CENTRIFUGEUSE HUMAINE POUR LA RECHERCHE MÉDICALE ET L'ENTRAÎNEMENT DES PILOTES

1 Présentation

1.1 Introduction

Les avions modernes sont capables de fournir de fortes accélérations et des variations très brusques d'accélération qui provoquent la diminution de la pression sanguine dans le cerveau, ce qui peut entraîner des troubles de vision parfois accompagnés de perte de connaissance momentanée du pilote. De même, les astronautes, en phases de décollage et de retour sur terre, subissent des accélérations parfois très importantes.

Pour prévenir ces pertes de connaissance, qui peuvent devenir catastrophique, il est nécessaire d'entraîner les pilotes dans des centrifugeuses modernes qui recréent artificiellement ces accélérations élevées avec des mouvements appropriés de rotation.

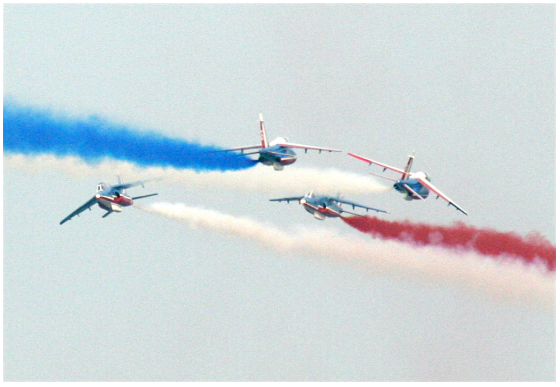

FIGURE 1 – La patrouille de France en vol (regroupement et évitement, deux phases éprouvantes pour le pilote

Les laboratoires de médecine aérospatiale utilisent les « centrifugeuses humaines » comme moyen d'essai pour rechercher les effets physiologiques des fortes accélérations sur l'équipage, pour développer des moyens de protection contre ces effets (combinaison anti-G par exemple), et pour mettre au point de nouvelles méthodes permettant d'augmenter la tolérance humaine aux accélérations (réglage de l'inclinaison des sièges pilote, exercices de contraction musculaire et de respiration).

1.2 Recherche médicale sur les effets des fortes accélérations

Les accélérations les plus fortes subies par les pilotes apparaissent pendant les phases de ressource (descente en piqué suivie d'une montée rapide) ; l'accélération est alors dans l'axe du corps humain, dirigée vers le bas et peut atteindre 8 où 9 fois l'accélération de pesanteur (on parle de 8 ou 9 g).

On constate une déformation du squelette ainsi qu'une descente du cœur dans la poitrine de l'ordre de 10 cm. Il y a aussi transfert du sang vers la partie inférieure du corps et diminution de la pression

sanguine dans le cerveau. Les pantalons anti-G traditionnels couvrent le bas du corps en maintenant une pression sur les membres inférieurs pour limiter ce transfert sanguin.

Des recherches récentes ont porté sur un système de respiration assistée, en forçant de l'air sous pression dans les poumons tout en appliquant une contre-pression sur la partie supérieure du corps grâce à une combinaison anti-G.

La mise sous pression de la combinaison est déclenchée par un régulateur de débit dont le temps de réaction est actuellement de une à quatre secondes après l'apparition des accélérations. La commande par microprocesseur des nouveaux régulateurs permettra de déclencher la mise sous pression en synchronisme avec l'apparition des accélérations.

La courbe figure 2 représente en fonction du temps, le niveau d'accélération (exprimé en nombre de G) toléré par un homme. Cette courbe résume les différents phénomènes physiologiques apparaissant au cours de la montée en accélération.

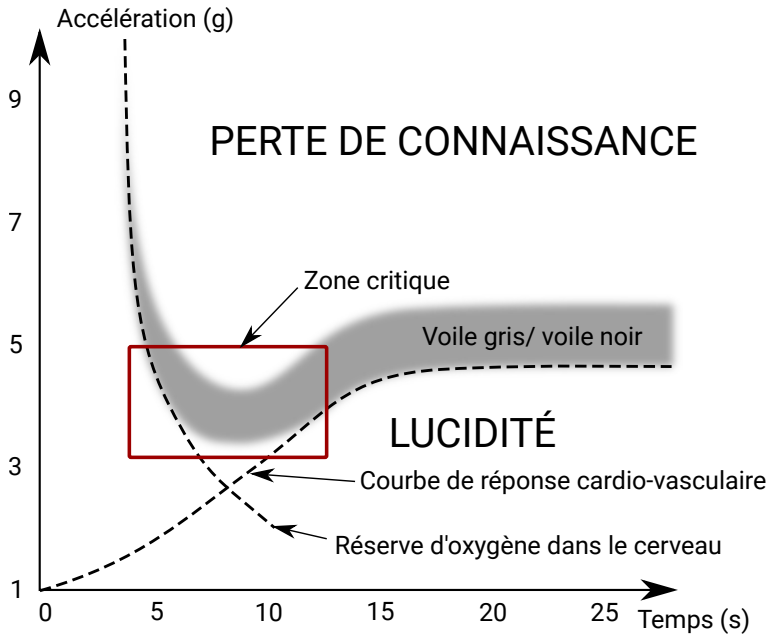

FIGURE 2 – Courbe d'acceptation physiologique de l'accélération

1.3 Entraînement des pilotes en centrifugeuse

Pour aider les pilotes à supporter les fortes accélérations, un entraînement à terre dans un système appelé « centrifugeuse » est efficace, moins coûteux qu'un entraînement en vol et plus sûr (figure 3).

La baisse de pression sanguine est d'abord sensible au niveau des yeux (voile gris puis voile noir), puis au niveau du cerveau. Ceci permet au pilote lors des montées progressives en accélération de ressentir d'abord les symptômes visuels environ 1g avant la perte de connaissance.

Grâce aux séances d'entraînement en centrifugeuse, les pilotes apprennent ainsi à reconnaître la nature des troubles de vision qu'entraînent les fortes accélérations et comment résister à cet effet par des manœuvres anti-G faisant appel à des efforts de contraction musculaires et à une respiration particulière.

Ceci est réalisé pendant un essai de montée en accélération avec un taux de montée de 0,1 G/s alors que le pilote appuie en permanence sur le bouton autorisant la poursuite de l'essai (figure 4).

FIGURE 3 – Centrifugeuse et pilote en situation d'entraînement

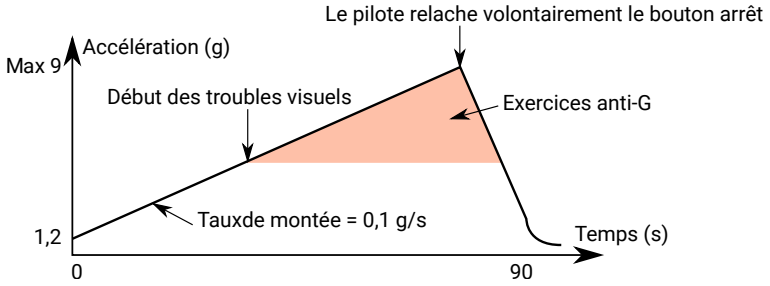

FIGURE 4 – Profil d'accélération en phase d'apprentissage; à l'apparition des symptômes (voile gris ou voile noir), le pilote relache le bouton d'arrêt.

Avec les exercices anti-G, un bon pilote doit augmenter son niveau d'accélération de 3 G au minimum.

À la fin de son entraînement, le pilote doit pouvoir exécuter le profil « suivi d'objectif » figure 5 : le pilote, tout en continuant à faire ses exercices de respiration et de contraction musculaire anti-G, commande lui-même la centrifugeuse en suivant une cible mobile qui s'affiche devant lui sur un écran.

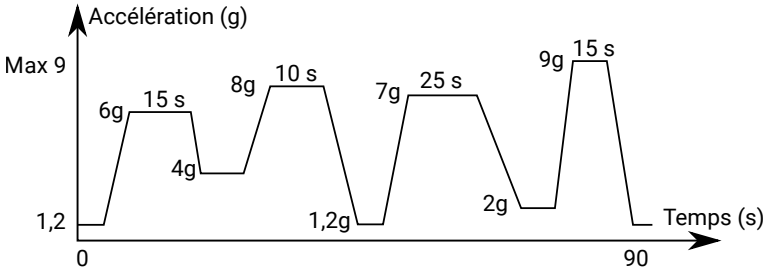

FIGURE 5 – Profil d'accélération type en phase de mission

2 Description des centrifugeuses Latécoère

Pour assurer l'entraînement des pilotes et des astronautes, des machines spéciales, les centrifugeuses humaines, ont été développées depuis les années 50. Deux générations de centrifugeuses seront étudiées dans la suite.

2.1 Centrifugeuse Latécoère de 1ère génération

La figure 6 illustre l'architecture matérielle de la centrifugeuse.

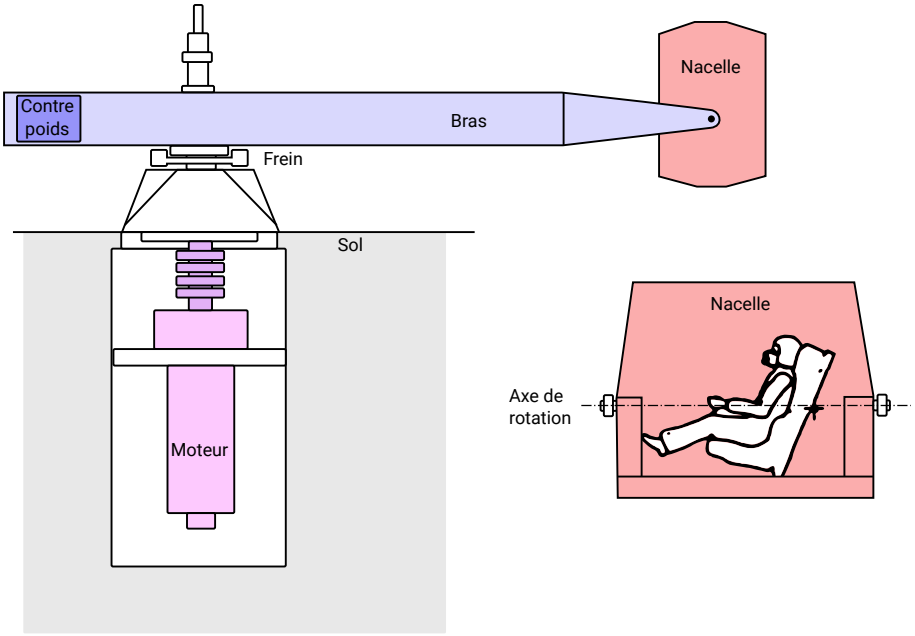

FIGURE 6 – Dessin de la centrifugeuse humaine 1ère génération

Elle comprends :

— un bras tournant autour d'un axe vertical et à l'extrémité duquel est montée une nacelle en balancier dont l'inclinaison est asservie à la direction de l'accélération résultante ;
— un ensemble de motorisation ;
— un pupitre de commande ;
— un logiciel de mise en œuvre ;
— une série d'équipements, d'installations de tests et de surveillance du pilote ;
— un siège d'avion avec son environnement (manche, manette des gaz...) ;
— un système de vidéo surveillance du pilote ;
— un ensemble phonie pour dialoguer avec le poste de commande ;
— un ensemble de mesure du champ visuel ;
— un système de test de poursuite de cible ;
— une commande d'accélération en nacelle ;
— des équipements médicaux (électrocardiographe, électroencéphalographe, mesure du débit cardiaque, mesure de la pression artérielle, ballons de mesure des gaz expirés, mesure du champ visuel) ;
— un système de climatisation de la nacelle.

2.2 Centrifugeuse Latécoère de 2ème génération

La figure 7 illustre l'architecture matérielle de la centrifugeuse.

— un bras en treillis (pour diminuer l'inertie) tournant autour d'un axe vertical et à l'extrémité duquel est montée une nacelle mobile suivant 2 axes de rotation perpendiculaires ; le mouvement de

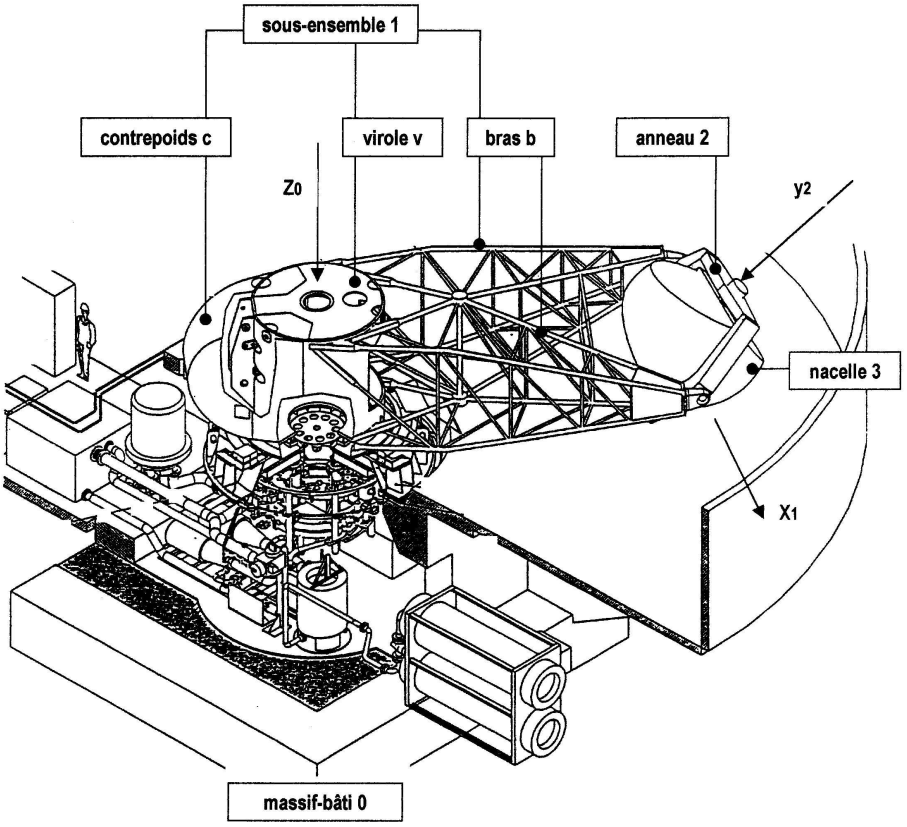

FIGURE 7 – Dessin de la centrifugeuse humaine 2ème génération

rotation de l'anneau par rapport au bras simulant le roulis de l'avion, et le mouvement de rotation de la nacelle par rapport à l'anneau simulant le tangage de l'avion ;

— un ensemble de motorisation (voir § 2.2) ;
— une salle de contrôle attenante complètement isolée pour les rayonnements électromagnétiques afin de supprimer les parasites reçus ou émis, et comprenant les 4 calculateurs de mise en œuvre. une série d'équipements, d'installations de tests et de surveillance du pilote semblables à ceux de la centrifugeuse de première génération.

2.3 Cahier des charges

Le diagramme des exigences partiel de la figure 8 exprime les éléments principaux du cahier des charges.

Il faut noter que le corps humain est habitué aux accélérations verticales car il subit l'accélération de la pesanteur en permanence et en marchant ou en sautant, le corps peut encaisser des accélérations transitoires de 2 à 3g. Par contre, il n'est pas habitué aux accélérations latérales, pour lesquel un faible niveau suffit pour devenir mortel. La centrifugeuse doit donc assurer une accélération exclusivement verticale pour le pilote.

Le tableau figure 9 décline différentes performances atteintes par les deux générations de centrifugeuses.

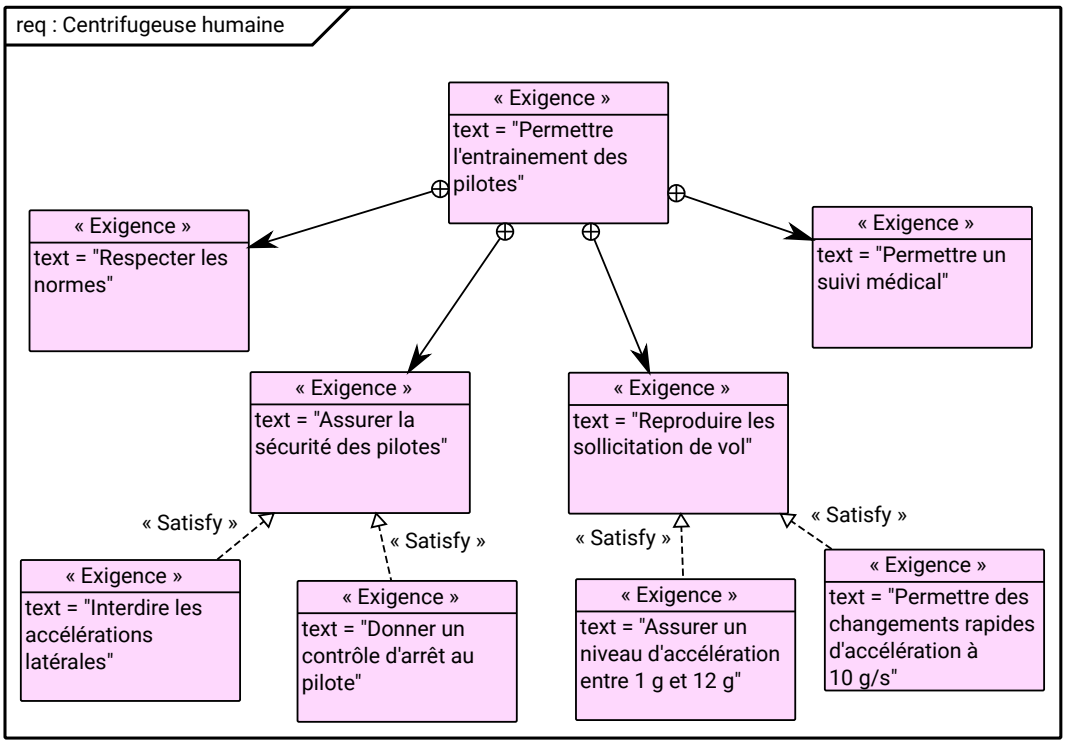

FIGURE 8 – Diagramme des exigences de la centrifugeuse

Caractéristiques	CENTRIFUGEUSE Latécoère 1001	CENTRIFUGEUSE Latécoère 101.3
Rayon du bras	6 m	8 m
Axes commandés Axe vertical Axe roulis Axe tangage	**2** oui oui **non**	**3** oui oui oui
Dimensions de la nacelle	1,3 x 2 x 3,1 m (~8 m^3)	2 x 2,6 x 3,2m (~10 m^3)
Accélération max.	10 g	15 g
Vitesse de rotation max.	0,7 tr / s	0,7 tr / s
Angle de roulis	0 – 90°	0 – 90°
Angle de tangage		0 – 360°
Montée en accélération	6 g / s	10 g / s
Accélération angulaire Axe vertical Axes roulis + tangage	3 rad / s^2	3,5 rad / s^2 10 rad / s^2 (limite physiologique)

FIGURE 9 – Performances des centrifugeuses de 1ère et 2ème génération

3 Validation des exigences relatives aux accélérations

Le paramétrage adopté est présenté par les figures 10 et 11.

Toutes les liaisons sont des liaisons parfaites (au sens énergétique) donc sans jeu ni frottement.

— le repère $R_0(\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$, considéré comme galiléen, est associé au massif bâti (0).

— l'ensemble (1), auquel est associé le repère $R_1(\vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1)$, est de longueur $\overrightarrow{OI} = -R\,\vec{y}_1$ ($R = 7,62$ m) et est en rotation d'axe $(O, \vec{z}_0)$ par rapport au bâti (0) ; sa position par rapport au bâti (0) est repérée par l'angle de lacet $\psi = (\vec{x}_0, \vec{x}_1) = (\vec{y}_0, \vec{y}_1)$;

— l'anneau (2), auquel on associe le repère $R_2(\vec{x}_2, \vec{y}_2, \vec{z}_2)$, est en rotation d'axe $(I, \vec{x}_1)$; sa position par

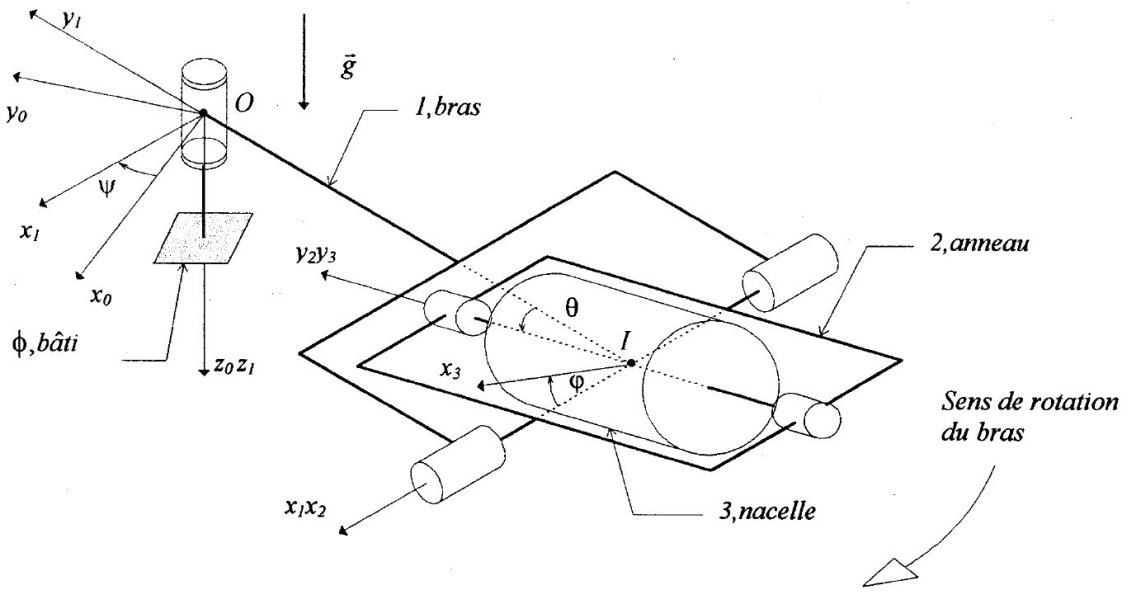

FIGURE 10 – Schéma cinématique et paramétrage du système étudié

rapport à l'ensemble (1) est repérée par l'angle de roulis $\theta = (\vec{y}_1, \vec{y}_2) = (\vec{z}_1, \vec{z}_2)$;

— la nacelle (3), à laquelle on associe le repère $R_3(\vec{x}_3, \vec{y}_3, \vec{z}_3)$, dans laquelle prend place le pilote, est en rotation d'axe $(I, \vec{y}_2)$ sur la centrifugeuse de 2ème génération ; sa position par rapport à l'anneau (2) est repérée par l'angle de tangage $\varphi = (\vec{z}_2, \vec{z}_3) = (\vec{x}_2, \vec{x}_3)$.

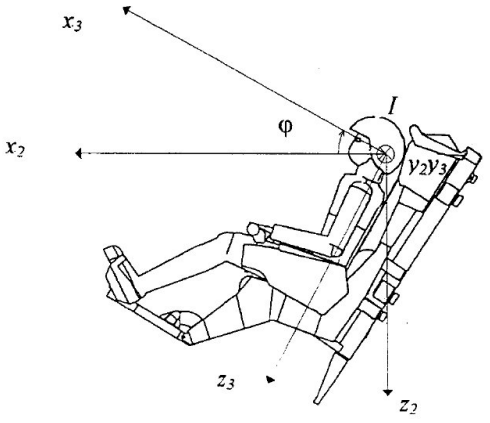

FIGURE 11 – Paramétrage du repère associé au pilote

Afin de respecter l'exigence « interdire les accélérations latérales », le Cahier des Charges impose de maintenir l'axe $(I, \vec{z}_3)$ de la nacelle (qui est l'axe de la colonne vertébrale du pilote), colinéaire avec l'accélération ressentie par le pilote, qui est la somme de l'accélération du pilote et de l'opposé de l'accélération de la pesanteur. Cette accélération ressentie est notée $\vec{G}$ et vaut $\vec{G} = \vec{a}(I, 3/0) - \vec{g}$ avec $\vec{a}(I, 3/0)$ accélération de I appartenant à 3 par rapport à 0. L'accélération de la pesanteur est donnée par : $\vec{g} = g\vec{z}_0$ avec $g = 9,82$ m/s^2.

Cette condition de colinéarité de $\vec{G}$ avec $\vec{z}_3$ impose alors des relations (ou consignes) entre l'angle θ et la dérivée $\dot{\psi}$ d'une part, et l'angle φ et les dérivées $\dot{\psi}$ et $\ddot{\psi}$ d'autre part.

Q1 Tracer les trois figures de changement de base décrivant les angles ψ, θ et φ.

3.1 Calcul de l'accélération ressentie par le pilote

On note $a_x = \vec{a}(I,3/0)\cdot\vec{x}_3$, $a_y = \vec{a}(I,3/0)\cdot\vec{y}_3$ et $a_z = \vec{a}(I,3/0)\cdot\vec{z}_3$ les coordonnées de l'accélération $\vec{a}(I,3/0)$ du point I dans le mouvement de (3) / (0) dans la base $(\vec{x}_3,\vec{y}_3,\vec{z}_3)$.

Q2 Exprimer les coordonnées G_x, G_y, G_z du vecteur $\vec{G}$ dans la base $(\vec{x}_3,\vec{y}_3,\vec{z}_3)$ en fonction de a_x, a_y, a_z, g et des paramètres angulaires ψ, θ et φ.

Q3 Déterminer le vecteur vitesse $\vec{V}(I,3/0)$ du point I dans le mouvement de (3) / (0).

Q4 Calculer l'accélération $\vec{a}(I,3/0)$ du point I dans le mouvement de (3) / (0).

Q5 Montrer alors que dans la base $(\vec{x}_3,\vec{y}_3,\vec{z}_3)$:

- $a_x = R\ddot{\psi}\cos\varphi + R\dot{\psi}^2\sin\theta\sin\varphi$
- $a_y = R\dot{\psi}^2\cos\theta$
- $a_z = R\ddot{\psi}\sin\varphi - R\dot{\psi}^2\sin\theta\cos\varphi$

3.2 Recherche des lois du mouvement

Pour la suite, on supposera que $-\pi/2 < \theta < \pi/2$ rad (ceci se vérifie sur le système réel).

Q6 Montrer alors que le respect du cahier des charges ($\vec{G}$ doit être colinéaire à l'axe $(I,\vec{z}_3)$) impose les deux relations : $g\tan\theta = R\dot{\psi}^2$ et $\sqrt{g^2+R^2\dot{\psi}^4}\tan\varphi = -R\ddot{\psi}$.

On se place maintenant en régime permanent à vitesse angulaire constante $\dot{\psi}$.

Q7 Quelle doit être la valeur de φ pour respecter le cahier des charges.

Q8 Justifier pourquoi l'industriel a introduit un troisième axe de rotation φ sur ses derniers modèles de centrifugeuse, au regard des exigences demandées.

Q9 Calculer l'inclinaison φ de la nacelle pour que l'accélération longitudinale G_x « ressentie » par le pilote reste nulle (calcul en fonction de $\ddot{\psi}$, $\dot{\psi}$ et θ).

Q10 Déterminer la loi de commande en vitesse du bras $\dot{\psi}$ permettant de respecter un profil d'accélération G_z donné avec les hypothèses suivantes :

— le troisième axe de rotation anneau / nacelle est asservi en position initiale ($\varphi = 0$) ;
— le deuxième axe de rotation bras / anneau est asservi pour imposer $G_y = 0$.

Q11 Calculer la vitesse angulaire constante $\dot{\psi}$ à établir pour soumettre le pilote à la valeur annoncée de 15.g (on prendra g = 9,81 m.s^{-2}).