

- Répondre directement (et uniquement) sur la feuille, ne pas dégrafer.
- Vous pouvez compléter vos réponses sur une feuille libre si nécessaire.

Classe : .....  
 Nom : .....  
 Prénom : .....

## Exercice 1 - Simulateur de vol

adapté à partir de - icna 2012 - PSI

Corrigé page 14

### A. Présentation et problématique

#### A.1. Intérêt et principe de fonctionnement des simulateurs de vol

L'apprentissage du pilotage ou la qualification des pilotes sur un nouveau type d'appareil requiert de nombreuses heures de formation "en situation".

A cet effet, le simulateur de vol (Figure 1c) se substitue avantageusement au vol réel, tant au niveau du coût de la formation que de l'étendue des situations qui peuvent être reproduites en toute sécurité.

Dans un simulateur, le pilote est isolé du monde extérieur et perçoit uniquement les informations que le simulateur lui communique.

Pour donner la sensation au pilote qu'il est dans un avion réel, le simulateur agit sur 3 aspects :

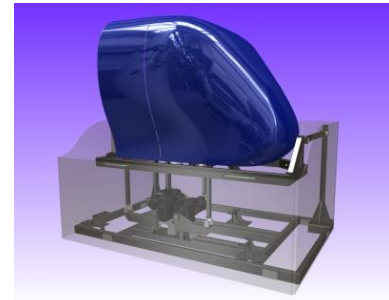
1. Donner une vue de l'extérieur qui est le résultat de la simulation de vol. Ce résultat est visualisé sur des écrans LCD (Figure 1b) sensés représenter ce que l'on voit au travers des fenêtres du cockpit. Le cerveau du pilote perçoit au travers du système de vision les mouvements de l'avion. Il y a cependant deux lacunes à cette perception : elle est lente et ne permet pas de sentir physiquement les effets de l'accélération.
2. Faire subir au pilote les effets de l'accélération. Cette accélération est perçue par le système vestibulaire humain (cavité de l'oreille interne), un peu dans son intensité, mais surtout dans son orientation. Le simulateur devra donc s'orienter pour donner au pilote la sensation qu'il accélère.
3. La sonorisation reproduit exactement les bruits perçus dans le cockpit (bruit de moteur, bruit de l'air...).

La cinématique des simulateurs les plus complets est basée sur un hexapode (ou plate-forme de Stewart) doté de 6 axes. Ces simulateurs permettent de reproduire :

- les mouvements angulaires de roulis, tangage et lacet;
- les déplacements longitudinaux, transversaux et verticaux.

Une solution moins coûteuse consiste à n'installer que 3 axes, de façon à ne reproduire que les mouvements principaux de l'avion : roulis, tangage et déplacement vertical.

C'est le principe du simulateur FLY-HO de la société 6mouv, support de cette épreuve.



(a)



(b)



(c)

FIGURE 1

#### A.2. Analyse fonctionnelle

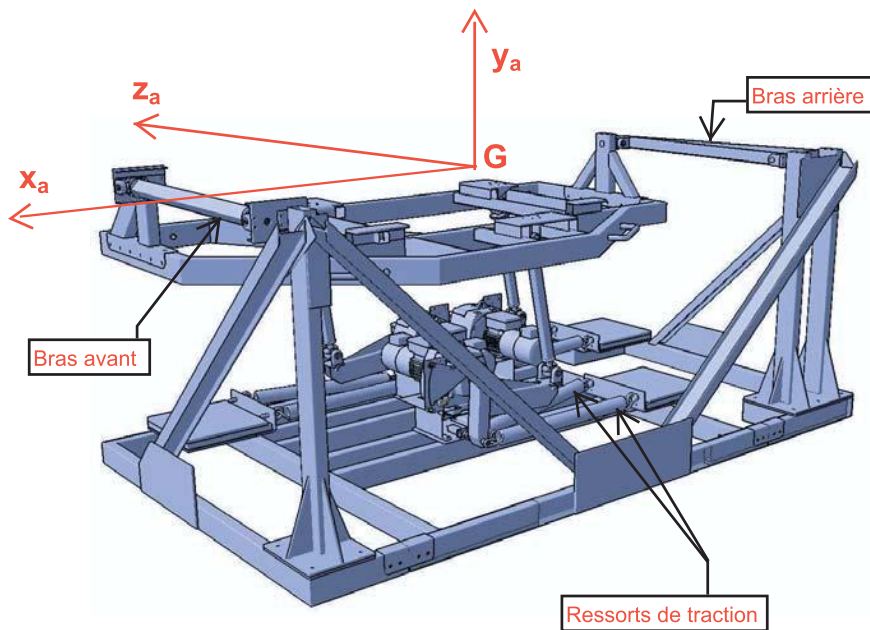


FIGURE 2 – Structure du simulateur de vol

Les caractéristiques générales de ce simulateur, modulaire et facilement démontable, sont données dans les documents techniques DT1 et DT2. Le simulateur, constitué de 3 axes (\*) M1, M2 et M3 d'architecture identique, ne nécessite qu'une alimentation électrique et requiert très peu de maintenance grâce à un choix de composants industriels qualifiés pour une durée de vie importante.

\* Nota : on appelle « axe » un ensemble de composants liés à une mobilité du cockpit.



FIGURE 3

### B. Étude de la fonction « Lier le cockpit au sol par une structure à 3 degrés de liberté »

Le modèle FLY-HO, simulateur 3 axes, reproduit les sensations des principales phases de vol (accélération, décélération, décollage, atterrissage, virages, pertes d'altitude, touché des roues, etc.), en s'appuyant sur 3 des mouvements principaux de l'avion (Figure 4).

- Roulis : rotation autour de l'axe  $(G, \vec{x}_a)$  ;
- Tangage : rotation autour de l'axe  $(G, \vec{z}_a)$  ;
- Déplacement vertical suivant  $\vec{y}_a$ .

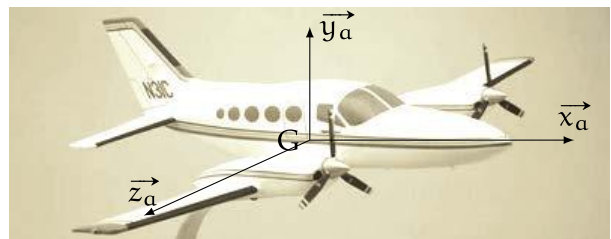
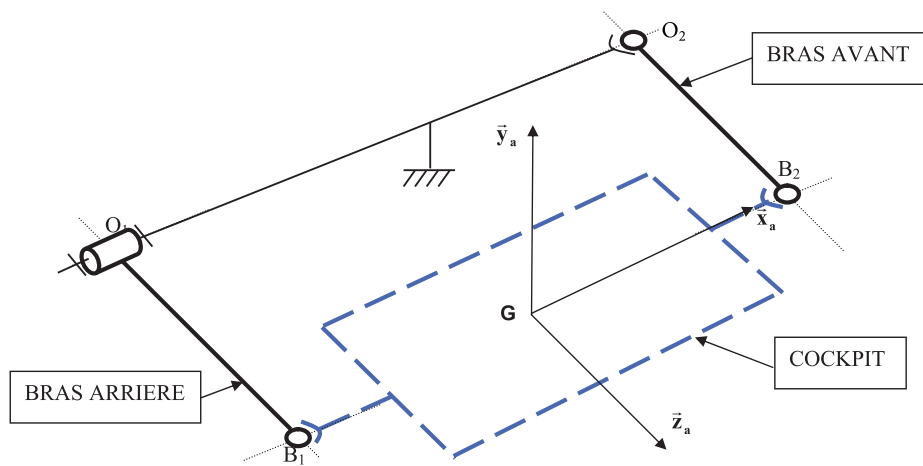


FIGURE 4

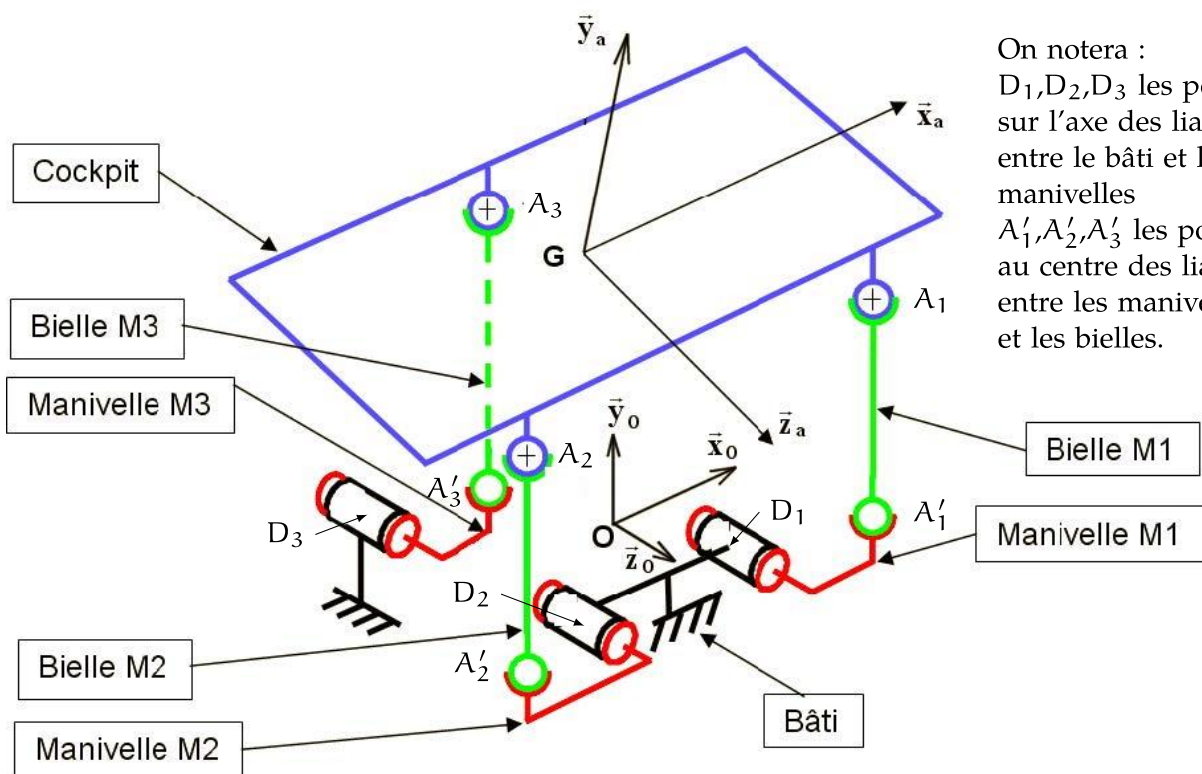
Afin de ne pas rendre le schéma cinématique illisible celui-ci est décrit sur deux figures, le mécanisme de mise en mouvement sur la figure 5b et celui de positionnement du simulateur sur la figure 5a.

#### B.1. Étude globale du mécanisme

La figure 5b représente le schéma cinématique spatial partiel du simulateur avec le mécanisme de mise en mouvement. Les bras arrière et avant du simulateur n'ont pas été représentés, ils servent à assurer la liaison du cockpit avec le bâti, et ils ne sont pas motorisés et ne participent pas à la mise en



(a) Mécanisme de liaison avec le bâti



On notera :  
 $D_1, D_2, D_3$  les points sur l'axe des liaisons entre le bâti et les manivelles  
 $A'_1, A'_2, A'_3$  les points au centre des liaisons entre les manivelles et les bielles.

(b) Mécanisme de mise en mouvement

FIGURE 5 – Schémas cinématiques du simulateur

mouvement du cockpit. Les moteurs associés à chacun des axes M1, M2 et M3 ne sont pas non plus représentés.

L'autre partie du mécanisme est décrit sur la figure 5a, elle présente la liaison entre le bâti et le cockpit grâce aux bras avant et arrière.

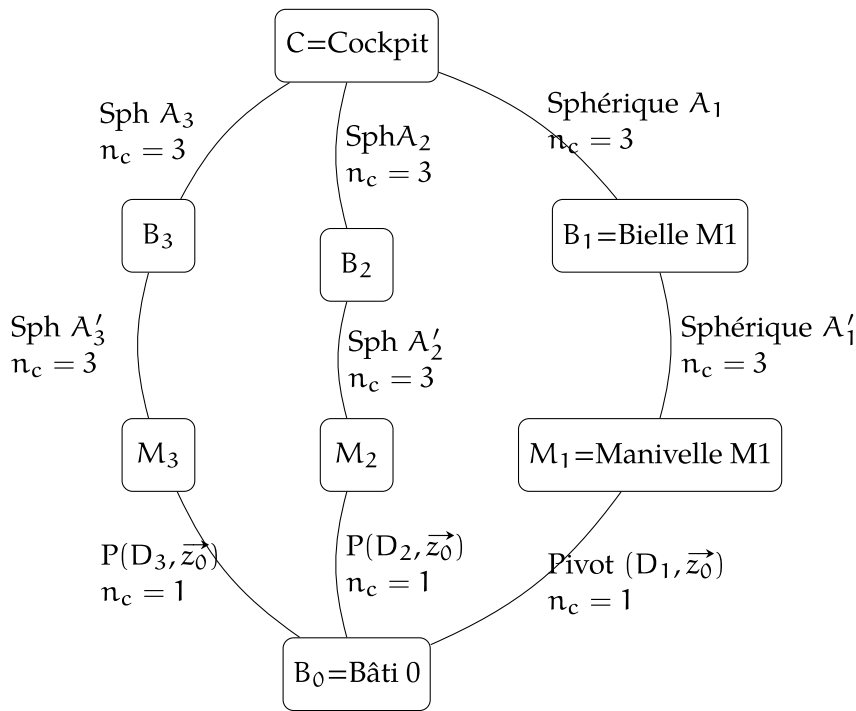
$(\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$  est la base liée au bâti fixe,  $\vec{y}_0$  est vertical ascendant et  $(O, \vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$  est un repère galiléen.

**Hypothèse :** Le point G, centre d'inertie du pilote est supposé immobile pour les mouvements de roulis et de tangage.

La base  $(\vec{x}_a, \vec{y}_a, \vec{z}_a)$  est la base liée au cockpit.

On considère le mécanisme complet décrit par les figures 5b et 5a.

**Q1.** À partir des figures 5b et 5a, compléter le graphe de structure du mécanisme de la figure 6, préciser les liaisons et le nombre d'inconnues cinématiques de chaque liaison.



Les points  $D_i$  sont sur l'axe des liaisons pivots.  
 Les points  $A'_i$  correspondent au centre des liaisons sphériques basses.  
 $n_c$  représente le nombre de degré de liberté d'une liaisons.

FIGURE 6 – Graphe de structure à compléter

Par construction, le mécanisme doit posséder trois mobilités utiles, les mouvements de tangage, roulis et de translation verticale.

On considère maintenant uniquement le mécanisme de mise en position de la figure 5b.

On note :

- $Y+$  : le déplacement vertical d'un point  $A_i$  suivant l'axe des  $\vec{y}_0$  positifs.
- $Y-$  : le déplacement vertical d'un point  $A_i$  suivant l'axe des  $\vec{y}_0$  négatifs.

**Q2.** Compléter le tableau des mouvements du cockpit ci-dessous en indiquant les déplacements des points  $A_i$  (centres des liaisons sphériques). Conclure sur la possibilité des réaliser les trois mobilités utiles du souhaitées avec ce mécanisme.

	Déplacement vertical >0	Roulis >0	Tangage >0
$A_1$	$Y+$		
$A_2$			
$A_3$			

.....  
 .....  
 .....  
 .....

On note :  $\vec{y}_i$  avec  $i \in [1, 2, 3]$  le vecteur unitaire porté par la droite  $(A'_i A_i)$  et  $\overrightarrow{A'_i A_i} = d \cdot \vec{y}_i$ .

**Q3.** Rappeler les torseurs cinématiques des liaisons en  $A_1, A'_1$  et  $D_1$ .

.....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....

Q4. Montrer que la liaison équivalente entre la manivelle  $M_i$  et le cockpit en  $A_i$  est une liaison sphère-plan. Donner le symbole 3D de cette liaison.

.....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....

Q5. Justifier, sans calculs, les mouvements que doit autoriser et / ou interdire la structure cinématique décrite par la figure 5a. Donner alors le torseur cinématique équivalent entre le châssis et le bâti.

.....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....

**B.2. Analyse de la fonction « Piloter le mouvement vertical du cockpit »**

Pour éviter de sur-dimensionner les moteurs du simulateur, on souhaite installer un système permettant de compenser les effets de la pesanteur et ainsi d'équilibrer le poids du cockpit à l'arrêt.

On se place dans le cas simplifié d'un seul mouvement de translation verticale de vitesse et d'accélération suivant  $\vec{y}$ .

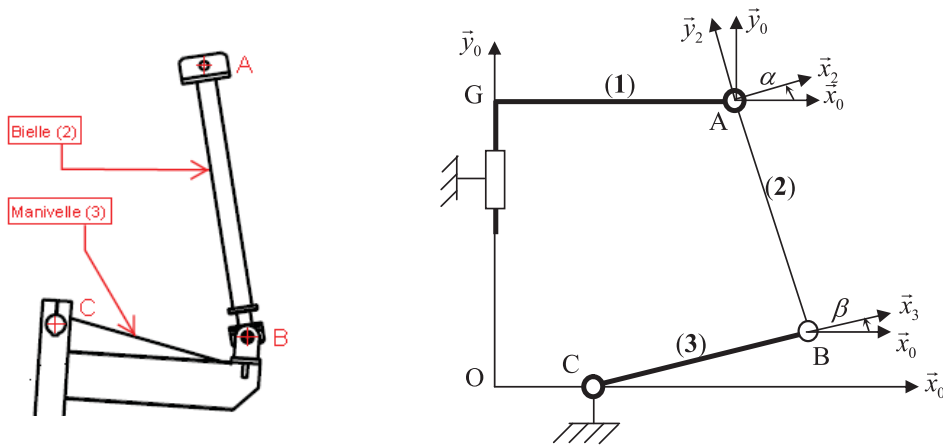


FIGURE 7 – Modèle cinématique simplifié

Dans cette partie, on s'appuie sur un schéma fortement simplifié du mécanisme (figure 7). Dans ce schéma, les trois moto-réducteurs sont remplacés par un seul (M).

Ce mécanisme simplifié est supposé plan.

On considère que le cockpit (1) est supposé ici en liaison glissière avec le bâti (0) tel que  $\vec{OG} = y \cdot \vec{y}_0$ .

Le Moto-Réducteur (M) entraîne en rotation la manivelle (3) autour de l'axe  $(C, \vec{z}_0)$  tel que  $\beta = (\vec{x}_0, \vec{x}_3)$  et on note  $\dot{\beta} = \frac{d\beta}{dt}$ .

La bielle (2) est liée au cockpit (1) et à la manivelle (3) par des liaisons pivot d'axe  $(A, \vec{z}_0)$  et  $(B, \vec{z}_0)$  avec  $\alpha = (\vec{x}_0, \vec{x}_2) = (\vec{y}_0, \vec{y}_2)$  et  $\beta = (\vec{x}_0, \vec{x}_3) = (\vec{y}_0, \vec{y}_3)$ .

On pose  $\overrightarrow{CB} = d \cdot \overrightarrow{x_3}$ ,  $\overrightarrow{OC} = c \cdot \overrightarrow{x_0}$ ,  $\overrightarrow{GA} = a \cdot \overrightarrow{x_0}$  et  $\overrightarrow{BA} = b \cdot \overrightarrow{y_2}$ .

**Q6.** Tracer les figures de changement de base.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

**Q7.** Tracer le graphe de structure en précisant les torseurs cinématiques.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

**Q8.** Écrire la fermeture géométrique, en déduire les deux relations reliant  $y$ ,  $\beta$  et  $\alpha$ .

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

**Q9.** Déterminer à partir de ces deux relations une relation donnant  $y$  en fonction de  $\beta$  et des différentes longueurs.

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

**Q10.** Simplifier ces relations en considérant que la manivelle (3) reste pratiquement horizontale au cours du mouvement de translation du cockpit et que la bielle (2) reste pratiquement perpendiculaire au plan du cockpit ( $\beta$  et  $\alpha$  petits), en déduire une relation reliant  $y$  à  $\beta$ .

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....

### **B.3. Étude du réducteur**

L'arbre 3 est actionné par un motoréducteur à train épicycloïdal (figure 8).

Le réducteur étudié comporte deux trains épicycloïdal identiques.

**Q11.** Associer aux solides 1, 2, 3 et 4 le vocabulaire correspondant aux trains épicycloïdal. Répondre dans le tableau ci-dessous.



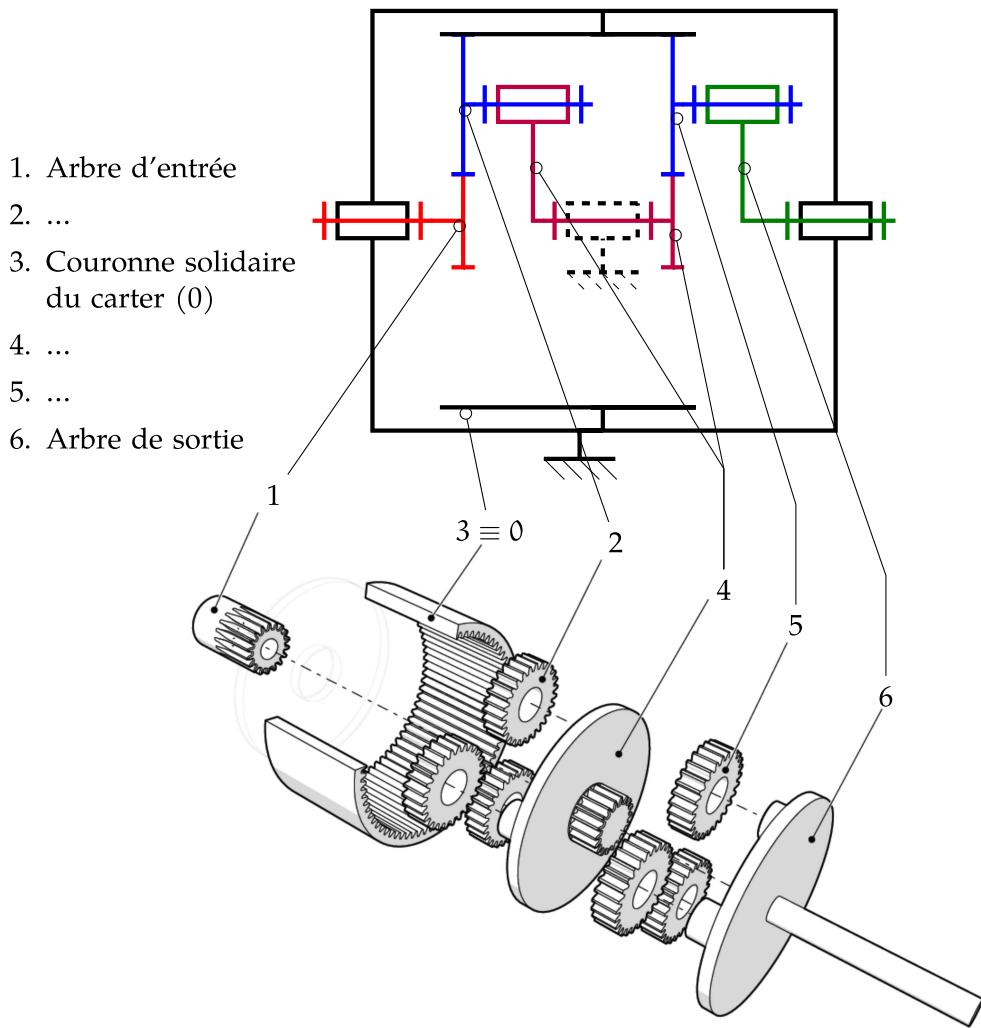


FIGURE 8 – Schéma éclaté du réducteur épicycloïdal double et schéma cinématique

Désignation	Numéro
Planétaire 1	
Porte satellite	
Satellite	
Planétaire 2	

.....  
 .....  
 .....  
 .....

Nous allons dans un premier temps étudier le train épicycloïdal d'entrée (figure 9) limités aux solides  $\{0 \equiv 3, 1, 2, 4\}$ . On pose :  $Z_1$  le nombre de dents de roue dentée 1 et respectivement  $Z_2$  et  $Z_3$  pour la roue dentée 2 et la couronne 3.

**Q12.** On se place dans le référentiel associé au solide 4  $(\vec{x}_4, \vec{y}_4, \vec{z}_0)$ . Déterminer le rapport de vitesse  $\frac{\omega_{3/4}}{\omega_{1/4}} = \lambda$  en fonction de  $Z_1$  et  $Z_3$ .

.....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....

**Q13.** Montrer que  $\frac{\dot{\omega}_{4/0}}{\omega_{1/0} - \omega_{4/0}} = -\lambda$ , en déduire  $r_1 = \frac{\dot{\omega}_{4/0}}{\omega_{1/0}}$  en fonction de  $\lambda$  puis en fonction de  $Z_1$  et  $Z_3$ .

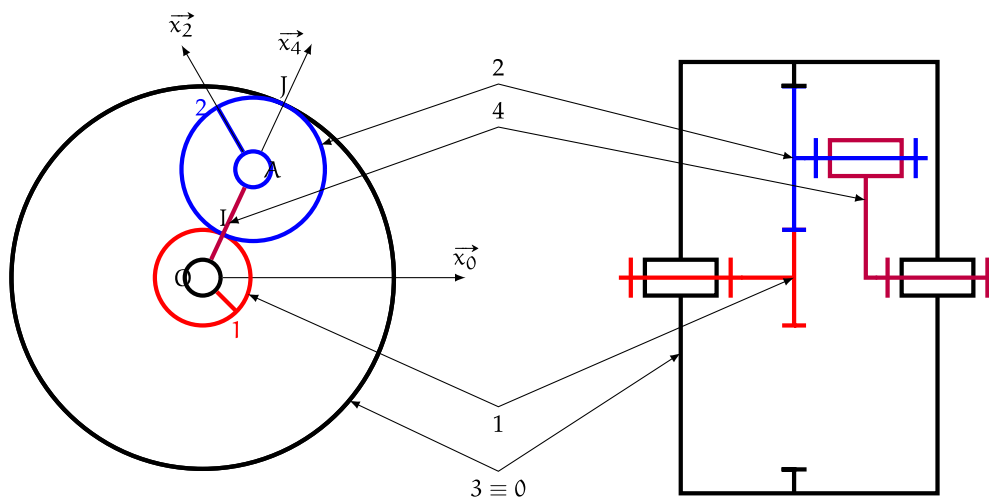


FIGURE 9 – Premier train épicycloïdal

.....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....

**Q14.** Que peut-on dire du rapport de vitesse du deuxième train  $r_2 = \frac{\omega_{6/0}}{\omega_{4/0}}$ , en déduire le rapport de réduction complet  $r = \frac{\omega_{6/0}}{\omega_{1/0}}$ .

.....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....

**Q15.** On souhaite  $r \approx \frac{1}{100}$  sachant que le pignon 1 comporte  $Z_1 = 18$  dents, déterminer  $Z_3$ .

.....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....

**C. Étude de la fonction « Reproduire les sensations d'un avion en vol »**

L'objectif de cette partie est de vérifier que le Cahier des Charges Fonctionnel permet au simulateur de reproduire correctement toutes les phases de vol de l'avion.

Extrait du CdCF du simulateur 3 axes « FLY-HO » :  
 « Reproduire les sensations d'un avion en vol »



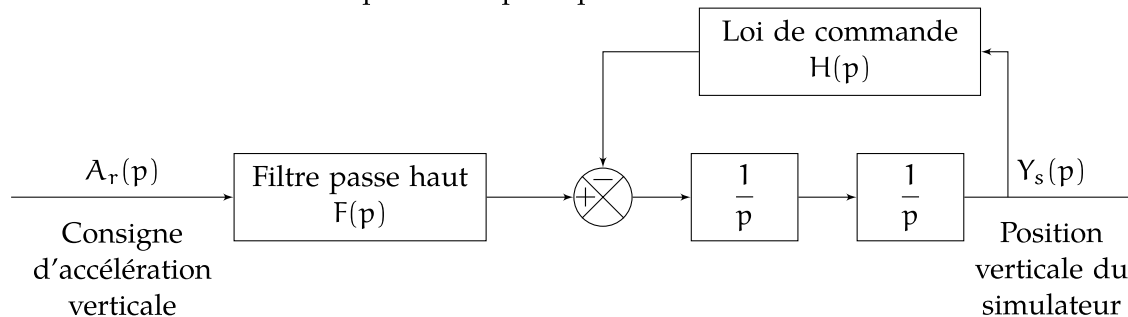
Critère	Niveau
Angles roulis et tangage du cockpit	+/- 0,35 rad (soit +/-20°)
Débattement vertical du cockpit	42 cm
Vitesses angulaires du cockpit	0,45 rad/s (soit 25°/s)
Vitesse verticale du cockpit	47 cm/s
Seuil de perception des accélérations	0,01 g

#### D. Étude d'une accélération verticale (turbulence)

En translation verticale, le simulateur doit être capable de reproduire des accélérations verticales transitoires pendant une fraction de seconde. Au delà c'est le système de vision avec les écrans LCD qui prend le relais et fait percevoir au pilote les mouvements de l'avion. La réponse du simulateur est constituée :

- d'un filtre passe-haut pour conserver la capacité de simuler des variations d'accélérations verticales rapides (comme les chocs lors du roulage sur terrain irrégulier en herbe par exemple)
- d'une loi de commande qui réalise la fonction « d'oubli » et qui permet d'assurer le retour du simulateur vers sa position moyenne. Cette fonction doit être réalisée sans que le pilote ne s'en aperçoive, or les seuils de perception des récepteurs sensoriels humains (oreille interne principalement) sont évalués à 0,01g au maximum.

Le schéma-bloc ci-dessous reproduit ce principe.



La fonction de transfert du filtre passe-haut est :  $F(p) = \frac{K_f \cdot p}{1 + \tau_f \cdot p}$ .

**Q16.** Déterminer  $F(j \cdot \omega)$  la fonction de transfert complexe du filtre, le module et l'argument puis le module  $A_{dB}$  en dB.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Le tracé du diagramme de Bode en gain du filtre passe-haut est représenté figure 10.

**Q17.**

**Q17a.** Déterminer puis tracer les asymptotes sur le diagramme, préciser les pentes et points caractéristiques.

**Q17b.** Déterminer par lecture de la courbe, les valeurs du gain statique  $K_f$  et de la constante de temps  $\tau_f$ .

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

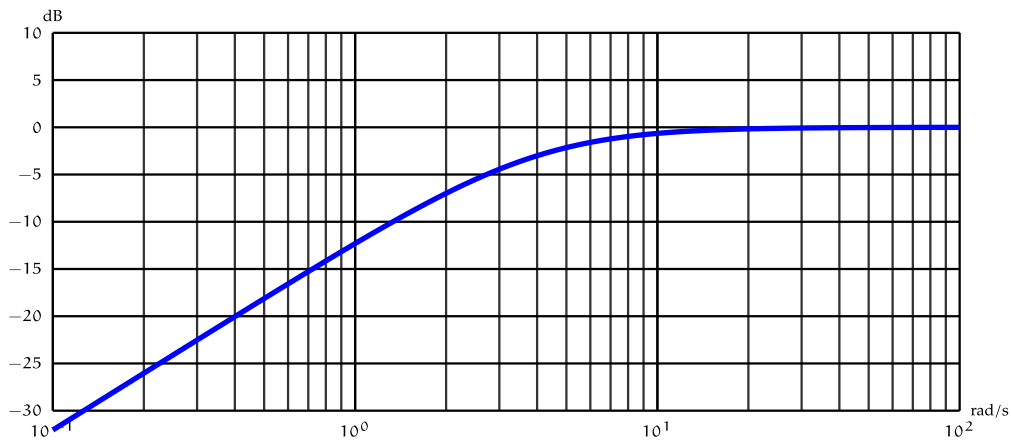


FIGURE 10 – Diagramme de Bode en amplitude du filtre

La loi de commande du simulateur est de la forme  $H(p) = 1 + T \cdot p$ .

**Q18.** Déterminer la fonction de transfert en boucle fermée  $\frac{Y_s(p)}{A_r(p)}$ .

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

La consigne d'accélération qui correspond à la simulation d'un échelon d'accélération vertical est  $a_r(t) = A_0 \cdot \mathcal{H}(t)$  avec  $\mathcal{H}(t)$  la fonction d'Heaviside et  $A_0 = 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

**Q19.** Déterminer  $Y_s(p)$ .

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Nous admettons que le système est stable.

**Q20.** Déterminer  $Y_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} (y_s(t))$ .

.....

.....

.....

.....

.....

.....

On considère pour une première étude approchée que  $T = 2 \text{ s}$  et  $Y_s(p) = \frac{4}{(p+1)^2 \cdot (p+4)}$ .

**Q21.** Justifier que  $Y_s(p) = \frac{4}{3 \cdot (p+1)^2} - \frac{4}{9(p+1)} + \frac{\alpha}{(p+4)}$ . Déterminer le coefficient  $\alpha$ .

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

On rappelle les transformées inverses suivantes :  $\frac{1}{p+a} \xrightarrow{L^{-1}} e^{-a \cdot t}$  et  $\frac{1}{(p+a)^2} \xrightarrow{L^{-1}} t \cdot e^{-a \cdot t}$ .

**Q22.** Déterminer  $y_s(t)$ .

.....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....

La réponse temporelle pour l'échelon est représenté sur la figure 11.

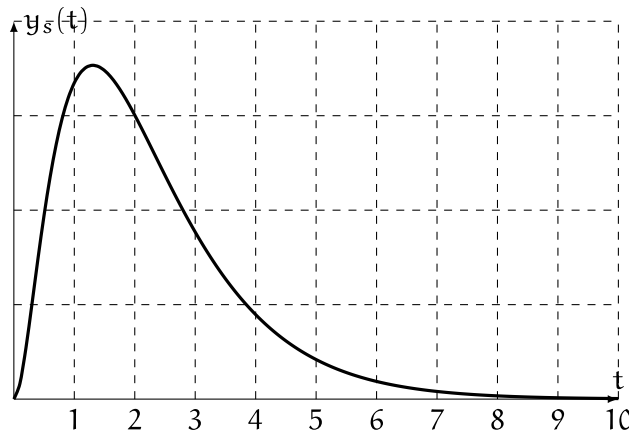


FIGURE 11 – Réponse temporelle

**Q23.** Sachant que  $y_s(t)$  peut être approché par  $y_s^*(t) = t \cdot e^{-t}$  déterminer la valeur maximale du déplacement et la vitesse maximale  $\dot{y}_s(t)$ . Conclure sur le respect du cahier des charges.

.....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....

**D.1. Étude des irrégularités lors du roulage sur une piste en herbe**

Lors du roulage sur une piste en herbe, outre l'effet de l'accélération longitudinale (vu précédemment) le simulateur doit aussi reproduire les accélérations verticales causées par les irrégularités du terrain.

Le profil de la piste est supposé constitué de bosses de 2cm régulièrement espacées de 10cm que l'on peut modéliser par le profil sinusoïdal de la figure 12.

Le déplacement vertical le long de la piste est décrit par  $y(x) = 1 + \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{0,1} \cdot x\right)$ .

La vitesse maximale de l'avion au décollage est de  $V_{max} = 120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ .

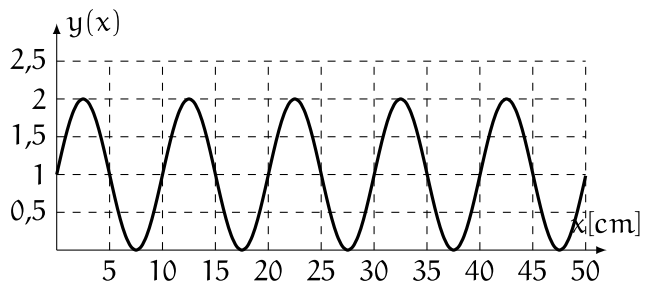


FIGURE 12 – Profil de la piste  $y(x)$

**Q24.** Exprimer le déplacement vertical  $y(t)$  en fonction du temps lorsque l'avion se déplace à la vitesse constante  $V$ . En déduire l'accélération verticale générée  $a_r(t) = \ddot{y}(t) = a_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)$  et exprimer  $a_0$  et  $\omega$  en fonction de  $V$ .