

TD2 – Cinématique

CENTRIFUGEUSE HUMAINE pour la recherche médicale et l'entraînement des pilotes

1. Définition du besoin

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.

Pour prévenir ces pertes de connaissance, pour sauver à la fois l'avion et le pilote, il est nécessaire d'entraîner les pilotes de chasse dans des centrifugeuses modernes qui recréent artificiellement ces accélérations élevées avec des mouvements appropriés de rotation.

De même, 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 ou 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.

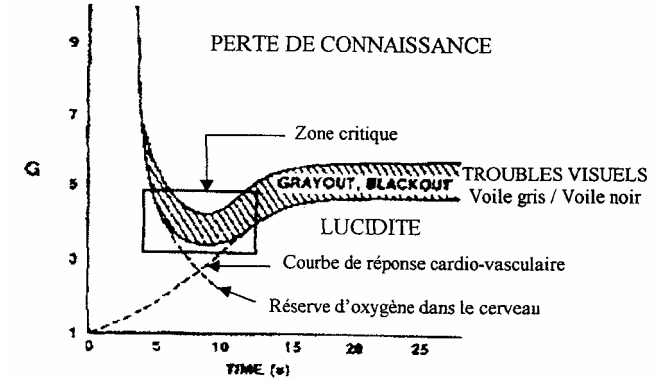
La mise sous pression de la combinaison est déclenchée par un régulateur de débit dont le temps de réaction est actuellement de une à quatre secondes après l'apparition des accélérations. La commande par microprocesseur des nouveaux régulateurs permettra de déclencher la mise sous pression en synchronisme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

Un autre phénomène provoqué par les vols à fortes accélérations est la désorientation spatiale, phénomène qui a été la cause de plusieurs accidents et qui se produit pendant les phases de manœuvre où le pilote perd les références visuelles et internes (il ne reconnaît plus le haut du bas, la gauche de la droite). Les recherches portent alors sur le développement de nouvelles techniques telles que le son 3D (émission de sons stéréo pour aider le pilote à retrouver rapidement ses références), commande vocale et systèmes intégrés au viseur de casque.

1.3. Entraînement des pilotes en centrifugeuse

Pour aider les pilotes à supporter les fortes accélérations, un entraînement à terre en centrifugeuse est efficace, moins coûteux qu'un entraînement en vol et plus sûr.

La courbe ci-dessous représente en fonction du temps, le niveau d'accélération (exprimé en nombre de G) toléré par un homme.

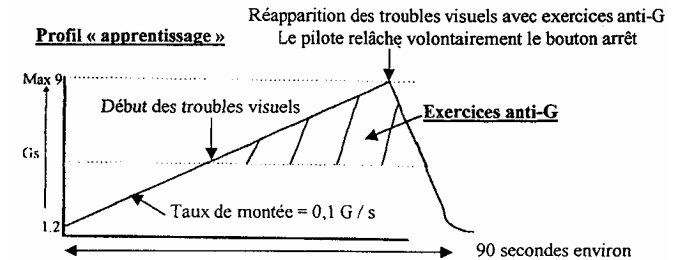


Cette courbe résume les différents phénomènes physiologiques apparaissant au cours de la montée en accélération.

On constate que 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 à des 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.

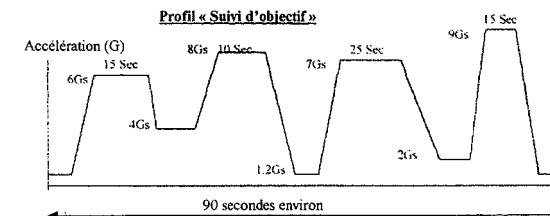
Ceci est réalisé pendant un essai de montée en accélération avec un taux de montée de 0,1 G/s alors que le pilote appuie en permanence sur le bouton autorisant la poursuite de l'essai.



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

Une fois cet essai réalisé, le pilote peut s'entraîner avec des profils à montée d'accélération plus rapide (3 à 6 G/s) et avec différents paliers d'accélération.

A la fin de son entraînement, il doit pouvoir exécuter le profil « suivi d'objectif » : 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.

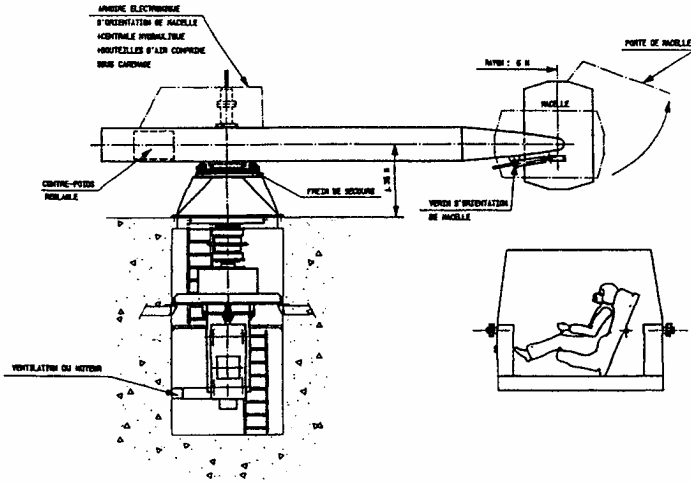


2. Description des centrifugeuses Latécoère

Pour assurer l'entraînement des pilotes, des machines spéciales, les centrifugeuses humaines, ont été développées depuis les années 50.

2.1. Architecture mécanique

2.1.1. Centrifugeuse des années 80 : LATECOERE 1001



Elle comprend :

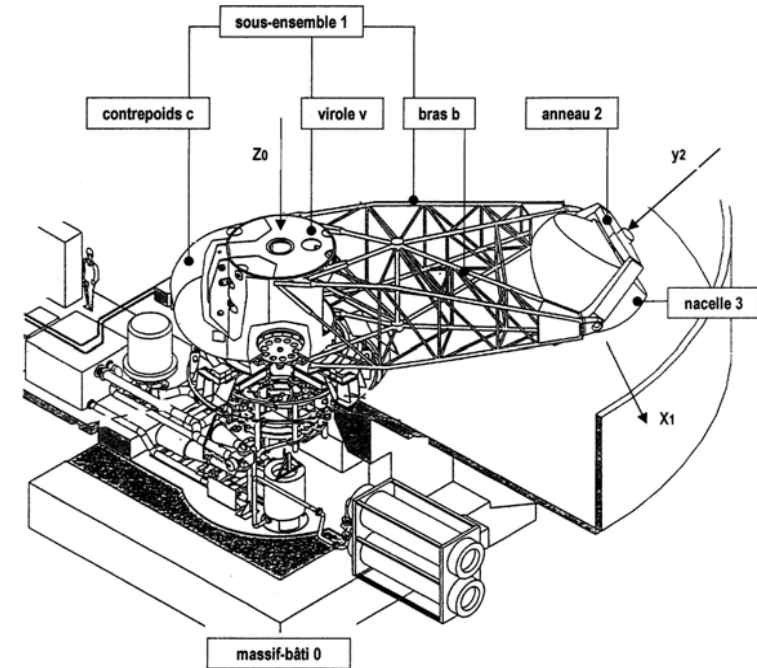
- un bras tournant autour d'un axe vertical et à l'extrémité duquel est montée une nacelle en balancier dont l'inclinaison est asservie à la direction de l'accélération résultante ;
- un ensemble de motorisation ;
- un pupitre de commande ;
- un logiciel de mise en œuvre ;
- une série d'équipements, 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 et tir au but ;
- 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.

2.1.2. Centrifugeuse des années 90: LATECOERE 101.3

Cette centrifugeuse a été installée en 1998 au Centre d'Essais en Vol de Bretigny sur Orge. Elle a nécessité la construction d'un bâtiment spécial, avec une enceinte circulaire de 25 mètres de diamètre, une salle de contrôle attenante, et un sas d'entrée permettant l'intervention rapide des secours en cas de nécessité.

Elle comprend :

- 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 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 1001.

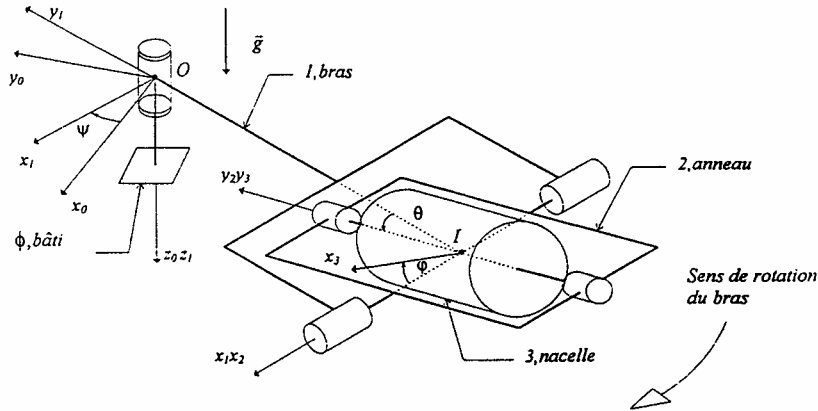


3. Performances

Caractéristiques	CENTRIFUGEUSE Latécoère 1001	CENTRIFUGEUSE Latécoère 101.3
Rayon du bras	6 m	8 m
Axes commandés	2	3
Axe vertical	oui	oui
Axe roulis	oui	oui
Axe tangage	non	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	3 rad / s ²	3,5 rad / s ²
Axes roulis + tangage		10 rad / s ² (limite physiologique)

TRAVAIL DEMANDE

1. Schéma de principe de la centrifugeuse 3 axes et paramétrage.



Le bras 1 est animé d'un mouvement de rotation par rapport au bâti autour de l'axe (O, \vec{z}_0) . On note $\psi = (\vec{x}_0, \vec{x}_1)$.

L'anneau 2 est animé d'un mouvement de rotation par rapport au bras 1 autour de l'axe (I, \vec{x}_2) . On note $\theta = (\vec{y}_1, \vec{y}_2)$.

La nacelle 3 est animé d'un mouvement de rotation par rapport à l'anneau 2 autour de l'axe (I, \vec{y}_2) . On note $\phi = (\vec{x}_2, \vec{x}_3)$.

Question 1 : Tracer les bases planes associées aux angles d'Euler ψ , θ et ϕ .

2. Calcul de l'accélération « ressentie » par le pilote.

C'est l'accélération ressentie au niveau de la tête du pilote qui est le paramètre important pour l'étude des phénomènes physiologiques. Pour simplifier les lois de commande de la centrifugeuse, on installe donc le siège pilote dans la nacelle de telle façon que le point I, centre de la tête du pilote se trouve aligné sur les axes de rotation de l'anneau par rapport au bras et de la nacelle par rapport à l'anneau.

On pose $\vec{IO} = R \cdot \vec{y}_1$

Question 2 : Calculer le vecteur vitesse $\vec{V}(I \in 3/0)$ du point I, centre de la tête du pilote par rapport au repère R_0 lié au bâti.

Question 3 : Calculer le vecteur accélération $\vec{\Gamma}(I \in 3/0)$.

Le théorème de la résultante dynamique appliqué au pilote conduit à écrire dans le repère Galiléen R_0 :

$$m \cdot \vec{\Gamma}(I \in 3/0) = m \cdot \vec{g} + \vec{F}_{\text{siège} \rightarrow \text{pilote}}$$

où $\vec{F}_{\text{siège} \rightarrow \text{pilote}}$ est la force de réaction exercée par le siège sur le pilote.

La force « ressentie » par le pilote sur son siège s'écrit donc :

$$\vec{F}_{\text{pilote} \rightarrow \text{siège}} = -\vec{F}_{\text{siège} \rightarrow \text{pilote}} = m \cdot [\vec{g} - \vec{\Gamma}(I \in 3/0)] = m \cdot \vec{G}$$

où $\vec{G} = \vec{g} - \vec{\Gamma}(I \in 3/0)$ est l'accélération équivalente « ressentie » par le pilote

Question 4 : Projeter le vecteur \vec{G} dans le repère R_3 lié à la nacelle.

Les 3 composantes obtenues représentent :

- l'accélération longitudinale G_x , ressentie par le pilote, dans les phases de freinage ou d'accélération de l'avion par exemple ;
- l'accélération latérale G_y , qui doit rester la plus faible possible car une accélération latérale de quelques g peut être mortelle ;
- l'accélération verticale G_z , pratiquement égale à l'accélération résultante. C'est à partir de cette composante, donnée dans les profils d'accélération d'entraînement des pilotes, que l'on commande la vitesse de rotation $\dot{\psi}$ du bras.

3. Recherche des Lois du Mouvement.

Question 5 : Calculer l'inclinaison θ de l'anneau pour que l'accélération latérale G_y « ressentie » par le pilote reste nulle. Cette relation sera donc la loi de commande (ou consigne) de l'asservissement de position de l'anneau par rapport au bras.

Question 6 : Montrer que dans les phases de mouvement uniforme du bras ($\dot{\psi} = \text{constante}$), il n'est pas nécessaire d'incliner la nacelle par rapport à l'anneau pour conserver une accélération longitudinale G_x nulle. Justifier pourquoi l'industriel a introduit un troisième axe de rotation ϕ sur ses derniers modèles de centrifugeuse.

Question 7 : Calculer l'inclinaison ϕ de la nacelle pour que l'accélération longitudinale G_x « ressentie » par le pilote reste nulle (calcul en fonction de $\dot{\psi}$, $\ddot{\psi}$ et θ).

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 ($\phi = 0$) ;
- le deuxième axe de rotation bras / anneau est asservi pour imposer $G_y = 0$;