

Aéro-médecine

par le Dr Christophe Lamaison

Physiologie humaine et voltige

Introduction

Un livre sur les avions Mudry va évoquer chez un pilote voltigeur des moments de joie et d'émotion intenses. Le non-voltigeur aura, quant à lui, tendance à ne plus le rester très longtemps. Derrière l'élégance classique du CAP 10B ou la ligne racée du CAP 232 se cachent de formidables machines. Une fois sanglé dans l'habitacle, le pilote pénètre dans un nouvel univers. Il va comprendre très vite qu'on ne fait pas varier un vecteur vitesse impunément. Dans le monde des accélérations, son organisme va le surprendre par ses réactions. Par la même occasion, il va se rendre compte que les organes des sens créés par Mère Nature pour vivre sur le plancher des vaches seront pour certains peu fiables sinon d'interprétation dangereuse en certaines circonstances. Ce chapitre, qui ne se veut pas exhaustif, permettra au pilote voltigeur confirmé de mieux comprendre certains faits bien connus de lui, tandis que le pilote débutant sera averti et donc plus à même d'anticiper les effets physiologiques de la voltige aérienne. Or on sait combien l'anticipation est un maître mot en aviation.

Voltige et accélération

L'on pourrait aussi intituler ce chapitre : « La voltige, un vol à voiles ».

Les accélérations ont fait l'objet de dizaines d'articles. En fait, tant qu'elles ne sont que des sensations pour le pilote, elles font partie du plaisir de voltiger. Leur étude est par contre d'un intérêt majeur lorsqu'elles sont susceptibles de compromettre la sécurité du vol, voire la vie du pilote.

Les accélérations longitudinales dites Gz se divisent en + Gz dirigées pour un pilote assis du siège vers la tête et - Gz en sens inverse. Le pilote va en fait ressentir non l'accélération, mais la force inverse qui permet au mobile de rester en équilibre : la force d'inertie. Ainsi, dans une boucle, l'accélération + Gz est orientée vers le centre de la boucle. Le pilote ressent la force d'inertie de sens inverse tête vers siège qui le plaque au siège avec plus ou moins d'intensité.

A - Accélérations + Gz

Passer d'une accélération de la pesanteur de 1G à une accélération de 4G peut se faire en plus ou moins de temps. Cette vitesse d'établissement de l'accélération s'appelle le Jolt et il s'exprime en G/s (ou m/s/s).

Si l'on prend une vitesse d'établissement lente de l'accélération de 0,2 jolt pour un sujet sain en état de relaxation musculaire ne portant pas de vêtement antiG et n'exécutant pas de manœuvre de protection, voyons ce que ressent ce sujet.

A1 - Effets subjectifs

- 1G : sensation ordinaire de son propre poids.
- 2G : compression modérée sur le siège, lourdeur de la tête et des membres (virage à 60° d'inclinaison).
- 3G : sensation d'extrême lourdeur des membres et du corps.
- Vers 4G : apparition du voile gris, perte de la vision périphérique.
- Vers 5G : apparition du voile noir : perte **totale** de la vision, persistance de l'audition.
- Vers 5,5G : perte de connaissance.

Il faut savoir qu'après arrêt de l'accélération, le retour à la conscience complète peut nécessiter de 15 à 60 secondes. Pendant cette période peut exister une désorientation dangereuse (lire pour cela le récit de Jean-Pierre Otelli à la fin du chapitre CAP 10B).

A2 - Effets objectifs

Le poids des colonnes sanguines est modifié par l'accélération. En effet $P = mg$ où P est le poids, m la masse et g ordinairement l'accélération de la pesanteur (9,81 m/s). Dans le cas qui nous intéresse, g est multiplié par 2, 3, 4 ou 5. Donc le poids du sang augmente, celui-ci est donc attiré vers le bas de l'organisme.

De ce fait, les pressions sanguines au-dessus du cœur diminuent tandis qu'elles augmentent au-dessous du cœur. Pour maintenir le débit cérébral, un réflexe se met en jeu qui augmente la fréquence cardiaque (linéairement jusqu'à 7G) d'où tachycardie. La pression sanguine des sommets pulmonaires diminue, le sang est donc oxygéné seulement en bas des poumons donc moins bien. D'où une tentative de réponse par une augmentation de la fréquence respiratoire : tachypnée.

Dans le même temps, l'acuité visuelle diminue. Au-delà de 6-7G, de petites taches hémorragiques (pétéchies) peuvent apparaître dans la moitié inférieure du corps.

A l'arrêt de l'accélération, il est fréquent d'observer un ralentissement du rythme cardiaque ou bien des troubles du rythme de courte durée.

A3 - Explication des voiles gris et noir

Il règne dans le globe oculaire un tonus (une pression) de 20 mm de mercure, un peu comme dans un ballon.

La colonne de sang, située entre le cœur (qui en fin de contraction exerce une pression de 120 mm de mercure) et l'œil, mesure 30 cm. Le volume de sang ainsi représenté exerce une pression hydrostatique vers le bas, de par son poids, de 22 mm de mercure. Pour perfuser les artères rétinienne qui amènent l'oxygène aux cellules optiques (sans lequel la vision est impossible), il existe un gradient (une différence) qui doit être non nul, entre deux pressions de sens opposés.

La première de ces pressions est la pression artérielle, grâce à laquelle le sang circule dans les vaisseaux.

La deuxième est constituée par la somme de la pression sanguine hydrostatique (le poids du sang) et de la pression qui règne à l'intérieur du globe oculaire, que l'on appelle donc le tonus oculaire.

A 1G ce gradient est de $120 - (22 + 20) = 78 \text{ mmMg}$, il est favorable, la rétine est irriguée.

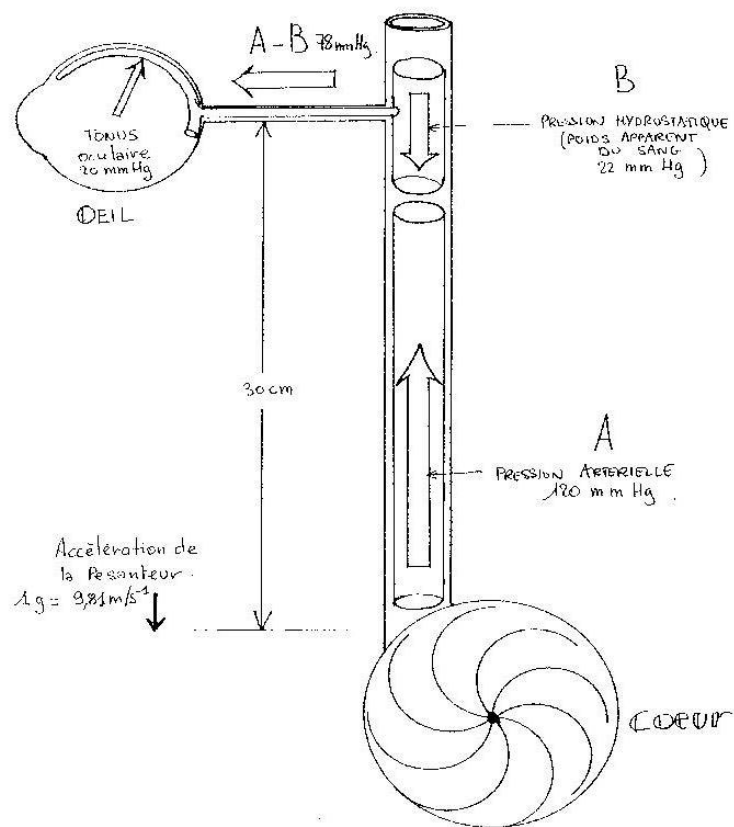


Schéma 1 : Gradient à 1G

A 4,5G la pression de la colonne de sang cœur-cerveau-œil est multipliée par 4,5 soit $22 \times 4,5$ le gradient devient $120 - (22 \times 4,5) + 20 \neq 0$, la rétine commençant à être déperfusée dans la partie la plus éloignée, le rétrécissement concentrique apparaît, c'est le voile gris. Au delà de 5G, il n'y a plus d'apport de sang donc d' O_2 aux cellules rétinienne, la vision est interrompue, c'est le voile noir.

Si l'on regarde le tableau 1, on s'aperçoit que dans les artères de la base du cerveau règne une pression de 10 mm de mercure. La circulation des aires du cortex dédiées à la

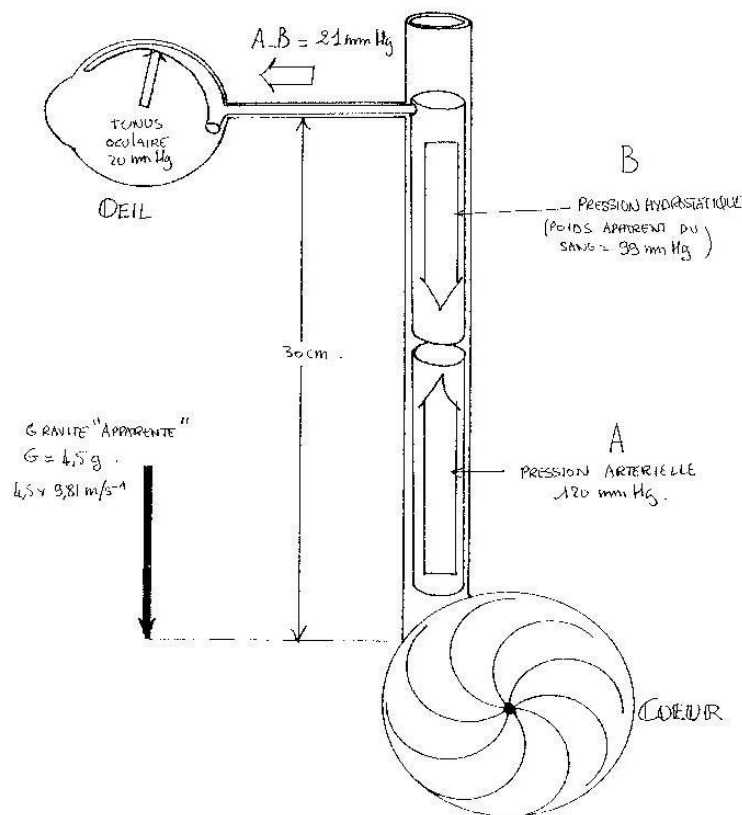


Schéma 2 : Gradient à 4,5G

vision ne se fait quasiment plus car ces zones ont une circulation terminale. La cécité a donc une cause rétinienne et neurologique à ce stade par hypoxie cérébrale surajoutée.

Il est intéressant de noter que le sang pour parvenir au cerveau ne rencontre pas les 20 mm de mercure de pression contraire qu'il rencontre pour pénétrer dans le globe oculaire (Tonus). Ainsi quand la pression de perfusion chute à zéro au niveau oculaire elle est non nulle au niveau cérébral : le pilote qui a le voile noir reste tout à fait conscient à G constants. Il faut donc relâcher la pression au

manche et "attendre" de retrouver la vision. Situation angoissante s'il en est, en de telles circonstances.

Sur 1 000 sujets non protégés et muscles relâchés, les seuils d'apparition moyens des voiles ont été les suivants :

Voile gris	$4,1 \pm 0,7G$
Voile noir	$4,7 \pm 0,8G$
Perte de connaissance	$5,4 \pm 0,9G$

A4 - Tolérance aux G

Nous avons vu plus haut les seuils d'apparition des voiles pour 1 000 sujets. Il faut préciser que ces chiffres ne sont valables que pour des vitesses de mise en accélération de l'ordre de 0,2 G/s.

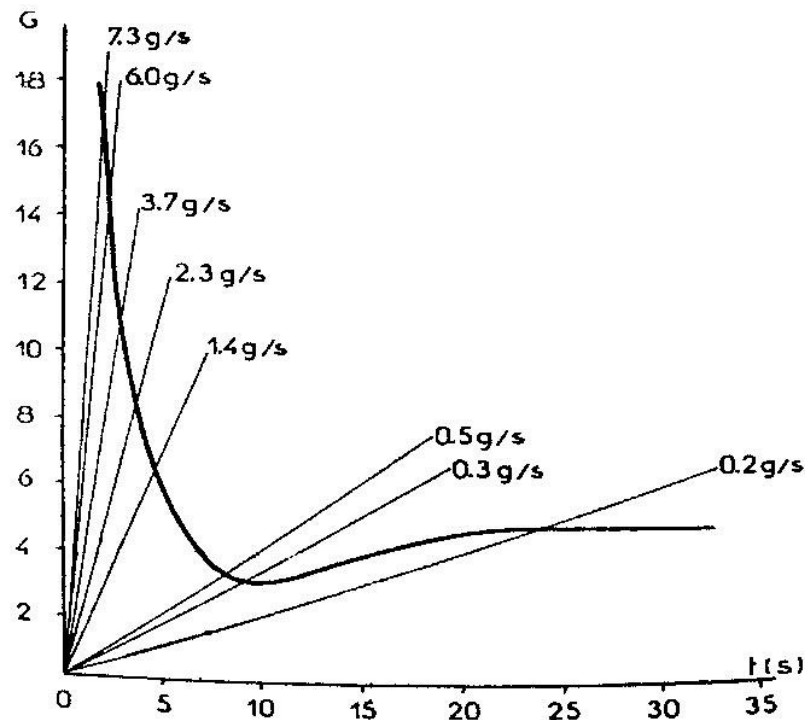


Figure 1 : Courbe de Stoll, qui présente le risque d'apparition du voile gris en fonction de l'accélération atteinte (en ordonnée) et du temps (en abscisse). Le rapport de ces deux valeurs détermine la vitesse de mise en accélération (exprimée en G/s). (Stoll, 1956)

Il est intéressant de voir ce qui se passe pour d'autres valeurs du Jolt. Ceci est bien explicité par la courbe de Stoll (1956) qui visualise le risque d'apparition du voile gris en fonction de la valeur de l'accélération (en ordonnée) et de sa vitesse d'établissement (temps en abscisse).

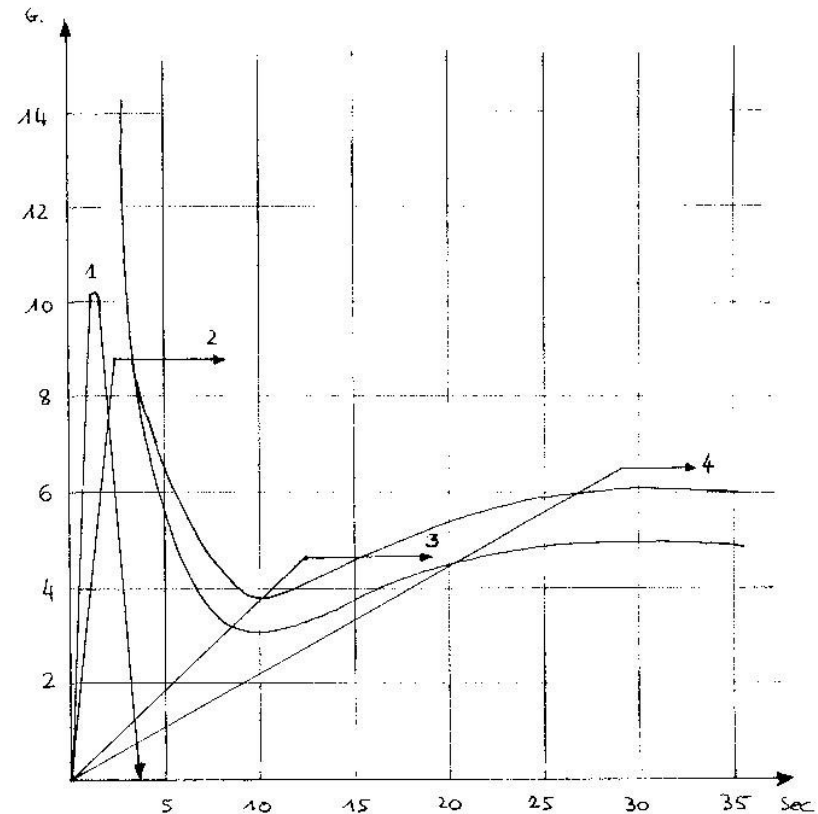


Figure 2 : Tolérance aux accélérations + Gz de longue durée en fonction de leur vitesse d'établissement.

Cas n° 1 : Bien que $G = 10 g$, on voit qu'il n'y a pas de perte de connaissance (ex : déclenchés).

Cas n° 2 : La perte de connaissance à 9G soutenus apparaît sans signe avant coureur, il n'y a pas de voile annonciateur.

Cas n° 3 : Le seuil minimum perte de connaissance pour seulement 3,8G atteinte à 0,4G/s. (double de la valeur retenue pour les seuils de tolérance).

Cas n° 4 : 0,2G/s. on monte à 6,2 Gz, symptômes visuels à 20 secondes, perte de connaissances à 26 secondes.

A5 – Protection

A51 – Les manœuvres

Manœuvre M1 des pilotes militaires. Elle consiste à enfoncer la tête et le cou entre les épaules, se pencher en avant, contracter les muscles du tronc et des membres inférieurs et expirer de façon lente et régulière, glotte partiellement fermée. Cette manœuvre doit être répétée toutes les 3 à 5 secondes, elle permet d'augmenter la tolérance de 1,5G.

A52 – Changements de position du corps

Nous avons vu que les phénomènes hydrostatiques dominent la scène. Si on change la position du corps de sorte que le grand axe des vaisseaux ne coïncide plus avec les forces d'inertie, on diminue la valeur de la force hydrostatique. Ainsi pour 45° d'inclinaison vers l'arrière, l'amélioration de la tolérance est d'environ 1G et de 4G pour 75°. A titre d'exemple sur le Rafale, l'inclinaison du dossier du siège éjectable du pilote est de 32°.

A53 – Les autres moyens de protection

On les citera pour mémoire, car ils sont difficilement adaptables aux avions de voltige. Il s'agit de la combinaison antiG et de la respiration en surpression. Enfin l'entraînement en centrifugeuse permet un bénéfice maximum des manœuvres.

B – Accélérations – Gz de longue durée

Elles s'observent lors des figures de voltige inversées en "négatif". Si les forces d'inertie sont dirigées vers la tête, elles sont beaucoup moins bien supportées que les accélérations + Gz.

B1 – Effets subjectifs

A – 1Gz : Sensation d'être tête en bas.

A – 2Gz : Maux de tête, sensation de pression dans la tête, de sable dans les yeux. Congestion désagréable des tissus souples de la face et du cou. Tendance à la convergence des globes oculaires. Parfois scotome négatif du champ visuel (zone sans image).

A – 3Gz : Les yeux semblent sortir des orbites. Larmoie-

ment excessif, respiration difficile. Il est parfois décrit un voile rougeâtre couvrant d'emblée le champ visuel, pouvant persister après l'arrêt de l'accélération, jamais en centrifugeuse.

Au delà de – 4 à – 5G pendant plus de 6 secondes, on observe une perte de connaissance suivie de confusion mentale et d'incoordination motrice pouvant persister plusieurs heures après l'arrêt de l'accélération.

B2 – Effets objectifs

Les pressions de tous les liquides situés au-dessus du cœur augmentent. Les barorécepteurs carotidiens enregistrent cette augmentation de pression du sang artériel. Le réflexe freinateur se met en marche aboutissant à une diminution de la fréquence cardiaque ayant pour but de diminuer la pression artérielle pour protéger le cerveau. Pendant ce temps la pression veineuse n'a pas varié. Pression veineuse et artérielle se rapprochent, ce qui a pour corollaire de rendre la circulation cérébrale de plus en plus mauvais (le gradient disparaît).

L'augmentation de pression du liquide céphalo-rachidien dans la boîte crânienne a un effet protecteur dont la durée est limitée. En dehors de la boîte crânienne peuvent s'observer des hémorragies conjonctivales.

Les effets pulmonaires bien qu'inverses de ceux observés lors des accélérations + Gz, aboutissent aux mêmes conséquences : troubles respiratoires.

Tableau 1 : Pressions artérielles en différents points du corps (en mmHg), pour un sujet assis relaxé à + 1Gz et + 5 Gz

	+ 1Gz	+ 5Gz
Artère rétinienne	+ 78	0
Artères de la base du cerveau	+ 98	+ 10
Artères des sommets pulmonaires	+ 12	0
Ventricule gauche	+ 120	+ 120
Ventricule droit	+ 22	+ 22
Artères des bases pulmonaires	+ 30	+ 62
Artère rénale	+ 135	+ 195
Artère fémorale	+ 155	+ 295
Artère pédieuse	+ 190	+ 470

Sur le plan cardiaque, on note des troubles de la conduction et du rythme. Des extrasystoles et des pauses cardiaques prolongées peuvent être observées.

B3 – Tolérance et protection

La tolérance aux accélérations – Gz est moins bonne que celle des accélérations positives.

Il existe une manœuvre, la manœuvre "de Müller" qui consiste en une inspiration lente, accompagnée d'une inclinaison de la tête en avant pour diminuer la distance cerveau cœur.

C – Conclusion

Les constructeurs d'avions de voltige, notamment en France, n'ont eu de cesse d'améliorer les performances de leurs avions. On est loin du Stampe de nos jours. Grâce aux nouveaux matériaux, les caractéristiques de rupture des structures sont sans cesse repoussées. On parle de + 10, - 10G couramment et parfois même plus, même en utilisation normale.

La limite de résistance humaine est dépassée depuis longtemps. C'est pourquoi l'entraînement devient très important ainsi que l'entretien de la forme physique des pilotes. Pour certaines nations, les pilotes sont de vrais professionnels.

Il est pourtant surprenant de jeter un coup d'œil dans les cockpits. Le pilote est le plus souvent assis dans un baquet ou dans un bloc de mousse moulé à son corps posé sur 2 planches à 90°. Il y a là certainement des efforts à faire en terme d'ergonomie, de tolérance aux accélérations et, par conséquent vraisemblablement de performances en compétition. Bien sûr la combinaison antiG (qui serait d'ailleurs inefficace pour les évolutions négatives), la respiration en surpression, ne sont pas envisageables en voltige. Par contre il semble que l'on puisse faire encore quelques progrès en matière de position du pilote et des commandes.

Enfin, selon des résultats d'études récents, il semblerait que l'adaptabilité de l'organisme aux accélérations soit moins bonne, lorsque la séance de voltige intervient de manière rapprochée après une première séance.

Ainsi donc, compte tenu du fait que l'accès à la voltige est ouvert à tout pilote répondant aux normes médicales pilote privé, il est bon d'avoir les mécanismes vus plus haut

en tête, afin de voler prudemment. Les équipes de voltige sont constituées de pilotes arrivés là au terme d'une sélection "naturelle". Tout le monde n'est pas Louis Peña ou Catherine Maunoury pour ne citer qu'eux.

RÉFÉRENCES

- J. Colin, M. Viellefond, J.M. Clerc. *Action physiopathologique de l'environnement gravito-inertiel, les accélérations*. Médecine aérospatiale, expansion scientifique française, septembre 1990.
- F. Louisy. *Les accélérations en aéronautique*. CERMA. Cours de la capacité de médecine aéronautique de la Faculté de médecine de Toulouse, 1996.
- Y. Guezennec. *La voltige aérienne : conséquences physiologiques*. Entretiens de médecine aérospatiale, 1^{er} et 2 octobre 1998, CEV de Brétigny.