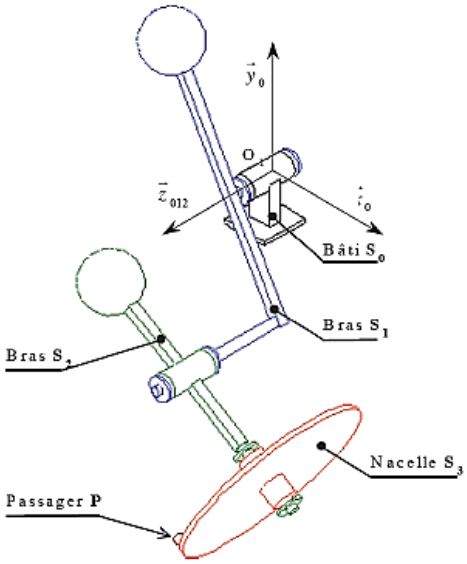
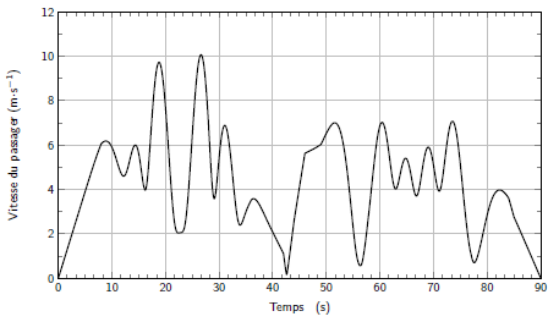
CINÉMATIQUE DU SOLIDE

PARTIE 2 : PERFORMANCES

TRAVAUX DIRIGÉS







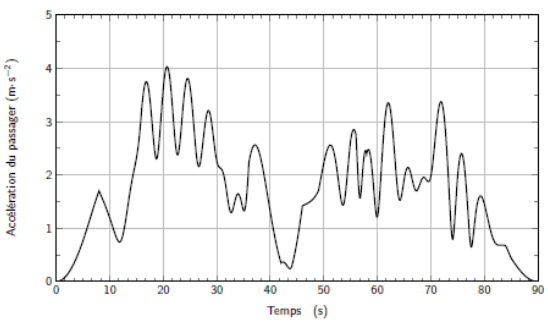
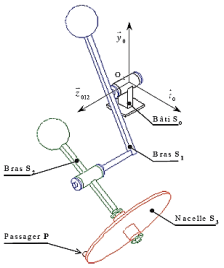


Table des matières

1. ÉCHELLE PIVOTANTE AUTOMATIQUE A COMMANDE SEQUENTIELLE 3
2. ETUDE CINEMATIQUE D'UNE CENTRIFUGEUSE DE LABORATOIRE 5
3. PLATEFORME SIX AXES 6
4. LOI EN TRAPEZE : TOURELLE REVOLVER 9
5. MANÈGE MAGIC ARM 10
6. POMPE A PISTONS RADIAUX 14
7. PIVOTEMENT DU ROBOT TROOPER 15
8. DETERMINATION DE LIAISONS EQUIVALENTES 17

<u>Illustration 1ère de couverture</u>
L'attraction foraine « Magic Arms » permet de procurer de fortes sensations à un public averti. Son modèle cinématique suivi d'une étude analytique, puis numérique permet de tracer les vitesses et accélérations subies par le passager (courbes), puis de quantifier/vérifier le niveau de sensations ressenties.

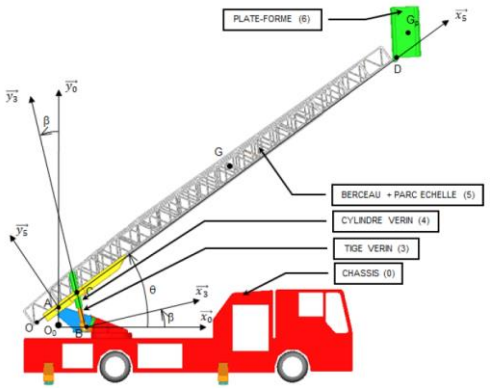


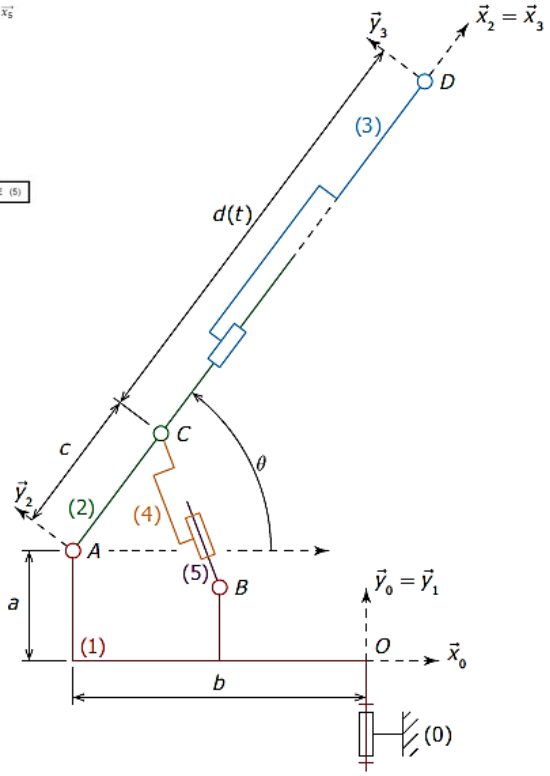
PARTIE 2 : PERFORMANCE CINÉMATIQUE DES MÉCANISMES

1. ÉCHELLE PIVOTANTE AUTOMATIQUE A COMMANDE SEQUENTIELLE

Objectif : vérifier le critère de vitesse maximale de la nacelle de l'échelle par rapport au sol lors de la phase de dressage.

On s'intéresse à une Échelle Pivotante Automatique à commande Séquentielle (E.P.A.S.) conçue et commercialisée par la société CAMIVA. Ce type d'échelle est monté sur le châssis d'un camion de pompiers et permet de déplacer une plate-forme pouvant supporter deux personnes et un brancard pour une charge totale maximale de 270 kg. Ce système est modélisé par le schéma cinématique de la figure ci-dessous.





Ce système est constitué de cinq solides :

- le châssis (0) auquel on associe le repère $R_0(O, \overrightarrow{x_0}, \overrightarrow{y_0}, \overrightarrow{z_0})$ fixe par rapport au sol ;

- la tourelle (1) à laquelle on associe le repère $R_1(O, \overrightarrow{x_1}, \overrightarrow{y_1}, \overrightarrow{z_1})$ en liaison pivot d'axe $(O, \overrightarrow{y_0})$ avec le châssis (0) tel que $\alpha = (\overrightarrow{z_0}, \overrightarrow{z_1})$;
- le berceau (2) auquel on associe le repère $R_2(O, \overrightarrow{x_2}, \overrightarrow{y_2}, \overrightarrow{z_2})$ en liaison pivot d'axe $(A, \overrightarrow{z_0})$ avec la tourelle (1) tel que $\theta = (\overrightarrow{x_1}, \overrightarrow{x_2})$ et $\overrightarrow{OA} = -b.\overrightarrow{x_1} + a.\overrightarrow{y_1}$ avec a=0,50m et b=2m. L'inclinaison maximale de l'échelle est de θ max = 60° ;
- l'échelle (3) à laquelle on associe le repère $R_3(O, \overrightarrow{x_3}, \overrightarrow{y_3}, \overrightarrow{z_3})$ en liaison glissière de direction $\overrightarrow{x_2}$ avec le berceau (2), paramétrée par $\overrightarrow{CD} = d.\overrightarrow{x_2}$ où la position du point C est définie par $\overrightarrow{AC} = c.\overrightarrow{x_2}$ avec c = 1m ;

Extrait du cahier des charges : la vitesse de la nacelle de l'échelle par rapport au sol doit rester inférieure à V_{max}=1m/s.

Exigence de sécurité : pour des raisons de confort et de sécurité, il est nécessaire que lors de la phase de dressage, c'est-à-dire lorsque les vérins de dressage font pivoter le berceau (2) par rapport à la tourelle (1) et que l'échelle se déploie, la norme de la vitesse ressentie par une personne située dans la nacelle ne dépasse pas la valeur maximale définie par le cahier des charges. Lors de la phase de dressage, la liaison $\mathcal{L}_{10}$ est bloquée pour éviter tout risque de collision.

Q1. Colorier le schéma cinématique et réaliser le graphe de structure.

Q2. Déterminer les trajectoires du point D : T(D,3/2) et T(D,2/1)

Q3. Déterminer la vitesse de D, $\overrightarrow{V(D, 3/0)}$. Déduire la norme.

La course de sortie de l'échelle est $d_{max} = 25\ m$. Il faut 30s pour que l'échelle sorte totalement à vitesse constante.

Q4. Calculer la valeur maximale de $\dot{\theta}$ permettant de respecter le cahier des charges. Vous exprimerez cette vitesse en °/s.

Fonctionnement dégradé

Lors de la maintenance de l'EPAS on peut forcer la tourelle à tourner par rapport au châssis tout en commandant la sortie de l'échelle et la rotation du berceau 2.

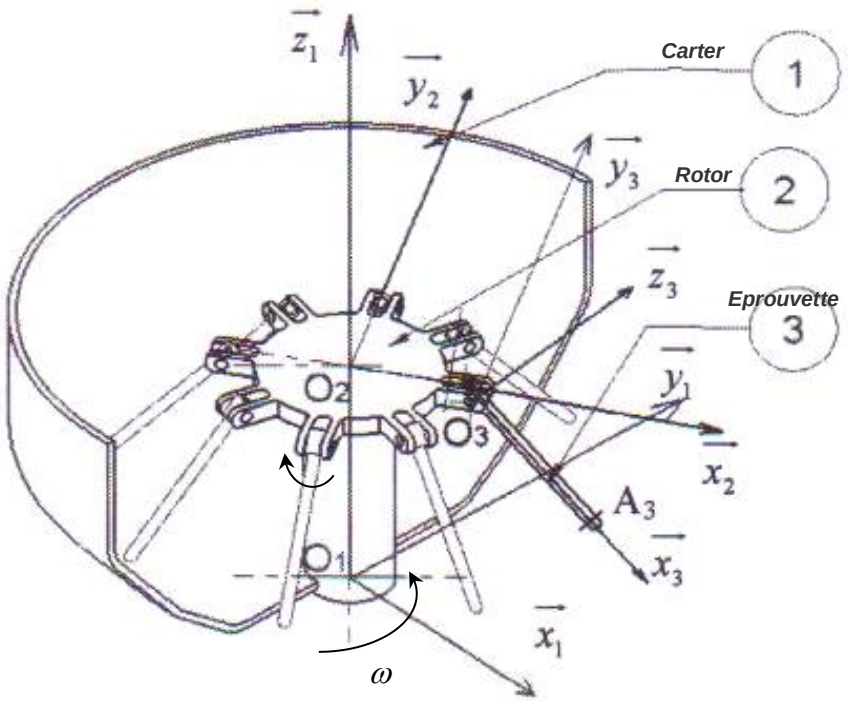
Q5. Calculer la nouvelle vitesse de D : $\overrightarrow{V(D, 3/0)}$.

Q6. Avec une rotation de la tourelle de 10°/s, quelle est la nouvelle vitesse $\left\|\overrightarrow{V(D, 3/0)}\right\|$.

2. ETUDE CINEMATIQUE D'UNE CENTRIFUGEUSE DE LABORATOIRE

Présentation

Une centrifugeuse de laboratoire a pour objectif d'agiter des solutions contenues dans des éprouvettes (3). L'efficacité de la centrifugeuse est liée en grande partie à leur vitesse et leur accélération absolues. C'est ce que nous proposons d'étudier ici.



Données

Le dessin ci-contre représente la centrifugeuse. Elle est constituée d'un carter 1 en forme de bol, d'un rotor 2 en rotation d'axe $[O_1, \vec{z_1})$ par rapport au carter, et d'éprouvettes 3 en rotation d'axe $[O_3, \vec{y_3})$ par rapport au rotor. Le rotor 2 est entraîné en rotation par un moteur électrique non représenté.

Le repère $R_1(O_1, \vec{x_1}, \vec{y_1}, \vec{z_1})$ est lié au carter 1.

Le repère $R_2(O_2, \vec{x_2}, \vec{y_2}, \vec{z_2})$ est lié au rotor 2 avec $(\vec{x_1}, \vec{x_2}) = (\vec{y_1}, \vec{y_2}) = \theta$ et $\overrightarrow{O_1O_2} = h.\vec{z_1}$.

Le repère $R_3(O_3, \vec{x_3}, \vec{y_3}, \vec{z_3})$ est lié à l'éprouvette 3 avec $(\vec{x_2}, \vec{x_3}) = (\vec{z_2}, \vec{z_3}) = \alpha$ et $\overrightarrow{O_2O_3} = R.\vec{x_2}$

.

$\overrightarrow{O_3A_3} = l.\vec{x_3}$

Questionnaire

Q1. Faire les figures géométrales et le graphe des liaisons.

Q2. Calculer la vitesse de rotation d'une éprouvette par rapport au carter $\vec{\Omega}(3/1)$.

Q3. Ecrire le torseur cinématique de 2/1. Faire le lien avec le mouvement de 2/1.

Q4. Mêmes questions pour 3/2.

Q5. Ecrire le torseur cinématique de 3/1 au point le plus judicieux.

Q6. Calculer la composante selon le vecteur de base $\vec{x_3}$ de l'accélération du point A_3 de l'éprouvette par rapport au carter 1.

Q7. Calculer $\vec{\Gamma}(A_3,3/1)$ dans le cas où la vitesse angulaire du rotor/carter est constante (= ω).

Q8. Ecrivez $\vec{\Gamma}(A_3,3/1)$, si les éprouvettes « se stabilisent » et ne tournent plus/rotor, et si la vitesse de rotation du rotor ω est constante. Commentez la direction et le sens de cette accélération.

Q9. Application numérique : accélération et vitesse de A_3 dans le cas précédent pour une vitesse angulaire du rotor $N_{2/1}$=100 tr/min, et R=20 cm, l=30 cm. Les éprouvettes se stabilisent pour α=30°.

3. PLATEFORME SIX AXES

Présentation

La plateforme six axes, encore appelée hexapode, est composée d'une platine mobile supportée par six vérins. Elle équipe souvent les laboratoires de SII. Chacun de ses six vérins est lié à une platine fixe et à la platine mobile par des rotules (douze liaisons sphériques).

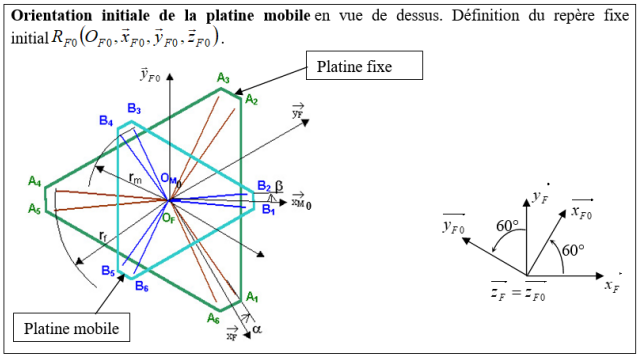


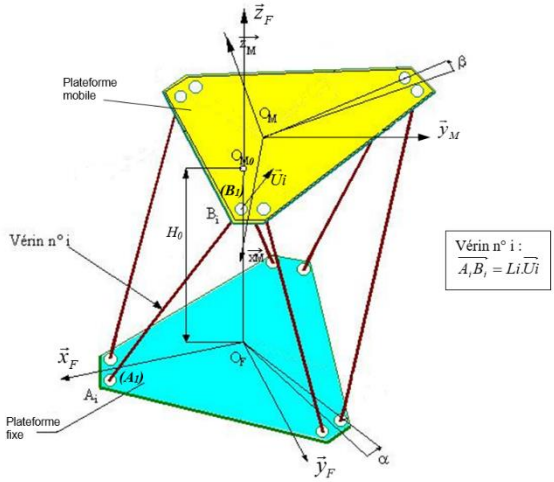
Chaque vérin est piloté indépendamment. Cela permet de positionner la plateforme où et comment on le souhaite dans l'espace, dans les limites des capacités géométriques du mécanisme. Cela signifie qu'on peut <u>positionner</u> le centre O_M de la plateforme mobile selon une position désirée, et qu'on peut <u>orienter</u> sa normale $\vec{Z}_M$ selon l'orientation désirée.

Il existe deux types d'hexapodes :

- les hexapodes de positionnement (positionnement précis d'un télescope par exemple)
- les hexapodes de mouvement (cabine de simulation spatiale, cabine de cinéma 3D).

Paramétrage





On impose la position voulue de la plateforme. C'est-à-dire les 3 coordonnées (X_M,Y_M,Z_M) de son centre O_M, et ses trois angles d'orientation (ψ, θ, φ) qui sont les angles d'Euler appelés respectivement précession, nutation, rotation propre : le logiciel de pilotage « Stewart », calcule les longueurs Li de chaque vérin en fonction de la position voulue : X_M , Y_M, Z_M , ψ, θ, φ.

Caractéristiques géométriques de la plateforme :

Platine fixe	Rayon ancrages	Rf =	270	mm = O_FA_i
(inférieure)	Angle ancrage	α =	4,25	°

Platine mobile	Rayon ancrages	Rm =	195	mm = O_MB_i
(supérieure)	Angle ancrage	β =	5,885	°

Repères

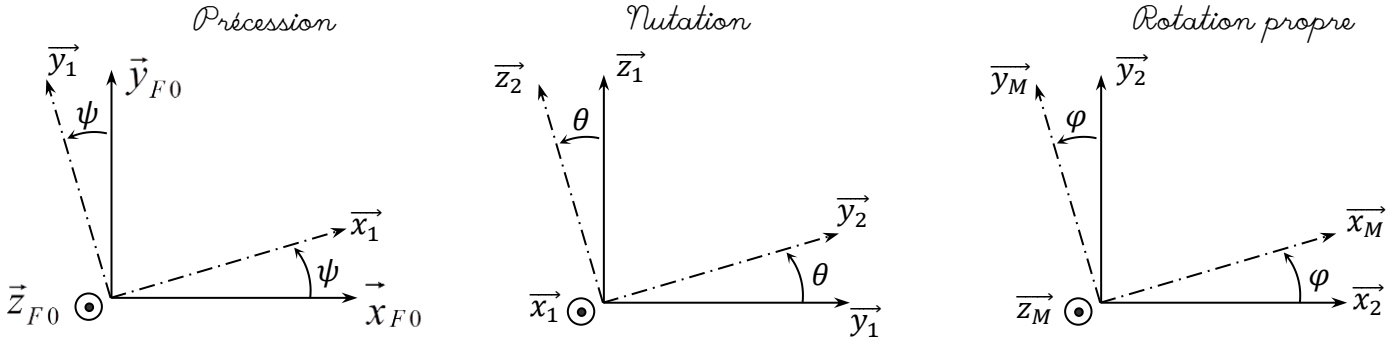
Les repères sont : $R_F(O_F,\vec{x}_F,\vec{y}_F,\vec{z}_F)$ pour la platine fixe, $R_M(O_M,\vec{x}_M,\vec{y}_M,\vec{z}_M)$ pour la platine mobile.

On note un deuxième repère <u>fixe</u> $R_{F0}(O_{F0},\vec{x}_{F0},\vec{y}_{F0},\vec{z}_{F0})$, qui correspond au repère de la platine mobile quand elle est dans sa position initiale (= égalité des vecteurs de bases, voir sa définition ci-après).

Le paramétrage géométrique choisi pour situer la plateforme dans l'espace est :

- Cartésien pour OM : $\overrightarrow{O_FO_M} = X_M.\vec{x}_F + Y_M.\vec{y}_F + Z_M.\vec{z}_F$

- Angles d'Euler pour l'orientation.



Q0. Les figures géométrales sont données. Vues les rotations, noter sur chaque figure les égalités de vecteur.

Q1. Calculer les coordonnées des vecteurs $\vec{y}_M$ et $\vec{z}_M$ dans la base (B_{F0}), en fonction des angles d'Euler dans le cas où la rotation propre est nulle.

Application : on impose à la plateforme une précession de 30° et une nutation de 45°. On veut déterminer :

-L'inclinaison du plan de la plateforme par rapport à l'horizontale. C'est-à-dire l'angle entre les normales : $(\vec{z}_{F0}, \vec{z}_M)$.

-L'angle qu'a balayé le vecteur $\vec{y}_M$: $(\vec{y}_{F0}, \vec{y}_M)$.

Q2. Calculer ces deux angles.

On définit le vecteur vitesse angulaire : $\vec{\Omega}(plateforme.mobile/bâti) = \vec{\Omega}(B_M / B_{F0})$.

Q3. Déterminer l'expression la plus simple de $\vec{\Omega}(B_M / B_{F0})$ en fonction de $\dot{\psi}, \dot{\theta}, \dot{\varphi}$ et des vecteurs de bases utiles. Ecrire le torseur cinématique de B_M/B_{F0}.

Q4. Exprimer $\vec{\Omega}(B_M / B_{F0})$ dans la base fixe.

Des capteurs gyroscopiques installés sur la plateforme mobile permettent de connaître les vitesses angulaires instantanées. A l'instant où la plateforme passe dans la position (30°,45°,0°), on a : $\dot{\psi} = \dot{\theta} = \dot{\varphi} = 10 rad/s$.

Q5. Déterminez les coordonnées et la norme de $\vec{\Omega}(B_M / B_{F0})$ dans cette position.

4. LOI EN TRAPEZE : TOURELLE REVOLVER

Nous étudions le changement d'outil sur un centre d'usinage avec tourelle revolver, ou changeur.

- Déplacement de la broche vers le point de changement d'outil
- Fermeture de la pince du changeur d'outil
- Avancée du changeur (=tourelle révolver) vers la broche pour désengager l'outil
- **Rotation du changeur pour mettre l'outil face à la broche**
- Recul du changeur pour engager le nouvel outil dans la broche
- Retour de la broche vers la zone d'usinage

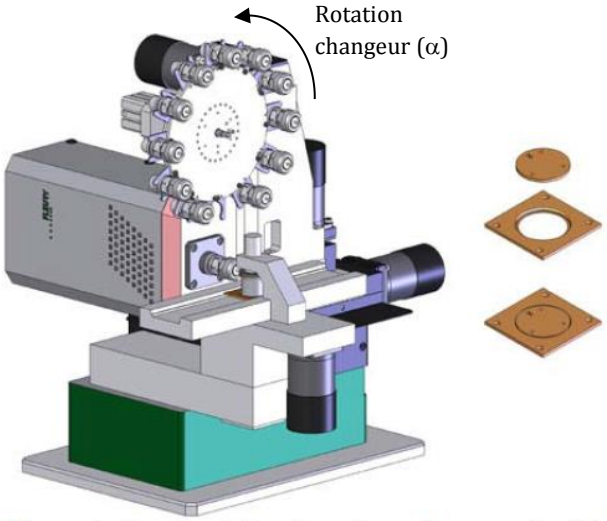
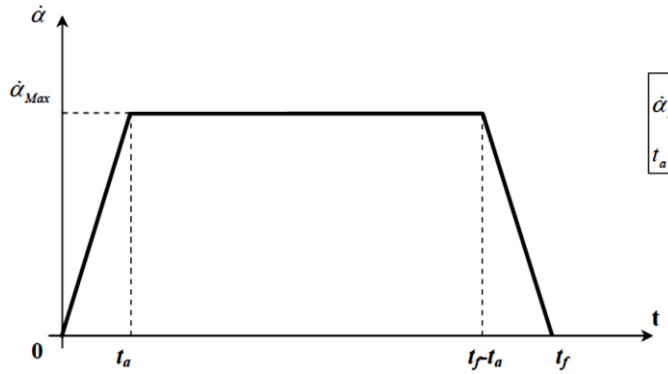


Figure 4 : Représentation du système changeur d'outils

Nous nous intéressons plus particulièrement à la rotation changeur d'outil.

La loi de vitesse définissant la rotation α du changeur est une loi classique du type « loi en trapèze ».



$$\dot{\alpha}_{Max} = \frac{2\pi}{3} rad.s^{-1}$$
$$t_a = 0{,}14s$$

Q1. Calculez l'accélération angulaire $\ddot{\alpha}$ en phase d'accélération.
Q2. Afin de déterminer le temps total du cycle, et ce pour différentes positions déterminez le temps nécessaire à la rotation du changeur dans les deux cas particuliers définis ci-dessous :

$$\Delta\alpha_1 = \frac{\pi}{2} \textbf{ puis } \Delta\alpha_2 = \frac{\pi}{12}$$

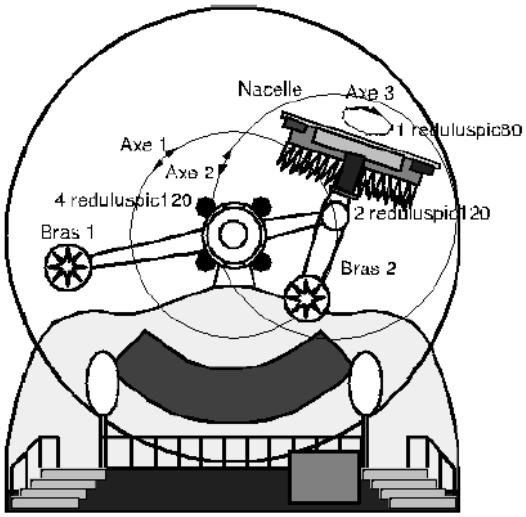
Remarque, pour $\Delta\alpha_2$: on vérifiera que la vitesse maxi est atteignable pour couvrir l'angle désiré $\Delta\alpha_2$.

5. MANÈGE MAGIC ARM

Objectif

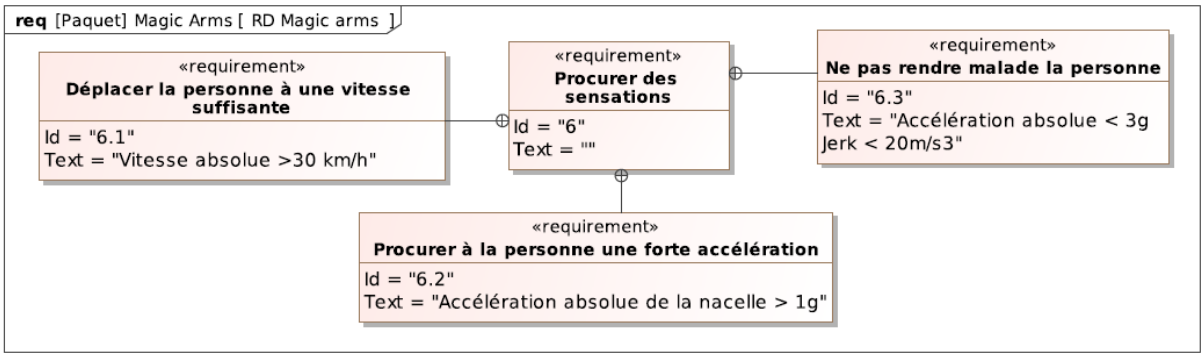
Vérifier que la cinématique globale de l'attraction Magic Arms permet de procurer des sensations à une personne en bonne santé physique et sans désagrément.

La société WAAGNER-BIRO propose le manège à sensations « Magic Arms » (figure ci-contre). Les mouvements simultanés de ce dernier autour de trois axes désorientent les 39 passagers embarqués qui ne savent plus reconnaître le dessus du dessous pendant quelques minutes.

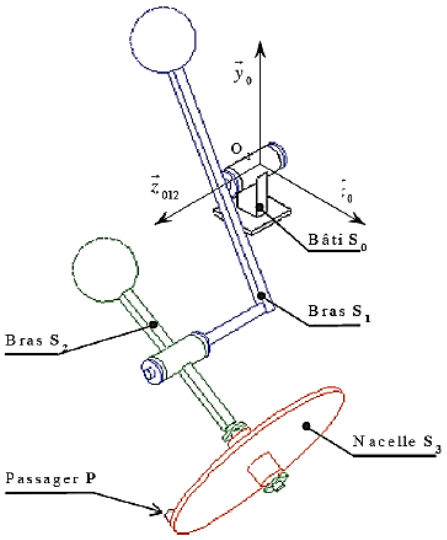


L'installation est composée d'une structure métallique d'environ 12m de hauteur avec deux bras mobiles. Les passagers sont parfaitement maintenus par un harnais dans la nacelle. Le bras principal (1) et le bras pivot (2), liés l'un à l'autre au début du cycle, commencent à tourner. En même temps, la nacelle tourne autour de son axe. Après 8 secondes, le maximum de hauteur est atteint et les deux bras se désindexent et se mettent à tourner indépendamment l'un de l'autre. Tous les mouvements sont pilotés par un ordinateur.

Les passagers, tête en bas ou en haut, sont soumis à des mouvements combinés s'apparentant à des loopings dans les trois dimensions, à vitesses et accélérations élevées.

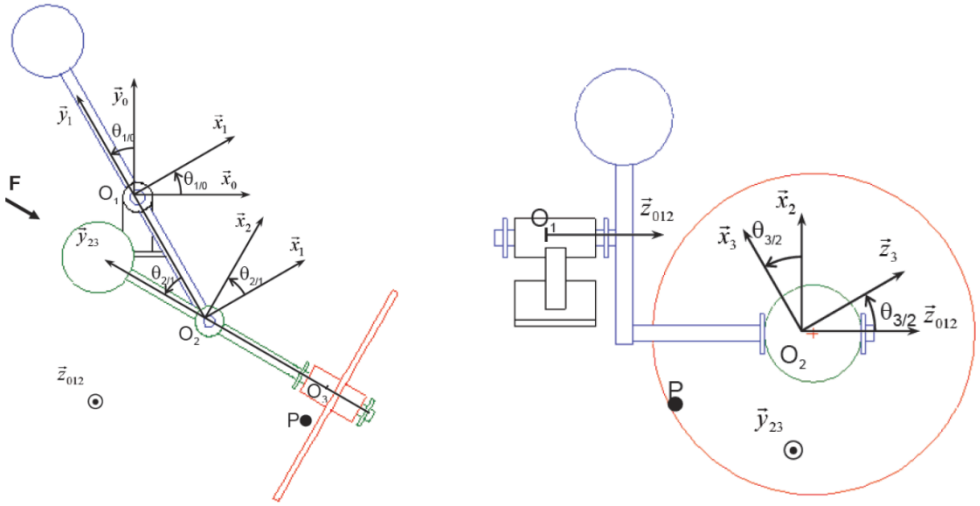


Paramétrage



On utilisera le paramétrage suivant :
$R_0(O_0, \overrightarrow{x_0}, \overrightarrow{y_0}, \overrightarrow{z_{012}})$ est lié au bâti S_0
$R_1(O_1, \overrightarrow{x_1}, \overrightarrow{y_1}, \overrightarrow{z_{012}})$ est lié au bras S_1
$R_2(O_2, \overrightarrow{x_2}, \overrightarrow{y_2}, \overrightarrow{z_{012}})$ est lié au bras S_2
$avec\ \overrightarrow{O_1O_2} = -L_1\overrightarrow{y_1} + a\overrightarrow{z_{012}}\ et\ L_1 = 3{,}9m$
$R_3(O_2, \overrightarrow{x_3}, \overrightarrow{y_{23}}, \overrightarrow{z_3})$ est lié à la nacelle S_3
$avec\ \overrightarrow{O_2O_3} = -L_2\overrightarrow{y_{23}},\ \overrightarrow{O_3P} = -L_3\overrightarrow{z_3}, L_2 = 2{,}87m\ et\ L_3 = 2{,}61m$

Le vecteur $\overrightarrow{z_{012}}$ est commun aux bases des repères de 0, 1, 2. Le vecteur $\overrightarrow{y_{23}}$ est commun aux bases des repères de 2 et 3.



(a) Vue de face. **(b)** Vue suivant F.

Q1 – Réaliser le graphe de structure du système puis exprimer le torseur cinématique de chacune des liaisons.

Q2 – En utilisant la relation de composition des mouvements, donner l'expression de la vitesse absolue du passager, situé au point P, notée $\overrightarrow{V(P, 3/0)}$.

Q3 – À partir de la figure 11.3 et en faisant l'hypothèse qu'à l'instant initial toutes les mesures d'angles sont nulles, déterminer, pour tout $t \in [0s; 28s]$, les expressions des angles $\theta_{i/i-1}$ $i \in [\![1; 3]\!]$.

Q4 – Pour t =26,6 s, donner une mesure de ces angles congrue à 2π (valeur dans le domaine $[0;2\pi]$). Vérifier ces valeurs en observant la figure 11.4

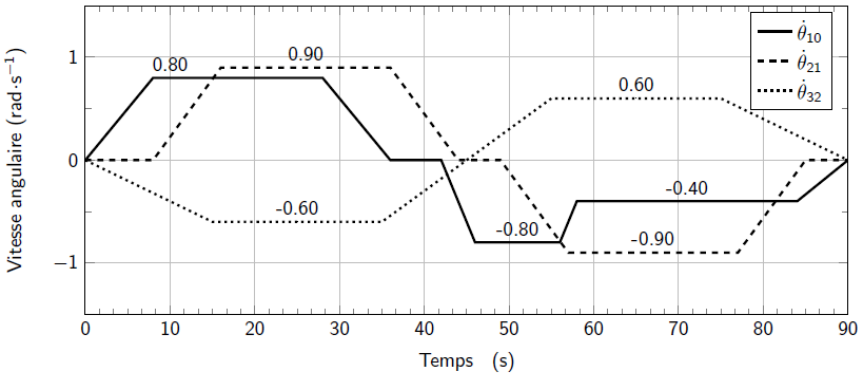


Figure 11.3 – Évolution des vitesses angulaires en fonction du temps.

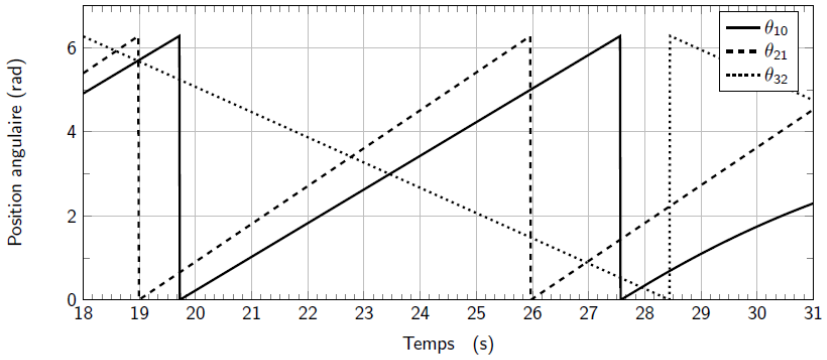


Figure 11.4 – Évolution des positions angulaires en fonction du temps.

Q5 – Déterminer la norme de la vitesse $\overrightarrow{V(P,3/0)}$ à partir à partir de la relation trouvée à la question 2 à l'instant t = 19,8 s. Justifier que l'on obtienne une vitesse maximale à cet instant.

Q6 – À partir de la figure 11.3, exprimer les valeurs des accélérations $\ddot{\theta}_{i/i-1}$ dans l'intervalle de temps [18s ; 28 s].

Q7 – Donner l'expression de l'accélération absolue du passager $\overrightarrow{\Gamma(P,3/0)}$ dans l'intervalle de temps [18s ; 28s] en fonction des longueurs L_i des angles θ_i et de leurs dérivées.

Q8 – À partir de l'observation de la courbe présentée sur la figure 11.6, définir à quel instant l'accélération est maximale dans l'intervalle de temps [18s ; 28 s].

Q9 – Vérifier l'aptitude de « Magic Arms » à procurer des sensations à une personne en bonne santé, sans pour autant provoquer de désagrément.

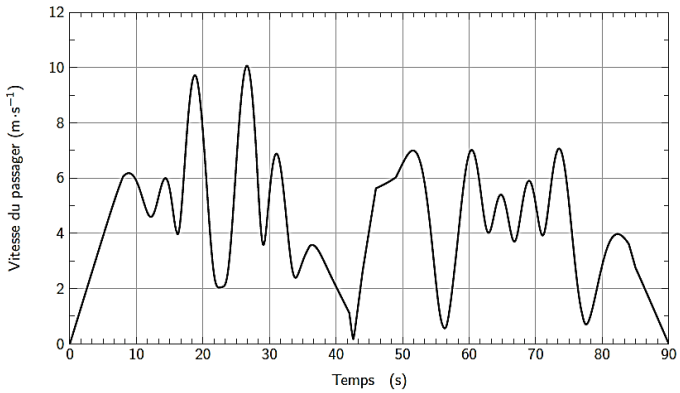


Figure 11.5 – Évolution de la vitesse du passager en fonction du temps.

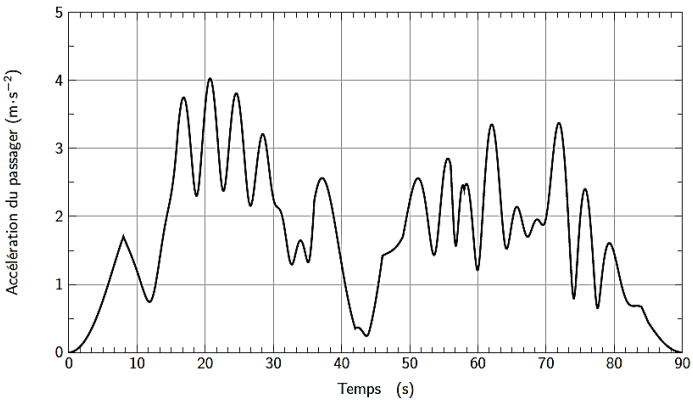
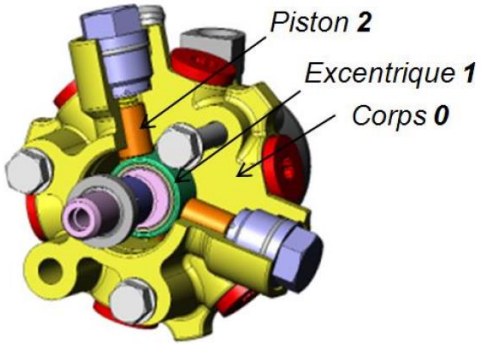


Figure 11.6 – Évolution de l'accélération du passager en fonction du temps.

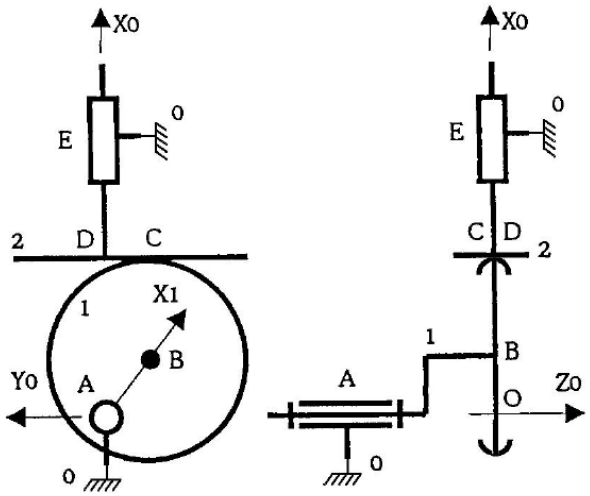
6. POMPE A PISTONS RADIAUX

On s'intéresse au comportement cinématique du dispositif de transformation de mouvement par excentrique qui permet de transformer le mouvement de rotation continu de l'arbre d'entrée, sur lequel est fixé l'excentrique (1), en mouvement de translation alternatif du piston (2).





Le système peut être modélisé par le schéma cinématique ci-dessous.



Cahier des charges

La pompe doit pouvoir assurer un débit variant de 0,5 à 20 L_min⁻1.

On note $R = BC$ le rayon de l'excentrique, et $e = OB$ l'excentration. La position angulaire de l'excentrique (1) par rapport au corps (0) est paramétrée par l'angle $\theta = (\overrightarrow{x_0}, \overrightarrow{x_1})$. La position du piston est repérée dans la direction $\overrightarrow{x_0}$ par le paramètre $X = \overrightarrow{OD}.\overrightarrow{x_0} = \overrightarrow{AD}.\overrightarrow{x_0}$. Enfin, on note C le point de contact entre l'excentrique (1) et le piston (2). Sa position est définie par $\overrightarrow{CD} = \lambda.\overrightarrow{y_0}$.

Q1 – Représenter le graphe des liaisons et colorier le schéma cinématique. Préciser les paramètres d'entrée et de sortie.

Q2 – Déterminer la loi entrée-sortie géométrique reliant la position du piston X à la position angulaire de l'excentrique θ.

Q3 – Donner le torseur cinématique de la liaison entre l'excentrique (1) et le piston (2).

Préciser le sens physique de la vitesse $\overrightarrow{V(C,1/2)}$.

Q4 – Déterminer, par composition des vitesses, la loi entrée-sortie cinématique reliant la vitesse de translation du piston $\dot{X}$ à la vitesse de rotation de l'excentrique $\dot{\theta}$ en fonction des paramètres géométriques. Vérifier le résultat obtenu en le comparant à la relation obtenue en dérivant la loi entrée-sortie géométrique.

Q5 – Donner la relation entre le débit instantané d'un seul cylindre $q_1(t)$ en sortie de la pompe, la section du piston S et sa vitesse de translation par rapport au corps $\dot{X}$.

Q6 – En déduire l'expression du débit instantané en fonction de la vitesse de rotation de l'arbre d'entrée $\dot{\theta}$.

Q7 – En tenant compte du fait que la pompe comporte trois pistons équirépartis angulairement, déterminer l'expression du débit instantané total $q_T(t)$ puis du débit total moyen par tour d'arbre moteur Q_{Tmoy}.

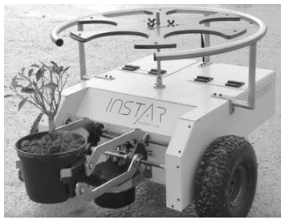
Les pistons ont une section circulaire de diamètre D. Pour la suite, on prendra e = 10mm et D = 5mm.

Q8 – Déterminer la vitesse de rotation minimale permettant de respecter le cahier des charges.

7. PIVOTEMENT DU ROBOT TROOPER

Objectif

Déterminer la loi de mouvement entre les deux roues motrices d'un robot et ses vitesses de pivotement et d'avancement, afin de piloter son déplacement au sol.



Le robot Trooper est conçu pour la culture vivrière hors sol : il déplace des pots pour optimiser la captation de la lumière. Chacune de ses deux roues motrices (**g** = roue gauche centrée en A, **d**=roue droite centrée en B) est munie d'un moteur indépendant. Voir les représentations ci-dessous.

Données et hypothèses

$\overrightarrow{\Omega(d/1)} = \omega_d.\overrightarrow{x_1}$;

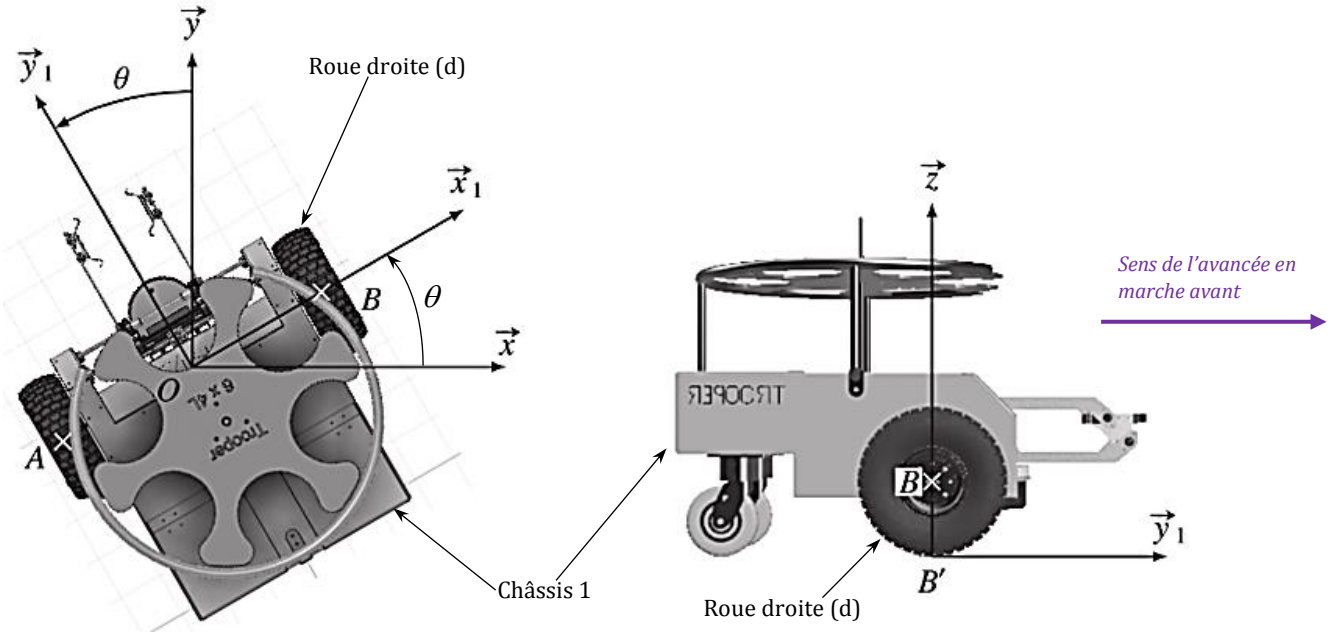
$\overrightarrow{\Omega(g/1)} = \omega_g.\overrightarrow{x_1}$; ω_g est piloté par un micro-controleur indépendamment de ω_d

$\{\mathcal{V}_{1/0}\} = \begin{Bmatrix} \dot{\theta}\vec{z} \\ V\overrightarrow{y_1} \end{Bmatrix}_O$

e = AO = OB (demi largeur)

r = BB' = AA' (rayon roue)

Hyp1 : liaisons parfaites sauf en B' et A' (adhérence)
Hyp2 : RSG en B' et A'.



Questionnaire

Q1 - Proposer une liaison entre la roue droite (d) et le sol (0) : nom et caractéristiques géométriques.
Q2 - Faire le graphe de structure de l'ensemble {sol 0, roue droite (d), roue gauche (g), châssis 1}.
Q3 - Calculer la vitesse $\vec{V}(B' \in d/0)$ en fonction de V, ω_d, $\dot{\theta}$, e et r.
Q4 - Déduire par analogie rigoureuse (mais sans calcul) la vitesse $\vec{V}(A' \in g/0)$.

Q5 - Quel nom particulier donne-t-on au vecteur vitesse $\vec{V}(B' \in d/0)$?
Q6 - Ecrire la condition de roulement sans glissement de chacune des roues sur le sol.

Q7 - En utilisant l'hypothèse de roulement sans glissement en A' et en B', montrer que $\dot{\theta} = C_1(\omega_g - \omega_d)$ et $V = C_2(\omega_d + \omega_g)$ où C_1 et C_2 sont des constantes à exprimer en fonction des données.

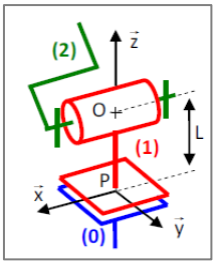
On pilote indépendamment chaque roue pour obtenir la vitesse V et la rotation $\dot{\theta}$ désirées.
On souhaite un pivotement du robot à droite et sur place.
Q8 - Ecrire les conditions sur V et $\dot{\theta}$.
Q9 - Calculer les consignes à imposer à chaque roue, ω_g et ω_d, pour obtenir le pivotement souhaité en fonction de C_1, C_2, $\dot{\theta}$.

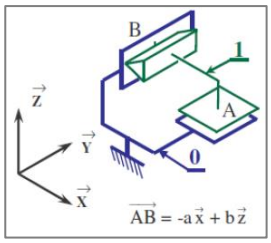
On étudie la marche avant du robot en ligne droite d'une part, et la rotation sur place d'autre part.
Q10 - Ecrire pour chaque cas de roulage, les conditions sur V et $\dot{\theta}$.

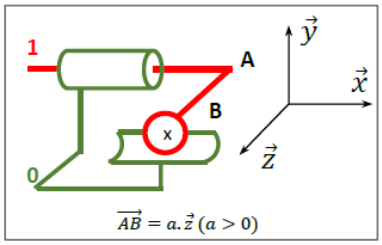
Q11 – Pour chaque cas de roulage, calculer les consignes à imposer à chaque roue en fonction de C_1, C_2, v.

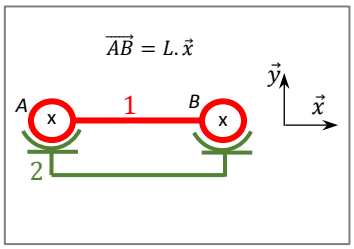
8. DETERMINATION DE LIAISONS EQUIVALENTES

Q1. Pour les modèles cinématiques ci-dessous, déterminer la liaison équivalente après avoir colorié le schéma cinématique et fait le graphe des liaisons.



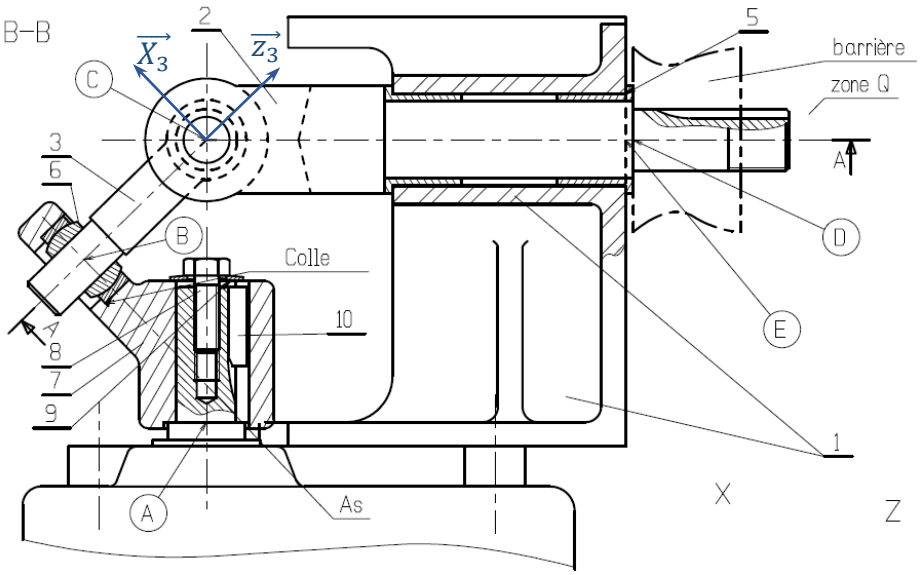


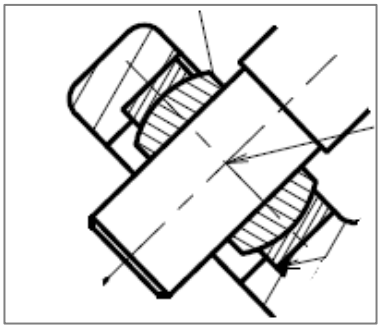




Q2. Ci-dessous le dessin d'ensemble du système de transformation de mouvement Sinusmatic. On s'intéresse au sous-ensemble {croisillon 3, noix 6, arbre d'entrée 7}.

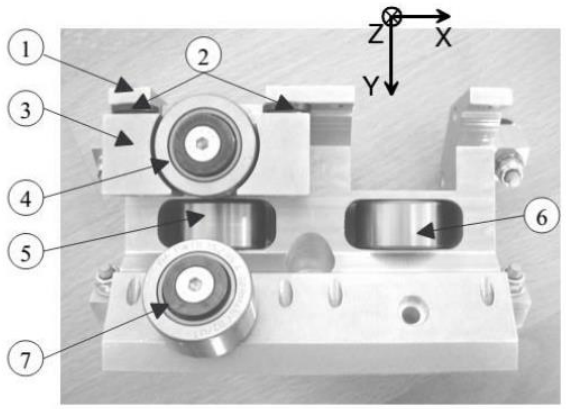
- Surligner les surfaces de contact 3/6, et 6/7
- Faire le graphe des liaisons
- Faire le schéma cinématique de ce sous-ensemble
- Déterminer la liaison équivalente 3-6-7.

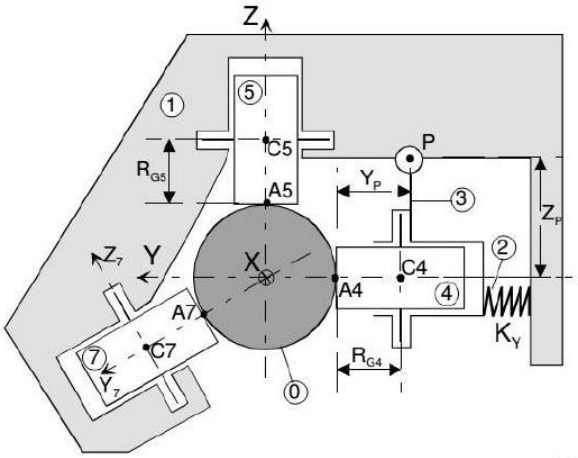




Q3. On donne ci-dessous un ensemble de guidage de précision par galets (4, 5, 6, 7). Cet ensemble est monté par paire sur la barre cylindrique (0).

On se propose de déterminer la liaison équivalente du coulisseau (1) par rapport à la barre cylindrique (0) par l'intermédiaire des trois galets 4, 5, 7 et du levier 3. On ne s'intéresse pas à (6).





- Faire le graphe des liaisons de l'ensemble (0, 3, 4, 5, 7, 1).
- Déterminer la liaison équivalente $\mathcal{L}_{eq5}$ de la chaîne 0-5-1.
- Déduire par analogie immédiate la liaison équivalente $\mathcal{L}_{eq7}$ de la chaîne 0-7-1.
- Déterminer la liaison équivalente $\mathcal{L}_{eq4}$ de la chaîne 0-4-3-1.
- Déterminer la liaison équivalente globale $\mathcal{L}_{eq01}$ entre 0 et 1 (galet 6 exclu).
- Montés par paire le long de la barre cylindrique 0 : déterminer la liaison équivalente globale $\mathcal{L}_{eq01_G}$.