurer que le temps pris pour la communication ne perturbe pas le fonctionnement de l'asservissement en vitesse des roues.

2 **Au lieu de stocker les vitesses et les positions, on peut se contenter de stocker seulement les vitesses.** Les positions pourront alors être obtenues ensuite par **intégration temporelle**.

Difficulté : aucune, l'intégration temporelle numérique est une opération facile à réaliser.

## F-ETUDE DE CONCEPTION

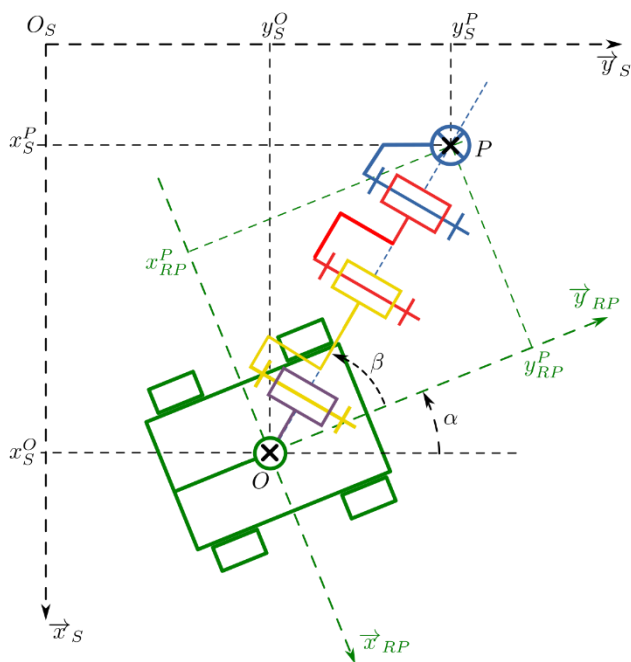
**Question F1.1** En utilisant les informations du document DT7, **estimer** l'erreur relative maximale commise sur la position pour chaque modèle de capteur.

**En déduire** l'erreur sur un déplacement de 200 mm.

**Conclure**, pour chaque capteur, quant à la possibilité de respecter l'exigence

Id= "1.1.2".

	PS/2	ADNS-9800
Erreur relative	$(130 - 124,59) / 130 = 0,042$ soit 4.2%	$(100 - 96,46) / 100 = 0,035$ soit 3,5%
Erreur après 200mm	$0,042 \times 200 = 8,4$ mm	$0,035 \times 200 = 7$ mm
Exigence	Erreur < 0,1 mm après 200 mm de course	
Conclusion	« 1.1.2 » impossible à respecter	



La mesure de la position du point P (centre de la buse) par rapport au sol, sera réalisée par un pointage vidéo sur un point de la tête d'impression.

On désigne ainsi par :

P : centre de la buse d'impression.

O : centre du châssis.

$(x_S^P, y_S^P)$  : coordonnées de P dans  $(O_S, \vec{x}_S, \vec{y}_S)$

$(x_{RP}^P, y_{RP}^P)$  : coordonnées de P dans  $(O, \vec{x}_{RP}, \vec{y}_{RP})$

$(x_S^O, y_S^O)$  : coordonnées de O dans  $(O_S, \vec{x}_S, \vec{y}_S)$

**Question F1.2 : Compléter** le tableau du cahier réponse en indiquant l'état du paramètre et son niveau de précision.

	Approche de la zone d'impression		Dépôt de fil	
	Etat Constant ou variable ? (c) (v)	Niveau de précision Faible ou Elevé ?	Etat Constant ou variable ? (c) (v)	Niveau de précision Faible ou Elevé ?
$(x_P^S, y_P^S)$	V Variable	Faible	Variable	Elevé
$(x_{RP}^P, y_{RP}^P)$	C Constant	Faible	Variable	Faible
$(x_O^S, y_O^S)$	V Variable	Faible	Constant	Faible
$\alpha$	V Variable	Faible	Constant	Faible
$\beta$	C Constant	Faible	Variable	Faible

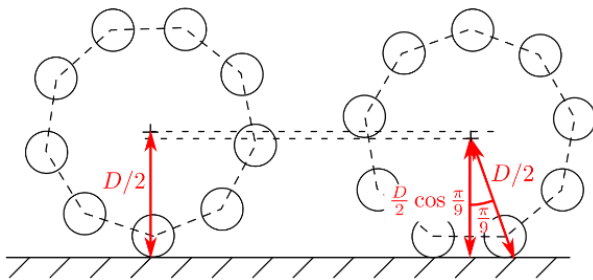
Commentaire et/ou explications :

- La phase d'approche ne requiert pas de précision importante, car elle ne sert qu'à positionner la buse dans une zone d'impression. Il ne s'agit que de résoudre un problème d'accessibilité.
- Pendant l'impression, la position de la buse étant mesurée directement par rapport au sol, c'est la seule grandeur qui implique une mesure d'une précision directement liée au cahier des charges.

**Question F1.3 :** En utilisant l'esquisse ci-dessous et les données sur les roues Mecanum **estimer** la variation maximale de hauteur du châssis par rapport au sol pendant le mouvement.

Pour mesurer la position du Robot Printer, indiquer s'il est alors envisageable d'utiliser un des capteurs de positions du DT7 ?

Si oui, **choisir** le capteur (PS/2 ou ADNS-9800) qui sera le mieux adapté.



La variation de hauteur maximale est de l'ordre de

$$\frac{D}{2} \left( 1 - \cos \frac{\pi}{9} \right) = 40 \times 0,06 = 2,4 \text{ mm}$$

**Cette hauteur est compatible seulement avec le capteur qui accepte 5 mm (ADNS-9800).**

**F2. Etude Géométrique (DR6 et DR7)**

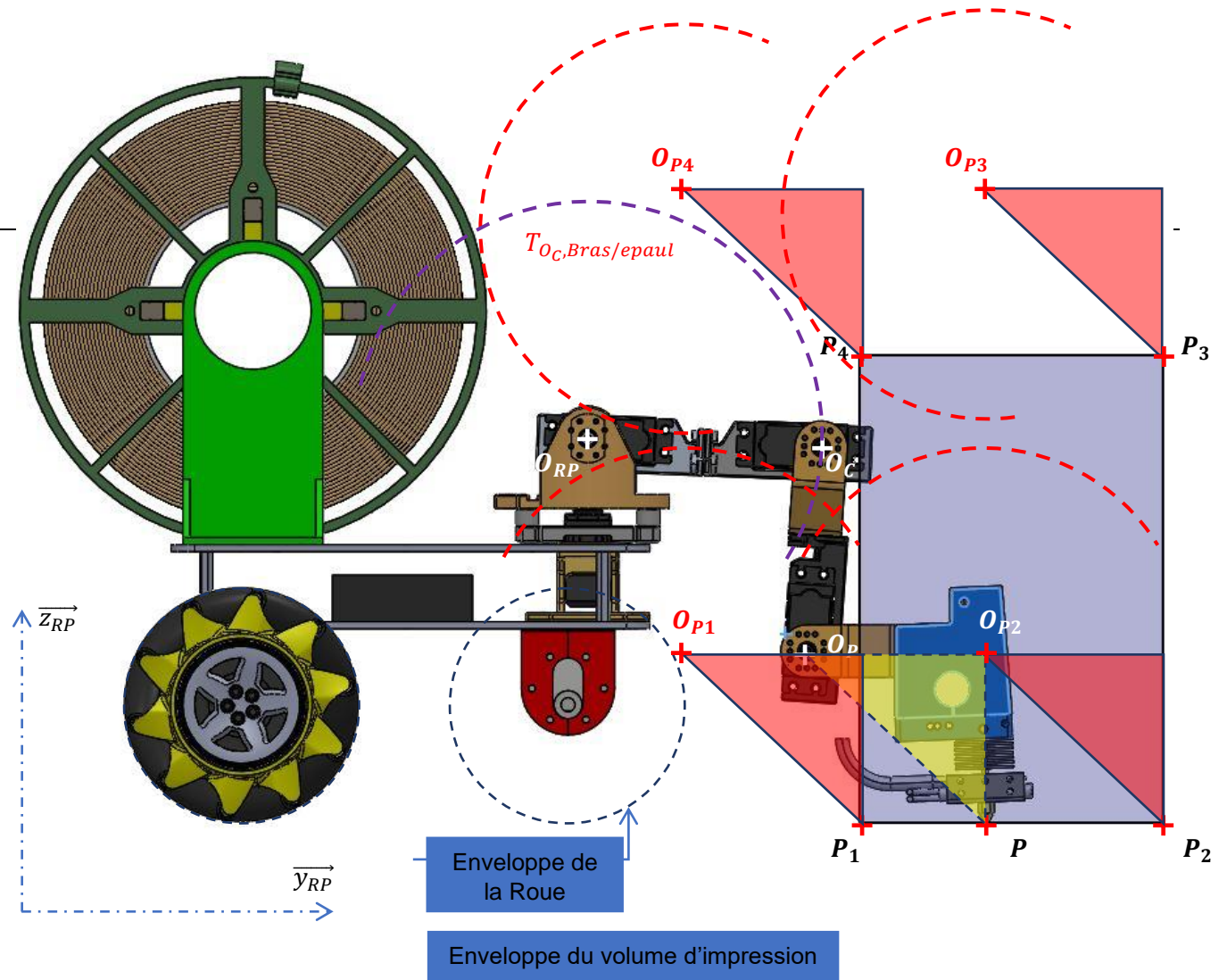
**Question F2.1 : Déterminer par un tracé les positions des points caractéristiques du bras permettant au bras d'atteindre les positions  $P_1$  à  $P_4$ .**

Conseils méthodologiques :

- Représenter la trajectoire  $T_{O_C, Bras/epaule}$  du point  $O_C$  du Bras dans son mouvement par rapport à l'Épaule.
- A partir des Points  $P_1$  à  $P_4$ , déterminer les positions des points  $O_{P1}$  à  $O_{P4}$
- Déterminer les positions des points  $O_{C1}$  à  $O_{C4}$

**Question F2.2 : Conclure** sur la capacité du bras à atteindre les points  $P_1$  à  $P_4$  du volume d'impression:

	Oui	Non
$P_1$	X	
$P_2$		X
$P_3$		X
$P_4$	X	



Détails (annexe corrigé F2.1)

