



SPECIFICATIONS TECHNIQUES DU DISPOSITIF DE MOUVEMENT CABINE D'UN SIMULATEUR DE VOL

1. NECESSITE DU MOUVEMENT DE LA CABINE.....	2
2. LA PERCEPTION DES ACCELERATIONS.....	3
1.1. LE SYSTÈME VESTIBULAIRE.....	3
1.2. LES CANAUX SEMI-CIRCULAIRES.....	4
1.3. L'OTOLITHE.....	4
1.4. LES SEUILS DE PERCEPTION.....	5
1.4.1. Principe de la mesure.....	5
1.4.2. Seuils de perception des accélérations angulaires.....	5
1.4.2.1. Seuils suivant l'axe Z.....	5
1.4.2.2. Seuils suivant l'axe X (roulis).....	6
1.4.2.3. Seuils suivant l'axe Y.....	6
1.4.3. Seuils de perceptions des accélérations linéaires.....	6
1.4.3.1. Seuils suivant l'axe X et l'axe Y.....	6
1.4.3.2. Seuils suivant l'axe Z.....	6
1.4.4. Combinaisons d'accélérations.....	7
3. CHOIX DES MOUVEMENTS.....	7
1.5. PRÉSENTATION.....	7
1.6. AVION DE TRANSPORT.....	7
1.7. LA RESTITUTION DES ACCÉLÉRATIONS.....	8

NECESSITE DU MOUVEMENT DE LA CABINE

L'environnement recréé dans le poste de Pilotage d'un simulateur de vol doit être le plus proche possible de celui que procure au pilote l'avion lui-même.

Cet environnement est multiple et se manifeste au niveau des organes de perception du pilote.

Nous trouvons les perceptions suivantes :

- les perceptions visuelles
- les perceptions auditives
- les perceptions tactiles
- la perception des accélérations.

A partir de ces informations, le pilote agit sur les commandes de vol pour obtenir l'évolution désirée suivant le diagramme suivant :

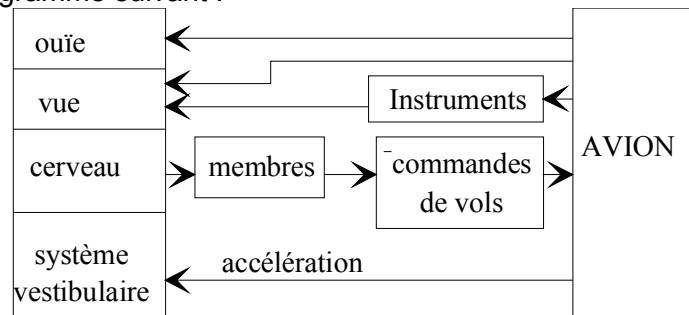


figure 1

Appareil vestibulaire : partie de l'oreille interne constituée par les canaux semi-circulaire, l'utricule (partie supérieure) et le saccule (partie inférieure), appareil de l'équilibre.

A partir de ce diagramme, nous pouvons faire les remarques suivantes :

1) Les informations principales (informations visuelles et informations d'accélération) sont perçues par le pilote en des temps différents.

- les accélérations sont perçues directement par le système vestibulaire (ceci à travers sa fonction de transfert et ses seuils que nous verrons au chapitre suivant). Elles conditionnent la rapidité des réactions du pilote.

- les informations visuelles

a) fournies par les instruments.

Elles représentent des paramètres (vitesses, altitude) qui sont obtenus à partir des accélérations avec une ou deux intégrations. Ce sont donc des informations différées.

b) fournies par la vision extérieure.

La vision, à partir du poste de pilotage, de repères extérieurs (horizon, position de l'avion par rapport à l'axe de la piste d'atterrissage, etc.) fournit les informations (dans le cas du pilotage avec visibilité) les plus précieuses car elle permet de détecter des mouvements dus à des accélérations inférieures aux seuils de perception du système vestibulaire : elle conditionne la précision à long terme du pilotage.

2) L'absence des informations d'accélération qui constituent dans la boucle de pilotage des termes d'avance de phase par rapport aux indications instrumentales, conduira dans un

simulateur de « vol aux instruments » à une réponse du pilote toujours retardée par rapport à sa réponse dans une situation réelle identique.

Dans le cas du simulateur, le diagramme précédent devient

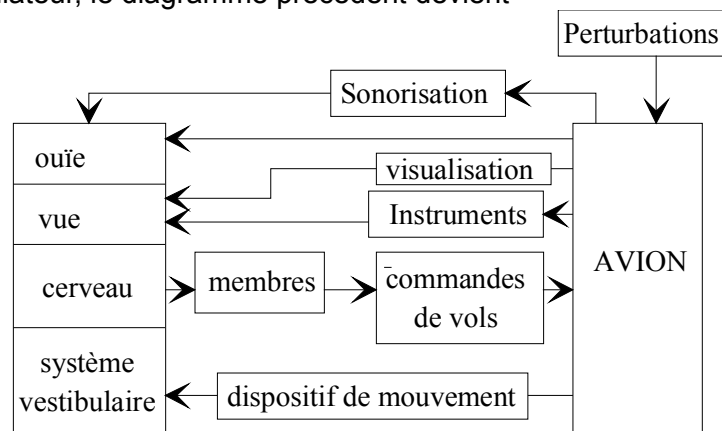


figure 2

Nous constatons que l'accélération perçue, par le système vestibulaire à partir d'une action sur les commandes de vol est restituée après un certain temps dû au temps de calcul, au codage/décodage et au dispositif de mouvement de la cabine. Il importe donc de réduire au minimum ces retards parasites.

Notons également que le dispositif de mouvement ne peut restituer toutes les accélérations (long terme, sur long distance...).

LA PERCEPTION DES ACCELERATIONS

Les paragraphes ci-après sont extraits du document "The vestibular system and human dynamic space orientation" de Jacob L. MEIRY.

1.1. LE SYSTÈME VESTIBULAIRE

La perception des accélérations par le corps humain est réalisée par le système vestibulaire. Ce système se compose de deux ensembles de capteurs dans chaque oreille interne. Chacun de ces ensembles est composé de capteurs d'accélérations angulaires et linéaires liés entre eux suivant la figure 3.

Nous trouvons :

- les canaux semi-circulaires pour les accélérations angulaires
- l'otolithe pour les accélérations linéaires.

Ces organes sensibles sont montés sur un plan incliné de 25° à 30° avec l'horizontale suivant la figure ci-dessous.

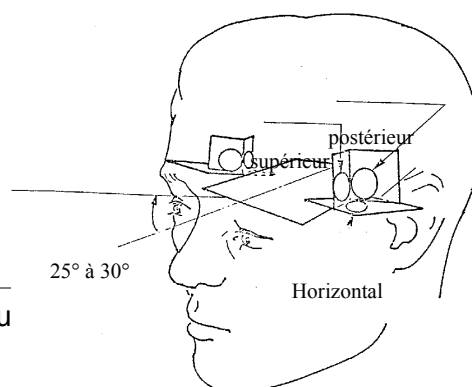


figure 3

1.2. LES CANAUX SEMI-CIRCULAIRES

Ces canaux sont les détecteurs d'accélérations angulaires. Ils sont liés suivant la disposition ci-dessous.

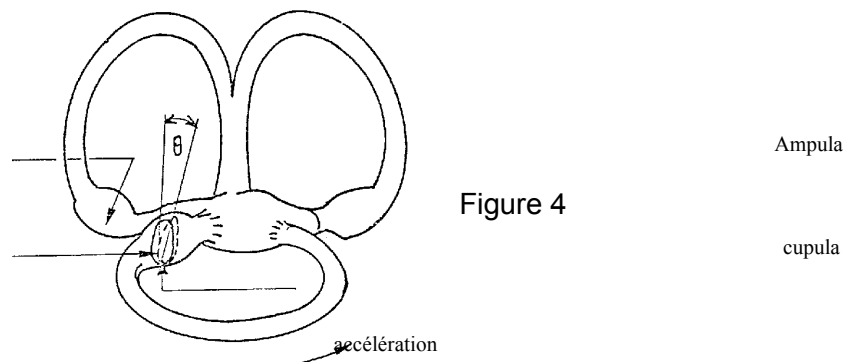


Figure 4

Ces canaux sont remplis d'un fluide appelé endolymphe et sont reliés en un canal central appelé le vestibule.

Chaque canal comporte une partie enflée qui s'appelle "ampula" dans laquelle est disposé un petit volet appelé "cupula".

Lorsque l'un des canaux est soumis à une accélération angulaire suivant un axe passant par son centre, le mouvement résultant du liquide provoque un déplacements $\ddot{u}$ du volet.

C'est la valeur de cet angle qui constitue pour le cerveau l'information d'accélération.

- La fonction de transfert qui lie $\ddot{u}$ à accélération a la valeur suivante :

$$\frac{\theta}{\gamma} = \frac{K}{p^2}$$

1.3. L'OTOLITHE

C'est le détecteur d'accélérations linéaires. Il est logé dans l'Utricule qui se compose d'une partie inférieure appelée "Macula" recevant la partie mobile "otolithe" suivant la figure

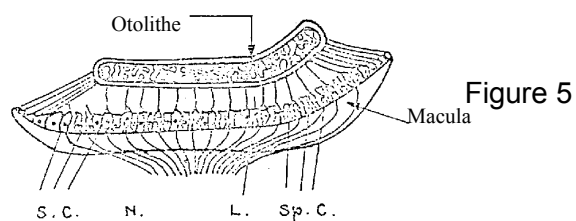


Figure 5

L'otolithe" est reliée au "Macula" par des cellules lui permettant ainsi un léger débattement. Lorsqu'une accélération est appliquée à l'otolithe", la force correspondante provoque des tensions dans les cellules nerveuses de liaison donnant ainsi la sensation de l'accélération.

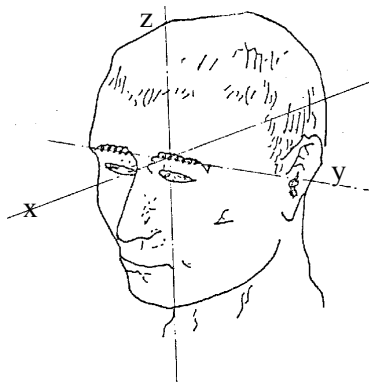
L'ensemble est incliné de 25 à 30° par rapport à l'horizontale permettant ainsi de différencier les accélérations verticales et horizontales.

Nous retrouvons une fonction de transfert du 2ème ordre entre la perception et l'accélération appliquée de la forme :

$$H(p) = \frac{K}{(10p + 1) \cdot (0,66p + 1)}$$

1.4. LES SEUILS DE PERCEPTION

1.4.1. Principe de la mesure



Les seuils sont mesurés suivant des axes tels que représentés ci-dessous.

Il est à remarquer que les valeurs des seuils des paragraphes suivants sont des valeurs moyennes car il y a dispersion d'un individu à l'autre, pour un même sujet suivant son état de fatigue, son environnement (attention attirée par une visualisation par exemple) ...

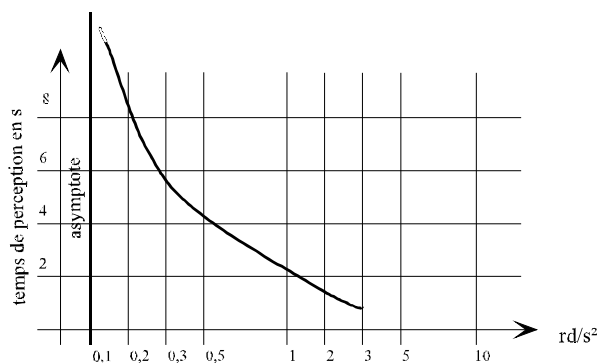
1.4.2. Seuils de perception des accélérations angulaires

Le phénomène de seuil est dû à la déflexion minimum du volet « cupula ». Une accélération prolongée inférieure au seuil n'est pas détectée par l'individu.

Lorsque la valeur de cette accélération croît, le sujet détecte l'accélération après un certain temps de perception qui est lié à la valeur de l'accélération suivant les courbes ci-après.

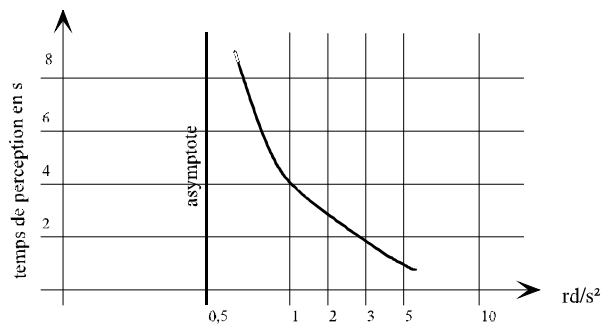
Il est, à noter cependant, que lorsque l'accélération angulaire appliquée pendant plusieurs dizaines de secondes, le volet du cupula retrouve sa position initiale, c'est-à-dire qu'il y a accoutumance aux accélérations angulaires.

1.4.2.1. Seuils suivant l'axe Z



Le seuil de perception pour des accélérations angulaires suivant l'axe Z de la figure varie entre 0,1 et 0,2 rd/s² pour des accélérations prolongées.

1.4.2.2. Seuils suivant l'axe X (roulis)



La courbe à la même allure générale, mais le seuil de perception pour les accélérations prolongées est d'environ 0,5 rd/s².

1.4.2.3. Seuils suivant l'axe Y

Même allure que les seuils suivants l'axe X.

1.4.3. Seuils de perceptions des accélérations linéaires

Nous retrouvons le même phénomène que pour les accélérations angulaires, c'est-à-dire que les accélérations ne sont détectées qu'après un certains temps d'application variable avec la valeur de l'accélération. Il semble cependant que le système est plus sensible aux variations d'accélération qu'à l'accélération elle-même. Ce nouveau seuil est de l'ordre de 0,01 à 0,03 g/s

D'autre par, il ne semble pas exister de phénomène d'accoutumance pour les accélérations linéaires.

1.4.3.1. Seuils suivant l'axe X et l'axe Y

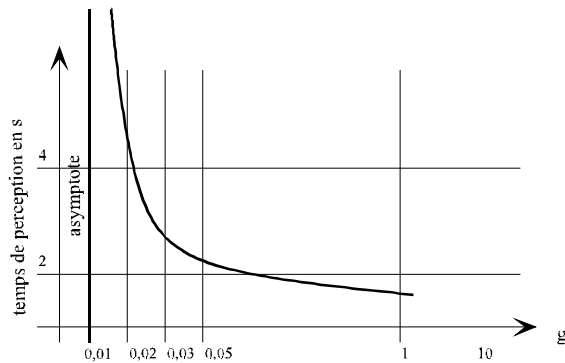


figure 9

Nous trouvons une valeur asymptotique de l'ordre de 0,01 g.

1.4.3.2. Seuils suivant l'axe Z

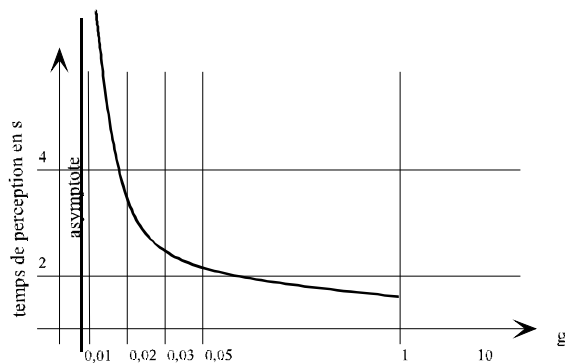


Figure 10

Nous trouvons une valeur asymptotique de l'ordre de 0,006 g.

1.4.4. Combinaisons d'accélération

Dans les cas d'accélération combinées il semble que l'information d'accélération angulaire surpasse l'information linéaire, ce qui rend délicates certaines manoeuvres de simulation (incliner une cabine suivant l'axe de tangage pour donner une composante la pesanteur qui simulera une accélération longitudinale permanente peut donner lieu à une fausse sensation car le système vestibulaire ne détectera que l'accélération de tangage pendant la manoeuvre).

CHOIX DES MOUVEMENTS

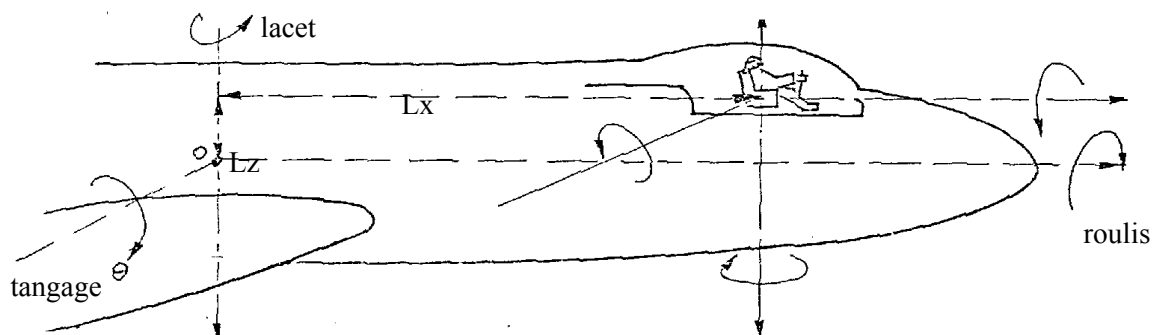
1.5. PRÉSENTATION

Pour déterminer les accélérations que devra restituer le dispositif de mouvement, il est nécessaire d'analyser les accélérations rencontrées sur les différents avions et noter les mouvements et accélérations prédominants.

Notons cependant que les accélérations restituées devront être celles du compartiment de vol et plus particulièrement celle du système vestibulaire pilote et non les accélérations du centre de gravité de l'avion.

1.6. AVION DE TRANSPORT

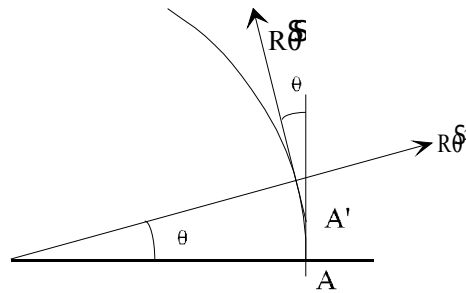
C'est le cas d'avion du type BOEING 747 où nous trouvons le poste de pilotage très éloigné du centre de gravité.



Les mouvements de l'avion peuvent se décomposer en deux types

- les mouvements du centre de gravité
- les mouvements autour du centre de gravité.

Les mouvements du centre de gravité sont des translations suivant les axes X, Y, Z que nous retrouvons au poste de pilotage. Les mouvements autour du centre de gravité se traduisent au niveau du poste de pilotage par une combinaison d'accélération linéaires et angulaires.



A une rotation $\ddot{\theta}$ autour d'un axe quelconque (tangage, roulis, lacet) correspond au poste de pilotage une accélération angulaire $\ddot{\theta}$, mais nous constatons l'apparition d'accélération linéaires.

$R\ddot{\theta}$ et $R\dot{\theta}^2$ or nous pouvons avoir une accélération angulaire inférieure à son seuil de perception mais qui peut induire des accélérations linéaires supérieures aux seuils correspondants.

Par exemple soit une rotation avec une valeur $\ddot{\theta} = 0,1 \text{ rad/s}^2$.

Les accélérations linéaires induites deviennent

$$\text{si } R = 1 \text{ m} \quad R\ddot{\theta} = 0,1 \text{ m/s}^2 \text{ soit } 0,01g$$

C'est-à-dire sensiblement le seuil suivant les axes X et Y.

$$\text{si } R = 20 \text{ m} \quad R\ddot{\theta} = 0,2g$$

Cas des mouvements de l'avion autour de l'axe Z (lacet) ceci sera perçu par le pilote comme une accélération latérale.

si $R = 3 \text{ ou } 4 \text{ m}$ (rotation en roulis) $R\ddot{\theta} = 0,03g$

ceci sera encore perçu par le pilote comme une accélération latérale.

Nous constatons donc que, dans le cas d'un avion de transport, les accélérations ressenties au poste de pilotage sont essentiellement des accélérations linéaires. Un dispositif de restitution de mouvement pour un tel avion, devra donc effectuer la simulation des mouvements suivants les axes de rotations et les déplacements soit six degrés de liberté.

Nous pouvons également faire la remarque suivante : les accélérations linéaires n'ont pas les mêmes valeurs suivant les axes :

- importante suivant l'axe Z (facteur de charge)
- importante suivant X (poussée freinage)
- plus faible suivant Y (dérapage, mouvement induit par le roulis et le lacet) .

Pour qu'une accélération faible soit perçue, il faut qu'elle soit appliquée plus longtemps qu'une accélération plus élevée (voir courbe des temps de perceptions) nous pouvons en déduire qu'il faudra l'appliquer plus longtemps ce qui peut nécessiter un débattement du dispositif plus important (accélérations latérales).

1.7. LA RESTITUTION DES ACCÉLÉRATIONS

Le besoin du mouvement cabine est de restituer les accélérations d'un avion virtuel au pilote du simulateur de vol. (perception des accélérations)

Le problème :

Un avion en vol a des déplacements de plusieurs centaines ou milliers de kilomètres dans un plan horizontal, et de plusieurs kilomètres dans le plan vertical avec une liberté de rotation complète. Il n'est évidemment pas possible dans une simulation de vol, d'assurer une restitution complète de toutes les accélérations, ce qui nécessiterait des déplacements prohibitifs.

Une solution :

Aussi, la solution généralement adoptée, consiste à simuler le début de l'accélération pendant un temps suffisant pour qu'elle soit perçue par le pilote (d'où élaboration de la réaction adéquate) l'accélération est ensuite ramenée à zéro (avec sa dérivée inférieure au seuil de 0,01 à 0,02g/s³) puis inversée pour ramener le compartiment de vol dans une position médiane prêt à simuler de nouvelles accélérations (cette inversion étant inférieure au seuil de perception).

Nous retrouvons ces considérations dans l'exemple ci-dessous :

