

LES LIMITES DES POSSIBILITÉS HUMAINES DANS LES CONCEPTS ACTUELS DU VOL ET DE L'AVION

Par H. EVRARD

Président du Groupe de Médecine Aéronautique de l'AGARD

LA MÉDECINE Aéronautique est généralement considérée comme une Branche de la Médecine préventive. Son but premier est *la protection de l'homme en vol* contre les facteurs agressifs provenant du milieu où se déroulent les vols. Cette conception, qui fut celle qui présida à l'élaboration et au développement de la médecine aéronautique est demeurée valable. Chaque fois que l'ingénieur a créé des avions capables de voler plus haut ou plus vite, le médecin s'est trouvé confronté avec de nouveaux problèmes, physiologiques ou psychologiques. Les solutions qu'il a apportées ont consisté à protéger l'homme contre les effets de l'agression, par l'inhalation d'oxygène, le port d'équipements spéciaux, la création d'un milieu physiologiquement viable dans l'habitacle, etc. Cette conception primitive s'est ensuite élargie : au-delà de la protection de l'homme en vol, la médecine aéronautique s'est assignée comme second objectif de rechercher *les meilleures formes d'adaptation de l'homme à la machine volante*, en raison de la complexité et des possibilités des appareils modernes. Dans la poursuite de ce deuxième objectif, il est indispensable que nous, médecins, fixions à l'ingénieur les limites physiologiques et psychiques de l'homme qui doit prendre place dans l'avion ou le piloter. Il est non moins indispensable que l'ingénieur, dès la conception de l'avion, ne perde pas de vue que l'homme qui doit occuper l'avion, a, par rapport à divers paramètres tels que l'altitude, la vitesse, l'endurance, etc., des limites qui peuvent constituer un élément de fragilité pour le complexe "homme-avion".

Les données relatives à la tolérance humaine sont en constante revision, soit que certaines d'entre elles soient encore mal fixées, soit que la tolérance soit reculée par l'apport d'équipements protecteurs nouveaux ou par des conceptions nouvelles de protection.

Nous nous proposons de considérer, sous un angle pratique,

(1) certaines de ces limites de tolérance humaine, dans l'aviation d'aujourd'hui et des quelques années à venir;

(2) les mesures, qui relèvent entièrement et essentiellement du médecin et qui permettent l'exploitation complète des tolérances humaines dans les

limites de la sécurité. Ces mesures se groupent sous trois rubriques: la sélection du personnel navigant et la prévention de la fatigue, l'amélioration de l'équipement protecteur et de son adaptation à l'homme, l'utilisation maxima des possibilités de cet équipement protecteur par l'endoctrinement aéro-médical. Nous nous limiterons aux problèmes du vol jusqu'à l'altitude de 150.000 pieds ou 50.000 mètres. Certes, le vol extra-atmosphérique ou le vol dans l'espace, fait l'objet d'études très activement poussées. Mais nous pensons qu'il demeure nombre de problèmes aéro-médicaux, rencontrés dans la zone de 50.000 à 150.000 pieds, qui méritent encore beaucoup plus d'attention. Tout d'abord, ces problèmes sont d'un intérêt immédiat pour l'aviation d'aujourd'hui, particulièrement l'aviation militaire. Ensuite, certains de ces problèmes sont beaucoup plus difficiles à résoudre que ceux du vol dans l'espace extra-atmosphérique: par exemple, le problème de l'éjection aux vitesses supersoniques, le problème de la chaleur de friction, etc. Quand tous les problèmes posés par les limitations humaines en ce qui concerne les vols à travers la stratosphère auront été résolus, beaucoup des problèmes liés aux vols extra-atmosphériques seront, eux aussi, simplifiés ou résolus par le fait même.

1. PROBLÈMES PHYSIOLOGIQUES

1. *Décompression explosive de la Cabine*

La fixation des conditions de tolérance humaine aux décompressions explosives des cabines a fait l'objet de nombreuses études.

La loi des décompressions, présentée par Violette⁽¹⁾, cadre avec tous les faits actuellement connus.

Selon cet auteur, dans les décompressions explosives, la loi de la décompression pulmonaire est identique à celle des décompressions de cabine.

La vitesse de décompression d'une cabine dépend:

du coefficient de décompression: $\frac{\text{surface de l'orifice (exprimée en m}^2\text{)}}{\text{volume de la cabine (exprimé en m}^3\text{)}}$

du rapport de pression: $\frac{\text{pression cabine}}{\text{pression extérieure}}$

La vitesse de décompression des poumons dépend des mêmes facteurs:

du coefficient de décompression: $\frac{\text{surface de l'orifice (trachée ou glotte)}}{\text{volume d'air contenu dans les poumons}}$

du rapport de pression: $\frac{\text{pression cabine}}{\text{pression extérieure}}$

La surpression créée à l'intérieur des poumons est certainement responsable des lésions constatées dans certaines conditions de décompression ex-

plosive des cabines. Il y a deux façons d'éviter la production de cette surpression intra-pulmonaire :

- (a) On peut faire en sorte que la décompression de la cabine soit toujours plus lente que la décompression pulmonaire;
- (b) Si les conditions techniques entraînent une décompression de cabine plus rapide que la décompression pulmonaire, il faut limiter le rapport de pression, afin de limiter l'expansion relative des gaz dans les poumons.

Pour que les décompressions ne créent aucune surpression à l'intérieur des poumons, Violette a démontré qu'il suffit que le plus grand coefficient de décompression de la cabine, exprimé en m^2 , soit inférieur au coefficient glottique le plus bas. Ce dernier est de $\frac{1(m^2)}{100(m^3)}$. Avec un facteur de sécurité de 100%, on obtient un coefficient de décompression maximum de $\frac{1(m^2)}{200(m^3)}$.

Ce coefficient met à l'abri des risques de décompression explosive pour des rapports de pression théoriquement sans limite (tableau 1).

Pour des rapports de pression inférieurs à 4, le coefficient de décompression peut être de $\frac{1(m^2)}{50(m^3)}$.

Le tableau ci-après (tableau 1) fournit, pour un avion dont le volume de cabine est $80 m^3$, la surface de l'orifice correspondant aux limites de sécurité pour les occupants.

TABLEAU 1

Altitude		Pres. Extern	Pres. cabine	Alt. cabine	Rapport de pression	Surface maxima de l'orifice
Mètres	Pieds					
12.000	39.000	144,6mm Hg	674mm Hg	1000 m	4,66	0,4 m ²
9.000	29.000	230mm Hg	674mm Hg	1000 m	2,9	1,6 m ²

Dans le cas d'une cabine de faible volume (avion de chasse ou bombardier léger), le coefficient de décompression, en cas de rupture de la verrière ($0,4 m^2$ environ), est compris entre $1/3,8$ et $1/2,5$, exprimé en $\frac{m^2}{m^3}$. La présence ou l'absence de lésions est liée au rapport des pression $\frac{\text{pression cabine}}{\text{pression extérieure}}$. Pour un coefficient de décompression de $1/3$, ce rapport ne doit pas dépasser 2.3, d'après les travaux de Violette. Si le

rapport de pression est inférieur à 2,3, il n'y aura aucune lésion à redouter quel que soit le coefficient de décompression.

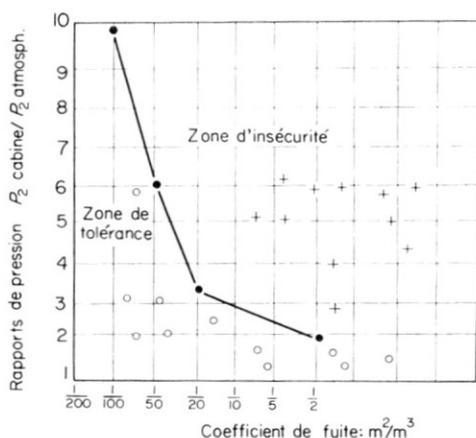


FIG. 1.

On doit donc choisir, pour la pressurisation de la cabine, une pression différentielle d'une valeur telle que, pour tout vol à l'altitude maxima, le rapport de pression soit égal ou inférieur à 2,3.

Deux facteurs physiologiques interviennent dans le calcul: l'hypoxie et l'aéroembolisme.

Pour éviter l'hypoxie, nous devons garder une pression partielle d'oxygène de 100 mm de mercure dans l'alvéole pulmonaire. Cette pression est obtenue à 10.300 mètres où règne une pression atmosphérique de 187 mm de mercure. On aura donc une pression extérieure

$$pa = \frac{pc}{2,3} = \frac{187}{2,3} = 81,3 \text{ mm de mercure soit une altitude maximum de } 15.600 \text{ mètres.}$$

Si l'on tient compte du danger d'aéroembolisme à partir de 7000 mètres de pression-cabine, on obtient une altitude de vol maximum de 12.500 mètres. Il est vrai que le risque d'aéroembolisme est assez facilement atténué par la dénitrégation préalable.

Au-dessus de 15.000 mètres, la sécurité du pilote ou de l'équipage ne peut donc être conçue que par le port d'équipements personnels spéciaux. La combinaison à surpression localisée (partial pressure suit), avec casque hermétique, apporte actuellement une solution de caractère *provisoire* au problème. Son efficacité a été éprouvée jusqu'à 30.000 mètres environ. Une autre limitation du vêtement est la durée très courte de son emploi: si le vêtement sauve la vie du pilote, la mission, de toute manière, devra être interrompue à l'altitude prévue. L'autre solution, le scaphandre aérien, ou vêtement à surpression totale, a toujours été considérée comme la solution physiologique définitive. Ses avantages sont considérables:

- (a) élimination des dangers de décompression explosive, quelles que soient les pressions différentielles utilisées;
- (b) élimination des dangers d'hypoxie et d'aéroembolisme;
- (c) possibilité de vols au-dessus de 15.000 mètres sans devoir interrompre la mission en cas de perte de pressurisation;
- (d) protection contre les extrêmes de température et les effets du vent. Les multiples difficultés techniques posées par la construction de scaphandres (poids, mobilité des segments de membres, ventilation interne, etc.) sont actuellement en voie d'être vaincues: les études publiées sur le vêtement mis au point par l'U.S. Navy ont montré que les obstacles majeurs ont été surmontés et que c'est à des solutions de perfectionnement que les laboratoires de recherches s'attachent actuellement.

Avons-nous, pour autant, une solution définitive? En demeurant dans le domaine purement physiologique, une nouvelle barrière a été évoquée: la possibilité de concentrations toxiques d'ozone dans la cabine, à partir de 25.000 mètres par compression d'un air extérieur fortement ionisé. Les tolérances humaines à l'intoxication par l'ozone sont actuellement sujettes à révision. Même si les données antérieures sont confirmées, il ne semble pas que l'élimination de l'ozone avant sa pénétration dans la cabine puisse présenter pour l'ingénieur des problèmes sérieux. En réalité, il apparaît bien que le véritable problème de la limitation de la pressurisation ne soit pas de nature physiologique, mais plutôt mécanique: il deviendra vite impossible, au-delà de 25.000 mètres, d'obtenir des compresseurs capables de ramener la pression d'air dans la cabine à un niveau suffisant, tout en demeurant dans des limites acceptables de poids et d'encombrement.

Ainsi, arriverons-nous forcément au concept de la cabine complètement étanche. Cette dernière solution pose elle-même de nouveaux problèmes, non seulement mécaniques, mais surtout physiologiques et psychologiques, liés au maintien de la vie et à l'activité en milieu confiné. Sans qu'il soit besoin du puissant aiguillon de l'existence de satellites, l'étude des tolérances humaines en milieu étanche et confiné devient un problème majeur et actuel de la médecine aéronautique, pour satisfaire aux exigences du vol humain dans les couches stratosphériques de l'ordre de 30.000 mètres d'altitude.

2. Vitesses

(a) Les effets des accélérations en vol ont fait l'objet de nombreuses études. Les limites humaines aux G positifs et aux G négatifs ont été bien fixées par les travaux sur centrifuges. Les expérimentations impressionnantes et hardies du Colonel Stapp ont déterminé la tolérance aux accélérations transverses. Des investigations sont en cours pour déterminer les limitations aux accélérations cycliques et aux accélérations fluctuantes. Tout cet énorme travail a abouti à la mise au point et au

perfectionnement de vêtements anti-*G*, en ce qui concerne les accélérations positives. Des essais de pilotage en position couchée ont été exécutés et il n'est pas impossible que l'on ne doive pas, dans l'avenir, recourir à cette solution. Les accélérations fluctuantes, que l'on rencontre notamment dans le buffeting, sont une source nouvelle de préoccupations: elles entravent la lecture des instruments et ne peuvent être supportées plus de quelques minutes sans provoquer des malaises qui empêchent la poursuite du vol. Il ne semble pas que la médecine aéronautique puisse, à l'heure actuelle, fournir une solution satisfaisante à un problème qui risque de compromettre la capacité de performance de l'aviateur, dans les vols supersoniques par temps turbulents.

Aussi, est-ce à l'ingénieur que l'on demandera de trouver, pour l'appareil supersonique, des formes telles qu'elles puissent réduire, sinon supprimer le buffeting.

(b) Le problème le plus grave posé actuellement par les vitesses supersoniques est celui de l'évacuation de l'avion en vol.

Le siège éjectable, qui, aux vitesses infrasoniques, est la meilleure méthode pour évacuer un avion, devient inapplicable pour des vitesses supersoniques. La pression dynamique qui s'exerce sur une surface s'accroît rapidement à mesure que la vitesse grandit. A 1000 km/heure, elle est de 4.822 kg par m². Ces énormes pressions exercées sur le corps de l'aviateur provoquent des lésions graves des tissus mous, des fractures et luxations des membres. Les limitations du siège éjectable ont reçu une large notoriété dans deux exemples récents. G. Smith, pilote d'essai de l'U.S.A.F. quitta un F 100 à la vitesse de 1300 km/heure et à l'altitude de 2000 m. L'énorme pression dynamique qu'il subit arracha son équipement, lacéra ses vêtements, provoqua des hémorragies oculaires et internes, des lésions intestinales et des luxations des membres. La décélération qu'il supporta est de l'ordre de 40 *G*. M. Molland, pilote de la R.A.F., s'éjecta à la vitesse de 1100 km/heure et à l'altitude de 3000 m. Lui aussi souffrit d'hémorragies oculaires, et en outre de fracture des bras et du bassin.

Récemment, un pilote belge s'éjecta d'un Hunter à une vitesse très voisine de Mach 1, à l'altitude de 4000 mètres (12.000 pieds). Le siège présentait un système à mécanisme automatique de libération du siège et d'ouverture du parachute. Le mécanisme d'ouverture fonctionna normalement. Le pilote fut relevé en état de shock. Il portait: (a) une fracture de la diaphyse humérale gauche; (b) des échymoses de la face; (c) une déformation pupillaire à droite; (d) un scalp peu étendu au niveau de la bosse occipitale droite; (e) un large diastasis de la symphyse pubienne; (f) une plaie *linéaire* au périnée, avec rupture du sphincter anal; (g) une luxation de la hanche gauche.

Dans un autre cas similaire, un pilote de Météor VIII s'éjecta à 8000 pieds. Son avion était en piqué depuis 35.000 pieds et était en zone de compressibilité, donc aux environs de Mach 0.9. Il ressentit une violente

TABLEAU 2

Cas	Vitesse indiquée en noeuds	Lésions
1- 7	500-600	Nulle ou légère
8-10	500, 560, 580	Majeures
11	510	Majeures
12	520	Majeures
13	500	Majeures
14	500	Majeures
15	590	Majeures
16	520	Fatales
17-18	500-600	Fatales
19	600	Fatales
20	500-600	Fatales
21	575	Fatales
22	600	Fatales
23	610	Majeures

douleur à la hanche gauche au moment de l'éjection. On constata une luxation en arrière de la hanche gauche comme dans le cas précédent.

Le tableau suivant (tableau 2) emprunté à une étude de Moseley⁽²⁾ sur les éjections dans l'U.S.A.F., donne les résultats des 23 éjections effectuées à des vitesses supérieures à 500 noeuds. Seize d'entre elles, soit 70%, se sont accompagnées de lésions graves ou fatales.

Certes, la diminution de la densité de l'air, à mesure que l'altitude augmente, va de pair avec la diminution de la traînée et rendrait possible, l'éjection à Mach 2 à 15.000 mètres, à Mach 2,5 à 18.000 mètres. F. Haber a calculé qu'à Mach 10, à l'altitude de 95.000 mètres, un pilote pourrait abandonner son avion sans le secours du siège éjectable.

Mais ces considérations n'apportent aucune solution aux problèmes actuels du vol supersonique, dans la partie de l'atmosphère inférieure à 50 km d'altitude. Si l'éjection se fait au-dessus de 9.000 mètres, la chute libre est une nécessité: en effet, le choc d'ouverture du parachute est extrêmement violent à haute altitude; l'aviateur doit échapper au plus vite aux froids intenses (-55° C) régnant entre 10.000 et 30.000 mètres et la combinaison pressurisée ou le scaphandre ne peut être alimenté en oxygène que pendant une durée réduite. D'autre part, des expériences de saut faites à l'U.S.A.F., par Maza et ses collaborateurs, à des altitudes comprises entre 9000 et 12.000 mètres, ont montré que, dans certains cas, le corps est soumis à des rotations rapides qui pourraient dépasser les limites de la tolérance humaine. Il semble donc bien que la solution du problème de l'abandon d'un avion volant à des vitesses supersoniques, aux altitudes inférieures à 50.000 mètres, réside dans la conception d'une cabine éjectable ou d'une capsule éjectable, à condition que ces solutions disposent des équipements de protection nécessaires et de dispositifs assurant leur stabilisation pendant la descente. Cette formule, si elle

résout le problème du sauvetage à des vitesses supersoniques à basse altitude, apporterait par le fait même une solution satisfaisante au sauvetage aux altitudes supérieures à 50.000 mètres et même au sauvetage dans l'espace (Frost⁽¹³⁾). En effet, munie de freins-fusées, la cabine ou la capsule permettrait une rentrée dans les couches denses de l'atmosphère en évitant l'apparition d'une décélération qui risquerait de dépasser les tolérances de l'occupant (Grandpierre et Colin⁽³⁾).

3. Aux problèmes des vitesses, on peut rattacher celui de la tolérance aux températures élevées provoquées par la friction de l'air sur les parois de l'avion aux vitesses supersoniques. Les vêtements ventilés permettent actuellement d'apporter une solution physiologique satisfaisante en interposant entre la peau et le vêtement une couche d'air ayant une température appropriée. Les temps de tolérance varient suivant le genre de vêtement porté par le sujet (combinaison ventilée, combinaison isolante, etc.). Il est normal que de nombreux auteurs se soient intéressés au temps de tolérance de sujets légèrement vêtus, puisqu'on se trouve ainsi dans la situation d'un arrêt du système de ventilation de la combinaison ventilée. Les tolérances fixées pour ces conditions par les études de Buettner, citées par H. Haber⁽⁴⁾, sont les suivantes, pour des sujets au repos ou n'ayant qu'une faible activité musculaire et par un vent nul (tableau 3):

TABLEAU 3

Températures	Temps de tolérance
70° C	70 minutes
80° C	55 minutes
90° C	40 minutes
115° C	20 minutes
200° C	5 minutes

Malgré les résultats obtenus par la combinaison ventilée, il est néanmoins certain que la réfrigération de l'habitacle doit, en ce qui concerne l'ingénieur, devenir une préoccupation importante, appelée à compléter les solutions que le médecin demande actuellement à un équipement encombrant.

2. PROBLÈMES SENSORI-PSYCHO-MOTEURS

Les deux fonctions principales du système de contrôle de vol, dans le pilotage humain, doivent: (1) permettre au pilote de maintenir l'appareil dans la situation de vol désirée, en dépit des causes perturbatrices, c-à-d assurer *la stabilité* de l'avion;

(2) permettre au pilote d'imposer des modifications qu'il estime nécessaires à l'orientation de l'avion, c-à-d assurer *le contrôle* de l'avion. Le mécanisme complexe qui permet à un être humain de *stabiliser* et de

contrôler l'avion a été ramené à une conception qui envisage la mise en oeuvre de trois fonctions:

(a) une fonction de *réception*: elle permet au pilote de rassembler des informations, directement, au moyen des organes des sens ou indirectement avec l'aide d'instruments et de percevoir ainsi la situation de l'avion dans l'espace et ses modifications;

(b) une fonction de coordination et d'intégration: elle permet au pilote de transmettre les informations des organes de réception aux organes d'intégration, de leur faire subir une intégration et une discrimination nécessaires, par le jeu d'opérations mentales qui permettent, entre autres, de prendre des décisions judicieuses et rapides et d'empêcher une activité désordonnée, enfin, de transmettre ces décisions aux organes d'exécution;

(c) *une fonction motrice*: elle permet au pilote d'agir sur des commandes en réponse aux informations fournies.

Les vitesses élevées ont de plus en plus attiré l'attention sur beaucoup de ces problèmes. En réalité, c'est surtout à leur sujet que l'on s'est demandé si l'on n'a pas atteint, dans certaines domaines de l'aviation, la limite des capacités humaines. Il semble, à tout bien considérer, que certains problèmes ont un caractère plus académique que réel et que certaines limitations humaines interviennent peu dans la sécurité du vol. D'autres, au contraire, peuvent avoir des conséquences graves sur le contrôle de l'avion. Nous allons passer certains de ces problèmes très succinctement en revue:

(1) Aux vitesses supersoniques, l'onde de compression résultant de la condensation de l'air en avant de l'avion provoque de la distorsion et un déplacement apparent des objets. Cet effet de réfraction est difficile à corriger par des moyens optiques. Il pourrait, théoriquement, jouer un rôle dans le vol supersonique à très basses altitudes. A l'heure actuelle, de tels vols ne sont pas effectués d'une manière courante. Dans les autres situations, des moyens de suppléance sont à la disposition du pilote pour prévoir à temps et localiser correctement l'obstacle situé sur la trajectoire. Cet effet n'intervient pas aux vitesses actuelles d'atterrissage.

(2) Le problème de la forme des pare-brises est depuis longtemps un objet de discussion entre aérodynamiciens et physiologistes. Pour l'ophtalmologue, une inclinaison, créant un angle supérieur à 70° par rapport à la verticale, peut troubler la perception des distances et de la profondeur. Il semble donc que le désir légitime de l'aérodynamicien de réduire la traînée par l'utilisation du maximum d'inclinaison de ces panneaux, par rapport à la verticale, doit tenir compte de cette limite, qui a une importance indéniable, non seulement pour la visée et la localisation correcte des obstacles, mais surtout pour l'atterrissage, ce qui présente une réelle signification pour la sécurité.

(3) La question du temps de réaction, visuel ou auditif, c-à-d du temps nécessaire pour voir un objet, le reconnaître et exécuter les mouvements musculaires que nécessite la situation, a soulevé depuis longtemps beaucoup

d'intérêt. Aucun fait nouveau n'est venu apporter des moyens pour réduire ce temps, dont la signification est particulièrement importante aux vitesses supersoniques.

Dans les conditions expérimentales optimales, le temps de réaction des sujets, mesuré au cours des tests impliquant une réponse musculaire coordonnée à un excitant visuel ou auditif, est de l'ordre d'un cinquième de seconde. Il faut cependant préciser que des conditions aussi simples existent rarement en vol où la situation peut exiger une analyse ou un jugement préalable à la décision. Le temps de réaction du pilote peut ainsi varier d'une à plusieurs secondes. A supposer que le temps de latence de reconnaissance des objets soit de 1 seconde, le temps total de réaction s'élèverait aux environs de 1,8 secondes. Durant cette période, deux avions volant l'un vers l'autre à la vitesse de Mach 1 couvriront environ 1.000 mètres. S'ils sortent des nuages à cette distance, ils ne pourront éviter une collision avant qu'une action efficace ait été prise par les pilotes.

Est-il possible de réduire, soit par la pratique du pilotage, soit par une forme quelconque d'entraînement, le temps de réaction ?

Nous avons repris cette question et fait une étude comparative des temps de réaction simples sur des candidats élèves pilotes lors de leur sélection et sur des pilotes opérationnels.

(A) La première expérience porte sur *463 candidats admis à l'entraînement* d'une part, et *463 pilotes* en activité d'autre part.

Les moyennes arithmétiques des temps réalisés se présentent comme suit :

(a) Temps de réaction visuels :

Candidats élèves pilotes : 23,00 centièmes de sec ; écart moyen = 3,44

Pilotes : 23,56 centièmes de sec ; écart moyen = 2,75

(b) Temps de réaction auditifs :

Candidats élèves pilotes : 18,24 centièmes de sec ; écart moyen = 2,6

Pilotes : 18,32 centièmes de sec ; écart moyen = 2,38

Il semble donc que le pilotage n'exerce *aucune influence bénéfique* sur la vitesse de réaction aux stimuli visuels ou auditifs. Les courbes de fréquences comparées présentent une similitude de profil remarquable.

(B) La seconde expérience porte sur *348 sujets* soumis à l'épreuve du réactiomètre, une première fois lors de leur *sélection* comme élèves pilotes, une seconde fois lors d'un examen *de revision* comme *pilotes de chasse*.

De l'étude comparative des résultats enregistrés, il ressort que :

(a) *Temps visuel*

10,34% des sujets réalisent un temps de réaction identique

43,97% des sujets accusent un *allongement* du temps de réaction (moyenne arithmétique = 0,035 sec) lors de l'examen de revision

45,69% des sujets présentent un raccourcissement du temps de réaction (moyenne arithmétique = 0,0344 sec) lors de l'examen de revision

(b) *Temps de réaction auditif*

11,78% réalisent un temps de réaction identique

42,24% présentent un allongement du temps de réaction (moyenne arithmétique = 0,0254 sec) quand ils sont pilotes de chasse

45,98% présentent un raccourcissement du temps de réaction (moyenne arithmétique = 0,0295 sec) quand ils sont pilotes de chasse.

Ici encore, il semble que la pratique du pilotage n'exerce pas d'influence sur la vitesse de réaction des sujets. L'examen des courbes de fréquence indique, comme dans les premières expériences, une diminution sensible des cotes aberrantes lors du second examen. La similitude de profil est toujours remarquable.

En conclusion, la vitesse de réaction aux stimuli visuels et auditifs ne paraît pas susceptible d'éducabilité.

Dans le temps de réaction du pilote en vol, il y a lieu de tenir compte d'un certain nombre d'opérations de nature intellectuelle, telles que reconnaissance des objets, association, compréhension, etc. Aussi, il résulte que la composition du tableau de bord doit être aussi simple que possible dans les avions supersoniques; il s'agit de réduire les multiples perceptions, qui assaillent le pilote de toute part et de diminuer le temps de lecture. Il s'agit également de réduire le nombre de gestes à faire, de ramener le nombre d'appareils de protection à ce qui s'avère nécessaire et essentiel, de standardiser les tableaux de bord, de simplifier et d'unifier les commandes. En somme, le problème de la mécanique humaine, appliquée au vol, est celui de la réduction des nombres de stimuli extérieurs, de la réduction du travail mental d'élaboration et d'interprétation de ces stimuli à un degré qui demeure compatible avec les capacités psycho-physiologiques du pilote.

(4) Le clignement des yeux introduit une imperfection dans le fonctionnement de l'appareil visuel. On peut se demander si, dans ces conditions, l'instrument sensori-moteur humain garde, cependant, aux vitesses actuelles *d'atterrissage* des moyens suffisants de compensation pour que l'on néglige, dans la plupart des cas, cette limitation introduite dans le processus physiologique du système de contrôle de l'avion.

Le *black-out* ou période aveugle qui accompagne le clignement involontaire présente en durée des variations assez grandes. Poulton⁽⁵⁾, citant les travaux de Lawson, lui attribue une *durée* moyenne de 0,25 seconde. En outre, chez 70% environ de sujets, le clignement est suivi d'une période de "vision mobile" qui est causée par une rotation des globes oculaires, concomitante au clignement. Ces sujets ont donc à chaque clignement des yeux, une période estimée en moyenne par Poulton, à 0,55 seconde, où l'utilisation de la vision est incapable de fournir les informations visuelles nécessaires à l'accomplissement de la tâche.

La durée d'absence des sensations visuelles, à l'occasion d'un clignement, se traduit comme suit pour les vitesses actuellement utilisées au cours de la phase finale de l'approche :

Vitesse en km/heure	Espace parcouru durant 0,55 sec
180	26 mètres
200	29 mètres
240	35 mètres
260	38 mètres
300	43 mètres

Nous avons examiné la fréquence du clignement durant l'accomplissement de certaines tâches sensori-motrices complexes, exigeant une vigilance constante pendant leur exécution⁽⁶⁾. Ce sont :

- (a) le test de coordination dans la carlingue MSA, de la R.A.F. ;
- (b) le stipple test ou test de Bourdon-Wiersma.

Les résultats de nos expériences faites en laboratoire concordent avec celles de Drew⁽⁷⁾ de Poulton et Gregory⁽⁸⁾ et avec les observations faites en vol par Ellis et Allan⁽¹⁴⁾ : le nombre de clignements est très réduit dans ces circonstances. Nos expériences n'ont pas dépassé une durée de 12 minutes pour la période de vigilance continue, de degré élevé, durant laquelle s'effectue la tâche sensori-motrice. Il est rare qu'en vol on rencontre des circonstances exigeant des périodes aussi longues de vigilance extrême, sans période de détente, si courte soit-elle. Même après une période d'attention soutenue de 10 minutes, sa fréquence dépasse rarement, chez la plupart de sujets, 4 clignements par minute pendant l'exécution de la partie difficile d'une tâche. On peut donc admettre que le clignement est très peu fréquent durant les moments critiques d'un vol.

Si le clignement se produit à un moment critique pour le contrôle de l'avion, quel sera l'effet de détérioration de la tâche motrice ? Bartlett⁽⁹⁾ et Poulton ont bien montré que l'estimation des effets des clignements sur l'exécution d'une tâche sensori-motrice exigeant rapidité et précision doit faire nécessairement intervenir le phénomène d'*anticipation* sous deux formes, l'anticipation du récepteur sensoriel et l'anticipation de perception. Grâce à l'anticipation, le pilote pourra préparer sa réponse motrice. Celle-ci ne subira aucune répercussion si un clignement survient au moment de son exécution ; le pilote est donc aussi capable de compenser l'absence temporaire d'informations.

On a attribué à la fatigue un rôle important dans l'augmentation de la fréquence du clignement. Effectivement, dans nos observations, la fréquence est quadruplée après 8 minutes, malgré la continuité d'un degré élevé d'attention, puis se stabilise. Il semble plus logique de considérer la fatigue elle-même comme un facteur plus important de détérioration de performance et, par conséquent, comme cause d'accident, que le

clignement associé à cette fatigue. Aussi, pouvons-nous conclure que l'instrument sensori-moteur humain garde, aux vitesses actuelles d'atterrissage, des moyens suffisants de compensation pour que l'on néglige, dans la plupart des cas, cette limitation introduite dans le processus physiologique du système de contrôle de l'avion.

3. SÉLECTION DU PERSONNEL NAVIGANT, ADAP- TION DE L'ÉQUIPEMENT DE VOL ET ENDOCTRINEMENT AÉRO-MÉDICAL

L'augmentation incessante des performances des avions place l'homme au sein d'un milieu de plus en plus antiphysiologique alors que les limitations non correctibles de sa physiologie demeurent inchangées. Il est logique de se demander ce que nous pouvons faire, nous médecins, pour sélectionner des hommes adaptés aux exigences des appareils modernes, et après leur sélection, pour améliorer leur degré initialement suffisant d'adaptation et les protéger contre les conséquences nocives du vol dans les domaines physiologique et psychique. Face à ces limitations, les efforts de la médecine aéronautique se regroupent selon trois directions:

- (a) sélection du personnel navigant; prévention de la fatigue;
- (b) amélioration de l'équipement et de son adaptation à l'homme;
- (c) endoctrinement aéro-médical du pilote.

(a) *Sélection du Personnel Navigant*

Depuis quarante ans, les normes médicales ont été soumises au creuset de l'expérience. Les exigences physiques d'aptitude sont à juste titre demeurées sévères, pour ce qui se rapporte aux organes des sens, et aux grandes fonctions circulatoire et respiratoire.

Dans quelle mesure certains tests peuvent-ils sélectionner des hommes disposant des meilleures qualités dans le domaine des tolérances humaines au vol? On sait, depuis longtemps, que certains tests d'endurance cardio-respiratoire n'ont pas, à ce sujet, les significations qu'on leur avait attribuées autrefois. Pour reprendre une expression de l'Air Marshall Lee Potter⁽¹⁰⁾, nous devons demander à nos pilotes de *faire voler* leur avion et non de *porter* celui-ci. Au-delà d'un certain niveau d'efficacité cardiaque, pulmonaire, circulatoire, etc., le surplus ne représente pas une meilleure tolérance aux efforts ou aux fardeaux physiologiques résultant du vol moderne. Ces tests doivent cependant être faits parce que, non seulement ils démontrent l'intégrité fonctionnelle des sujets, mais encore sont des signes de référence permettant de comparer les résultats des examens périodiques successifs de contrôle.

Il est évident qu'une importante limitation des possibilités du pilote humain se trouve dans le processus sensori-psycho-moteur. Puisque les phases sensorielles et motrices ne sont pas perfectibles, c'est dans les processus psychologiques et les caractéristiques de personnalité que l'on

s'est orienté pour rechercher les critères de sélection des individus appelés à piloter les avions de plus en plus complexes. L'expérience a montré qu'il est possible, par l'emploi de tests d'intelligence et de tests d'aptitudes spécifiques, de détecter, dans une sélection de masse, des sujets qui possèdent une chance assez raisonnable de succès pour l'apprentissage dans les écoles de pilotage. Mais l'expérience a également démontré qu'une telle solution, à elle seule, est loin d'être satisfaisante, qu'elle ne suffit pas et qu'elle doit être complétée par des investigations approfondies destinées à évaluer la résistance opposée par la personnalité aux agressions résultant du vol. Les méthodes psychologiques et psychiatriques ont-elles réussi dans cette dernière entreprise ?

Oui, dans une certaine mesure, en ce sens que dans les mains de psychiatres qualifiés, elles ont permis l'élimination de sujets névrosés, de psychopathes ou de sujets dépourvus d'un contrôle affectif suffisant. Il faut répondre par la négative si l'on attendait de ces méthodes qu'elles déterminent les structures de personnalité qui font le chef ou l'aviateur idéal ou celles qui garantissent la possession d'un contrôle affectif tel que l'aviateur soit définitivement réfractaire à l'angoisse et à l'anxiété.

Dans tout problème touchant à la formation du caractère humain, deux facteurs interviennent : les dispositions héréditaires innées et les influences régulatrices du milieu, mais, selon Rudolf Brun, l'action de ces dernières est à son tour largement dépendante de la constitution instinctuelle innée. Celle-ci, dit Ewald Böhm⁽¹¹⁾ détermine donc également la nature et la force de la structure du surmoi et ces forces culturelles ou pulsions secondaires inhibitrices qui constituent le mécanisme de freinage de l'affectivité en cas de menace de l'instinct de vie. Ainsi, l'étude des limitations humaines du pilote se trouve forcément confrontée avec un problème essentiel, capital : celui de *l'angoisse*. L'angoisse réelle est l'angoisse normale de l'être sain, qui sert de signal d'alarme en cas de danger extérieur. C'est un sentiment primitif, naissant chaque fois que l'instinct de vie est menacé et devant préparer l'organisme au combat, à la fuite ou à faire le mort (E. Böhm). La psychiatrie moderne et la psychanalyse ont bien montré l'extrême complexité et la grande variété des différents mécanismes de défense contre l'angoisse dont usent sujets normaux et sujets névrosés. Aussi, est-il aisé de comprendre les motifs réels des insuffisances actuelles de la sélection des aviateurs dans tout ce qui touche à l'essence même de la personnalité et les limitations prévisibles et surtout imprévisibles de l'organisme humain en vol, aux prises avec les menaces portées à l'instinct de conservation. D'ailleurs, ce problème se complique encore par l'existence, chez certains individus, d'une structure inverse, l'excès pathologique de confiance en soi, aboutissant à l'absence de la peur dans les circonstances où elle devrait normalement exister. Certaines conditions nouvelles du vol semblent constituer chez une certaine proportion d'aviateurs expérimentés, voire de pilotes d'essai, une nouvelle forme de menace à l'instinct.

Clark et Graybiel⁽¹²⁾ ont signalé récemment l'importance du "break-off", sentiment d'isolement, d'arrachement au globe terrestre, déterminant le plus souvent une véritable anxiété chez des aviateurs volant seuls, à des altitudes supérieures à 30.000 pieds et surtout 40.000 pieds dans un ciel vide. Bridgeman a bien décrit ce phénomène qu'il a lui-même ressenti dans des vols d'essai au-delà de 50.000 pieds. Il est légitime de penser que de nouveaux aspects du vol, dans les solitudes de la haute atmosphère, dans le confinement de la cabine étanche et du scaphandre en l'absence de tout stimulus sensoriel extérieur à l'habitacle, puissent faire naître chez l'homme une angoisse dont il faut nécessairement tenir compte dans l'évaluation de la tolérance humaine et la sélection des aviateurs.

Les problèmes des réactions de la personnalité aux agressions du vol mènent inévitablement à soulever ceux de la *fatigue* du vol, en raison de la prépondérance fréquente de la composante psychique sur la composante physiologique (sensorielle, musculaire, etc.) de cette fatigue, bien que les facteurs physiologiques et psychologiques soient souvent intimement liés. L'importance de ce problème est considérable en ce qui concerne les limitations humaines, puisque la fatigue, que ce soit le surmenage, la fatigue épisodique ou la fatigue aiguë, se marque objectivement par la réduction de l'efficacité des performances. Dans ces trois formes de fatigue, nous trouvons, à des degrés variés, selon l'expression de Missenard, "une faillite d'un organisme psychologique et physiologique soumis à des stress variés, intenses et répétés, subissant une tension latente due à des problèmes psychologiques non résolus".

La complexité d'un tel phénomène, limitatif des possibilités humaines, justifie l'ampleur des études qui lui ont été consacrées et surtout les difficultés considérables rencontrées dans la détermination objective de son apparition et son évaluation chez l'aviateur.

De nouvelles approches des problèmes liés à la sélection psychique et à la résistance à la fatigue du vol sont actuellement tentées. L'étude des rapports entre certaines sécrétions endocriniennes, certaines normes biologiques de l'individu et sa sensibilité à l'anxiété sous l'influence de stress survenant en vol paraissent ouvrir des perspectives prometteuses. Des travaux basés sur l'Electroencéphalographie et la physiologie du système nerveux ont également ouvert des voies nouvelles dont il est cependant difficile à l'heure actuelle d'évaluer la valeur pratique d'une manière objective. En tout état de cause, les tests qui découleraient du succès de ces méthodes ne viendraient pas modifier ni supprimer les méthodes existantes. Ils apporteraient une contribution aux solides assises cliniques et physiologiques actuelles en remplaçant par des phénomènes biologiques mesurables des jugements psychologiques qui demeurent entachés de facteurs purement subjectifs. Ces méthodes perfectionneraient la détection des qualités caractérologiques et humaines

dans le domaine de la personnalité, points faibles incontestables dans le bilan des investigations qui mènent à une sélection dont on doit bien reconnaître qu'elle n'a pas encore résolu d'une manière satisfaisante le problème capital des prédispositions à la peur et de la résistance aux sollicitations de la peur.

(b) *Amélioration de l'Équipement et de son Adaptation à l'Homme.*

L'équipement personnel de vol d'un pilote militaire moderne pèse entre 15 et 25 kilogrammes. Le tableau de bord de l'avion augmente en complexité. Il est certain que ces deux facteurs ont une influence défavorable sur les processus physiques et surtout mentaux du pilote humain. Ce dernier est actuellement assailli par des informations si nombreuses qu'il lui devient impossible de les intégrer ou d'en évaluer l'importance relative. L'urgence d'une simplification et d'une standardisation a été reconnue depuis plusieurs années. Cette oeuvre dépend du travail en commun de l'ingénieur, du médecin et du psychologue. Il importe de souligner que ce travail, pour être profitable, doit se faire à un moment où le médecin est souvent oublié: le stade de la conception, de la mise sur plan, et des études initiales du nouveau type d'avion.

(c) *Endoctrinement Aéro-médical.*

Le pilote d'un avion moderne ne peut pénétrer dans le milieu physiologiquement mortel ou dangereux où se déroule le vol que s'il est porteur d'un équipement complexe destiné à assurer sa protection. Il est essentiel qu'il ait les connaissances indispensables à son utilisation correcte dans les circonstances normales et surtout dans les circonstances critiques.

D'autre part, il est également indispensable qu'il ait des notions sur les limitations physiologiques du vol afin qu'il ne franchisse pas ces limites de manière délibérée, et afin que, les ayant franchies, il puisse, in extrémis, exécuter les actions vitales qui lui sauveront la vie en le remplaçant en deçà des limites humaines par le jeu d'un équipement protecteur.

La nécessité d'un endoctrinement aéro-médical du pilote s'est imposée depuis quinze ans comme une nécessité inéluctable.

Elle s'imposera davantage encore dans l'avenir.

Cet endoctrinement doit comporter:

- (a) des conférences portant sur les aspects vitaux du vol: l'hypoxie, les effets des accélérations et les effets des décompressions, l'abandon de l'avion par éjection, etc.;
- (b) des démonstrations portant sur l'emploi de l'équipement de vol;
- (c) des séances d'instruction
 - (i) en caisson, portant sur l'hypoxie, la décompression explosive, l'emploi des vêtements à surpression, etc.;
 - (ii) sur rampes d'éjection par la familiarisation avec les techniques d'éjection;

- (iii) sur les méthodes de sauvetage, en bassin de natation ou dans des conditions de nature hostile.

Jusqu'à présent, les barrières biologiques inhérentes à la fragilité du pilote humain n'ont guère retardé l'évolution des progrès de la technique aéronautique. La délimitation exacte des réels problèmes humains, la fixation précise des limites infranchissables de la tolérance humaine ont suscité des méthodes qui permettent, par des artifices d'équipement ou de technique, de contourner les limitations du pilote humain. Elles lui ont conservé ce qui fait son incomparable avantage: la souplesse de l'adaptation du psychisme humain aux conditions imprévisibles, là où l'automatisme mécanique de contrôle du vol est impuissant.

Les techniques d'automatisme et de servomécanisme ne doivent pas être nécessairement considérées comme le premier pas vers la suppression de l'homme. Dans l'évaluation d'une part de la fragilité du pilote humain et d'autre part de la complexité et des défauts du pilote automatique ou téléguidé, il se pourrait que sous bien des rapports, la balance ne penche souvent en faveur du pilote humain. L'action de suppléance peut aller de pair avec une action de facilitation de la tâche humaine qui ramènerait celle-ci à un rôle qui demeure dans les limites des possibilités physiologiques et surtout psychologiques.

Dans ce concept, toute solution est possible à condition qu'elle se fasse dans le cadre d'une collaboration étroite et indispensable, dès la mise en étude de l'avion entre l'ingénieur, le médecin et celui que l'on ne doit pas oublier, le pilote.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. FR. VIOLETTE, Les effets physiologiques des décompressions explosives et leur mécanisme, *Méd. aéro.*, Tome 9, 3, 1954.
2. H. G. MOSELEY, *J. Aviat. Med.*, Vol. 28, février 1957.
3. GRANDPIERRE et COLIN, Problèmes physiologiques posés pour la sécurité du vol à haute altitude, Communication présentée à l'Assemblée générale de l'AGARD, le 7 mai 1956.
4. H. HABER, The Physical Environment of the Flyer, Air University, USAF, School of Aviation Medicine.
5. E. A. POULTON, Lawson's Disregard of Anticipation in Discussing the Effects of Blinking in Sensorimotor Skill, Flying Personnel Research Committee n° 442, Air Ministry, octobre 1950.
6. E. EVRARD, Le clignement des yeux, cause possible d'accident aérien, *Méd. aéro.*, Tome 12, n° 2, 1957.
7. G. C. DREW, Variations in Reflex Blink Rate during Visual-motor Tasks, Flying personnel research Committee n° 749, Air Ministry, décembre 1950.
8. E. A. POULTON, R. L. GREGORY, Blinking during Visual Tracking, Flying Personnel Research Committee n° 771, Air Ministry, juin 1951.
9. F. R. S. BARTLETT, The Effect of Flying upon Human Performance, Flying Personnel Research Committee n° 765, Air Ministry, 1951.
10. P. B. LEE POTTER, A Brief Survey of Aviation Medicine, *Collected Papers on Aviation Medicine*, AGARD 1955.
11. E. BÖHM, *Traité de psychodiagnostic de Rorschach*, Presses Universitaires de France, 1955.

12. B. CLARK, H. GRAYBIEL, The Break-off Phenomenon; a Feeling of Separation from the Earth, experienced by Pilots at High Altitude, *J. Aviat. Med.*, Vol. 28, p. 121, 1957.
13. R. H. FROST, Escape from High Speed Aircraft, *Aeron. Eng. Rev.* p. 35-45, septembre 1955.
14. W. ELLIS, R. ALLAN, Pilot's Eye Movements during Visual Approaches, and Landings, Flying Personnel Research Committee n° 888, Air Ministry septembre 1954.

DISCUSSION

E. A. POULTON*: I would like to congratulate M. Evrard on his most interesting lecture. There are many points in it which I would like to discuss with him fully but I will comment now on two only.

First, as regards Violette's work on explosive decompression and human limitations. In England I proposed to base upon it rules for the design of future aircraft, and for the use of existing ones to ensure safety and to eliminate the need for pressure clothing with all its discomforts and complications. However, we found that a close examination of U.K. accident experience, on the basis of Violette's formula appeared to question the validity of the formula. A number of different possible explanations of the discrepancy are being discussed and the matter of design rules is, for the present, in abeyance.

My second point concerns ejection seat development. I agree that modern aircraft are fast reaching, or in some cases exceeding, the highest speeds and altitudes at which present seats give adequate protection for emergency descent. But it remains a fact that even with our fastest and highest flying aircraft a large proportion of the total escapes made occur at speeds and altitudes well below the highest values of which the aircraft is capable. Hence in my view the first aim in the design of ejection seats or other escape systems must still be to uphold and improve the standard of reliability and safety over the broadest possible band of normal flight conditions. Reliability here must not, in my opinion, be prejudiced by attempts to cater for extreme flight conditions which seldom occur, though careful study of these are of course needed.

One final point on which perhaps a correction is needed. M. Evrard mentioned my name, if I heard him correctly, in connection with an English report on eye blinking during landing. I would like to make clear that though I know the work in question it was done and reported by staff of IAM and my only connection with it was to help in a small way to bring it to the notice of a few other engineers who, like myself, were concerned to see such results quickly applied in aircraft design and operation.

E. EVRARD: En ce qui regarde la première remarque de Monsieur Poulton, concernant les décompressions explosives, les diverses lois qui ont été proposées par plusieurs chercheurs, ont toutes tenté de tracer une limite entre une zone de sécurité en tenant compte du maximum de facteurs prévisibles, et une zone où la sécurité n'est plus garantie.

Ceci ne signifie pas qu'un cas qui se trouve dans la zone d'insécurité, au voisinage de la zone théorique de sécurité, est nécessairement mortel.

En ce qui concerne les limitations du siège éjectable, elles ont été considérées dans leurs relations avec les limites du tolérance humaine.

A ce point de vue, ce système devient insuffisant pour garantir la sécurité aux vitesses supersoniques du présent et de l'avenir.

* Director, Aircraft Mechanical Engineering, Ministry of Supply, Equipment Research and Development, London.