

10 NOV. 1970



**ICAS Paper No. 70-43**

ETUDE AU SIMULATEUR ET EN VOL DE LA CHARGE  
DE TRAVAIL DES EQUIPAGES D'AVION

by  
Jean-Claude L. Wanner  
Ingenieur en Chef de l'Armement  
Service Technique Aeronautique  
Paris, France

# **The Seventh Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences**

CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE, ROMA, ITALY / SEPTEMBER 14-18, 1970

Price: 400 Lire

ETUDE AU SIMULATEUR ET EN VOL DE LA CHARGE DE  
TRAVAIL DES EQUIPAGES D'AVION

Jean-Claude L. WANNER

Ingénieur en Chef de l'Armement  
Service Technique Aéronautique

Résumé

Pour posséder des qualités acceptables un avion doit :

- être facile à piloter,
- pouvoir effectuer les manoeuvres maximales prévisibles,
- pouvoir supporter l'effet des pannes ou des rafales.

L'étude des deux derniers critères relève de la mécanique rationnelle. Le premier critère met en cause le comportement du pilote qui ne peut être schématisé mathématiquement.

L'étude propose :

- une définition précise de la tâche de l'équipage,
- une analyse du comportement du pilote,
- une définition de la charge de travail,
- une critique des diverses méthodes de mesure de la charge de travail,
- les caractéristiques à imposer aux simulateurs pour permettre l'évaluation de la charge de travail.

Cette étude doit contribuer à fournir une solution rationnelle à la prévision et l'évaluation des qualités de vol des avions (organisation des postes de pilotage entre autres).

O. Introduction

Les premiers bâtisseurs de machines volantes ne se souciaient guère des qualités de vol de leurs appareils : l'essentiel était de voler ! Peu importait que cela fût bien ou mal (et c'était plutôt mal). Lorsque furent résolus les premiers problèmes de performances posés par le compromis poids/puissance, si difficile à établir pour le plus lourd que l'air, les pilotes commencèrent à exprimer quelques exigences sur la conduite de leurs appareils : ils désiraient voir leurs machines exécuter docilement les manoeuvres commandées. Ce désir était louable mais combien difficile à satisfaire, d'autant plus que chacun avait son opinion personnelle sur le sens des mots "exécution docile" et "manoeuvres commandées". Les ingénieurs introduisirent leurs expressions mathématiques pour ajouter à la confusion. Après quelques décennies de discussion où ingénieurs et pilotes cherchèrent à y voir clair en se jetant à la face du  $C_{M\alpha}$ , du  $C_{Mq}$ , de la stabilité et de la maniabilité, les ingénieurs gagnèrent la partie en imposant des règles sacro-saintes qu'ils pensaient et voulaient éternelles. Ainsi le centre de gravité perdit sa belle indépendance des temps

héroïques et se trouva assigné à résider entre deux limites bien précises en avant du foyer. Les gouvernes de gauchissement furent dessinées en fonction du tout-puissant critère de  $pb/2V$  et la surface de dérive choisie pour avoir une  $V_{mc}$  correcte !

Tout était devenu très simple : il suffisait de vérifier les critères lors des essais en vol pour pouvoir déclarer "bon" le nouveau prototype ; ainsi, par exemple, le pilote devait se trouver satisfait puisque la courbe de déplacement de manche en fonction de la vitesse avait une pente satisfaisant à la norme.

Il y avait, bien entendu, de temps en temps quelques pilotes à l'esprit indépendant pour déclarer que cet avion était exécrable, mais l'on faisait bien vite taire ces incongruités en brandissant le règlement de qualités de vol. L'avion n'était pas considéré comme bon parce qu'il satisfaisait les pilotes mais était déclaré satisfaire les pilotes parce qu'il était "bon".

Bien entendu, tout n'était pas mauvais dans ces normes, bien au contraire, et si le constructeur en suivait sagement les règles tout en demandant tout aussi sagement l'avis de ses pilotes au cours de la mise au point, il parvenait effectivement à produire un bon avion.

L'augmentation de la complexité des avions, l'élargissement des domaines de vol, en vitesse et altitude, le besoin de plus en plus impérieux de voler et surtout de décoller et d'atterrir par tous les temps, font que les règles simples dites de qualités de vol sont devenues caduques. Ces règles ne faisaient intervenir en effet que les caractéristiques aérodynamiques et massiques de l'avion, sans tenir compte, ni des informations fournies au pilote (tableau de bord), ni de l'environnement (turbulence, visibilité), ni des types de manoeuvres à effectuer (un chasseur VTOL et un avion de transport supersonique n'effectuent pas les mêmes manoeuvres de décollage et d'atterrissage).

Il est apparu nécessaire de repenser chaque règle en dégageant l'objectif, souvent oublié, qui avait présidé à son élaboration. L'objectif général d'une exigence de qualités de vol est d'assurer la sécurité, c'est-à-dire de minimiser autant que faire se peut les risques d'accidents.

I. Les nouveaux critères de qualité de vol

L'étude des accidents montre que ceux-ci peuvent être classés en deux catégories :

- les accidents qui auraient pu être évités par une modification de l'architecture, de la technologie ou du

mode d'utilisation de l'avion ;

- les accidents qui proviennent d'une défaillance du personnel ou du matériel de contrôle aérien et de guidage (panne d'un émetteur ILS, ordre de voler à un niveau déjà occupé par un autre avion etc).

Les accidents du premier type, qui seuls intéressent les qualités de vol, se produisent chaque fois que l'un des paramètres caractérisant le fonctionnement global de l'avion ou le fonctionnement de l'un de ses organes dépasse une valeur critique imposée par des considérations aérodynamiques, thermodynamiques ou de résistance de structure (par exemple altitude, facteur de charge, température et pression cabine, incidence, vitesse de rotation des compresseurs, température devant turbine etc).

Le franchissement d'une limite se fait à la suite d'une série d'événements des trois types suivants :

- a) le pilote dispose des commandes nécessaires pour maintenir le point de fonctionnement dans le domaine autorisé, mais le travail se trouve trop difficile pour un opérateur humain (rapidité et nombre d'interventions trop élevés, informations insuffisantes sur la position relative du point et des limites) : le pilote laisse donc le point de fonctionnement se rapprocher d'une limite ou même la dépasser (incident de Pilotabilité) ;
- b) sous l'effet de perturbations externes (rafales ou ondulations de la piste) ou internes (pannes y compris le feu) le point de fonctionnement approche ou dépasse une limite soit parce qu'il s'est lui-même déplacé (augmentation de l'incidence sous l'effet d'une rafale, augmentation d'une contrainte dans la structure sous l'effet d'une ondulation de piste, diminution d'altitude ou augmentation du dérapage sous l'effet d'une panne moteur, augmentation brutale de l'effort sur une commande suite à une panne de compensateur etc) soit parce que la limite elle-même a été changée (diminution de l'incidence de décrochage sur rupture de volet, baisse de résistance d'un élément de structure sous l'effet du feu etc) (incident de sensibilité aux Perturbations) ;
- c) pour suivre la trajectoire imposée à l'avion ou pour rejoindre cette trajectoire dont il s'est écarté pour l'une des deux raisons précédentes, le pilote doit effectuer une "manoeuvre" qui peut amener le point de fonctionnement à se rapprocher d'une limite (incident de Manoeuvrabilité).

Ainsi, au cours d'une approche ILS sans visibilité, en atmosphère turbulente, le pilote, par suite d'une panne des systèmes d'aide au pilotage, laisse la vitesse diminuer de 15 kt et vole 50 ft au-dessous du plan de descente (pilotabilité)

Notant l'écart d'altitude, il effectue une manoeuvre de tangage pour le corriger (manoeuvrabilité). Enfin une rafale vient s'ajouter aux deux augmentations d'incidence, dues à la diminution de vitesse et à la manoeuvre, pour faire décrocher l'avion (sensibilité aux perturbations).

A titre de deuxième exemple, un feu cabine survenant au cours de la phase croisière peut conduire à la catastrophe :

- par augmentation de la température cabine dans une zone suffisamment étendue ou par production de gaz toxiques - mort de passagers par brûlures ou asphyxie-- par rupture d'un élément important de structure (dépassement des limites physiologiques dans le premier cas des limites structurales dans le second) - (Sensibilité aux perturbations) ;
- par rupture des commandes (diminution de la manoeuvrabilité) - (accident de manoeuvrabilité) ;
- par suite d'une erreur du pilote sous l'effet de la peur ou par détérioration de l'environnement (fumées, chaleur etc) - (accident de pilotabilité).

En conséquence à la suite d'une série d'incidents des trois types précédents le point de fonctionnement se rapproche des limites de telle sorte qu'un dernier événement, toujours de l'un des trois types, conduit le point de fonctionnement à franchir une limite.

Chaque exigence de qualité de vol a pour objectif de diminuer les risques d'accident consécutif à la réalisation d'un événement de l'un de ces trois types. A chaque type d'événement correspondent donc des critères de l'un des trois types suivants :

- Critères de Pilotabilité ;
- Critères de Sensibilité aux perturbations ;
- Critères de Manoeuvrabilité.

L'élaboration et la vérification des règles ayant pour objectifs le respect des critères des deux derniers types relèvent de la mécanique rationnelle : il suffit d'étudier les performances maximales de l'avion (mouvement autour du centre de gravité) et sa réponse aux diverses perturbations (rafales et pannes). Par contre le pilote intervient dans les règles relevant des critères du premier type ; il n'est plus question comme nous allons le voir de traiter le problème de façon purement mathématique. On ne peut en effet se contenter d'étudier la réponse de l'avion à une modification de position de gouverne ; il faut traiter l'ensemble de la boucle de pilotage, commande, mouvement de l'avion, informations de position et d'assiettes, pilote, commande, etc...

Or il n'est pas possible dans l'état actuel de nos connaissances de représenter le fonctionnement du pilote par une fonction de transfert "information-action sur les commandes". Une telle schématisation du comportement humain n'a été tentée, avec des bonheurs divers d'ailleurs, que dans des cas extrêmement simplifiés (une entrée, une sortie : poursuite d'un spot

sur un écran cathodique par exemple) ; ces cas sont sans commune mesure avec le pilotage réel d'un avion.

Des progrès seront peut-être accomplis en matière de fonction de transfert du pilote, mais nous doutons fortement de voir un jour le comportement de l'homme mis en équations ; il serait d'ailleurs assez désespérant de voir l'homme abaissé au rang de boîte noire même hautement miniaturisée.

Le déroulement d'un vol comporte trop de péripéties pour que l'on puisse étudier le comportement du pilote sans tenir compte des différentes tâches qui lui sont imposées. Une définition précise de la tâche du pilote s'impose donc et nécessite une série de définitions préalables.

## II. Définitions

- Le vol est décomposé en "Phases" ayant chacune un objectif général de pilotage (Décollage, Montée, Croisière, Approche) et en Sous-Phases ayant chacune un objectif élémentaire de pilotage ("Descente finale" de la Phase Approche ayant pour objectif d'amener l'avion à 300 ft en bonne position pour effectuer l'atterrissage) ; ainsi l'objectif de chaque Sous-Phase est déterminé avec des tolérances telles que la Sous-Phase suivante puisse être entamée dans de bonnes conditions.

Un vol est donc composé d'une succession de Sous-Phases ; le choix de cette série caractérise le vol. Il faut noter que le choix d'une Sous-Phase plutôt qu'une autre peut être imposé par l'Etat de l'Avion (une panne peut nécessiter par exemple une "descente en secours") ou par l'Etat de l'Atmosphère (le brouillard peut imposer la Phase "Approche ILS" au lieu de la Phase "Approche à vue").

- En appelant Commandes Principales les commandes utilisées au cours d'une Sous-Phase dans la boucle de pilotage de l'avion et Sélecteurs les autres commandes laissées en position fixe\* durant cette même Sous-Phase, la Configuration Affichée est définie par l'énumération des positions des divers Sélecteurs.

- La Configuration Réelle de l'Avion est définie par la Configuration Affichée et une combinaison de pannes affectant les systèmes commandés ou non par les Sélecteurs.

- L'Etat de l'Avion est défini par la connaissance de la Configuration Réelle, de la masse et de la distribution de masse (en général la distribution de masse peut se caractériser simplement par le centrage).

L'Etat de l'Atmosphère est défini par les sept paramètres suivants : pression, température, humidité, intensité de la turbulence, gradient de température, visibilité et loi de variation du vent (grandeur et direction) en fonction de l'altitude (ce dernier paramètre est utile pour les Phases au voisinage du sol ; les six premiers résument les influences de l'atmosphère sur le

comportement de l'avion et de l'équipage).

Parallèlement à l'Etat de l'Atmosphère, l'Etat de la Piste est caractérisé par cinq paramètres : longueur - largeur - déclivité moyenne - profil en élévation ("ondulations") - coefficient de frottement. L'Etat de la Piste n'intervient bien entendu que pour les Phases de Décollage et d'Atterrissage. (Il doit être alors cité en plus de l'Etat de l'Atmosphère).

Pour atteindre l'objectif de la Sous-Phase, le pilote suit une Loi de Pilotage (lois entre les divers paramètres de vol, altitude, vitesse etc) qui dépend de l'Etat de l'Avion (pannes en particulier) et de l'Etat de l'Atmosphère (turbulence, visibilité, vent)\*\*.

- Une Sous-Phase, un Etat de l'Avion, un Etat de l'Atmosphère et une Loi de Pilotage définissent la Tâche de l'équipage.

La Tâche assignée au pilote étant ainsi clairement définie, celui-ci doit respecter un certain nombre de contraintes pour exécuter cette Tâche..

Pour la Sécurité Immédiate de l'avion le pilote doit respecter toutes les limitations avion, par exemple les limitations sur l'incidence (risque de décrochage) ; ces diverses limitations se traduisent par des limitations sur les paramètres directement accessibles au pilote : vitesse et facteur de charge. Toujours pour la sécurité immédiate de l'avion, le pilote doit également respecter les limitations opérationnelles ; par exemple la position de l'avion dans l'espace est limitée par le relief local ; en général cette dernière limitation se traduit par une hauteur minimale au-dessus du sol ; une autre limitation opérationnelle peut provenir de l'organisme de contrôle de l'espace aérien qui fixe à l'avion une tranche d'altitude à respecter.

D'un autre côté le pilote doit prendre garde à faire passer l'avion à l'intérieur de la fenêtre caractérisant l'objectif de la Sous-Phase ; il doit donc respecter les tolérances de l'objectif, ce respect assurant la sécurité, non pas immédiate comme précédemment, mais la Sécurité à Terme.

En matière de Sécurité à Terme nous pouvons distinguer la Sécurité à Court Terme qui est assurée par le respect des tolérances de l'objectif de la Sous-Phase et la Sécurité à Long Terme qui est assurée par le respect des tolérances de l'objectif de la Phase elle-même. Alors que le respect de la Sécurité à Court Terme pose un problème de qualités de vol, le respect de la Sécurité à Long Terme pose plutôt un problème de performance et de navigation.

Nous ne nous intéresserons ici qu'aux problèmes posés par la Sécurité Instantannée et la Sécurité à Court Terme.

(\* ) Une commande peut être Sélecteur au cours d'une Sous-Phase et Commande Principale au cours d'une autre Sous-Phase (Exemple : le trim de profondeur est Sélecteur au décollage et Commande Principale en Approche).

(\*\* ) Plusieurs Lois de Pilotage peuvent être définies pour une Sous-Phase, un Etat de l'Avion et un Etat de l'Atmosphère et laissées au choix du pilote ou du contrôle aérien (loi de montée par exemple).

### III. Etude de la Pilotabilité

Le but d'une exigence de Pilotabilité est de s'assurer que la difficulté de pilotage au cours de l'exécution d'une Tâche déterminée est suffisamment faible compte tenu de la probabilité de la Tâche. Cette notion de probabilité sort de notre propos, mais il est facile de montrer que l'on peut, en théorie du moins, affecter une probabilité à chaque Tâche, celle-ci étant définie de façon précise, comme nous l'avons vu plus haut. Il est évident par ailleurs que le risque d'accident global sera d'autant plus faible que la difficulté de pilotage sera plus faible pour les Tâches les plus probables. A niveau de sécurité donné on peut admettre une difficulté de pilotage croissante lorsque la probabilité de la Tâche diminue. Ces considérations sont largement développées par ailleurs (référence 1).

Essayons de creuser plus en détail la notion de pilotabilité : D'où provient la difficulté du pilotage ? Quelles sont les raisons d'un accroissement de cette difficulté ? Comment une difficulté trop importante peut-elle conduire à des erreurs ? Peut-on pratiquement mesurer cette difficulté ?

L'expérience suivante déjà exécutée dans plusieurs centre d'essais sous des formes plus ou moins voisines nous permettra de proposer un début de réponse à toutes ces questions.

On demande à un pilote d'exécuter sur un simulateur au sol ou un simulateur volant, une phase de vol bien déterminée, l'approche ILS par exemple. L'avion simulé est un avion connu pour sa facilité de pilotage. Le pilote exécute donc sa tâche avec facilité et, par conséquent, parvient aisément à atteindre l'objectif de la Sous-Phase, c'est-à-dire, dans notre cas particulier, amène l'avion à 300 pieds face à la piste dans de bonnes conditions pour exécuter la Sous-Phase suivante (Arrondi).

Modifions alors les réglages du simulateur, c'est-à-dire changeons les caractéristiques aérodynamiques et massiques de l'avion simulé : nous opérons progressivement de façon à détériorer lentement les qualités de vol de l'appareil.

Observons les essais successifs lorsque les qualités de l'avion se détériorent ainsi.

Pour les premiers essais, un observateur extérieur qui ne peut juger que les performances obtenues par l'ensemble du pilote et de sa machine, ne constate aucune variation de ces performances ; autrement dit le pilote atteint toujours l'objectif de la Sous-Phase avec la même précision ; par contre, si l'on interroge le pilote, celui-ci avoue avoir rencontré une difficulté croissante d'exécution.

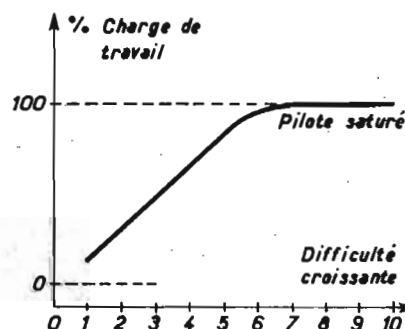
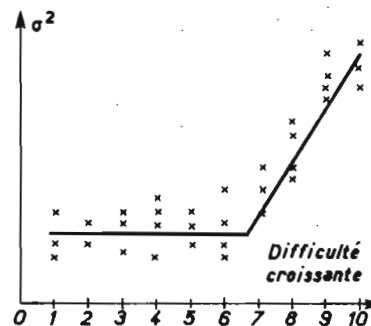
Si nous continuons à détériorer les qualités de l'avion, nous observons un brusque changement de nature des phénomènes : malgré tous les efforts du pilote, celui-ci ne parvient pas à atteindre l'objectif de la Sous-Phase avec la précision requise pour entamer correctement l'arrondi ; tout se passe comme si le pilote était saturé

par le travail demandé et ne pouvait l'exécuter correctement ; il faut noter toutefois qu'il conserve le contrôle de l'avion, c'est-à-dire parvient à respecter la sécurité instantanée ; mais il est obligé d'utiliser tous ses moyens pour assurer ce contrôle et ne peut plus respecter l'objectif de la Sous-Phase.

Si nous détériorons encore les qualités de la machine, le pilote finit par ne même plus pouvoir garder le contrôle instantané de celle-ci.

Il faut noter qu'au cours de cette expérience les modifications apportées à la machine n'en ont aucunement modifié la manoeuvrabilité ; dans chaque cas le pilote disposait de moyens suffisants pour respecter les deux types de sécurité ; autrement dit un système automatique remplaçant le pilote aurait pu réussir là où le pilote a échoué.

En répétant de nombreuses fois ce genre d'expérience avec différents pilotes, il est possible de dresser des statistiques portant sur les performances réalisées dans chaque cas : écarts quadratiques moyens des positions de l'avion à 300 pieds, des positions des commandes pendant la Sous-Phase, des variations de vitesse autour de la vitesse recommandée, etc. En regroupant ces résultats pour les essais considérés par les pilotes comme étant de difficultés équivalentes\*, portons ces résultats sur un graphique où figurent en ordonnées les écarts quadratiques du paramètre étudié et en abscisse les difficultés croissantes. On obtient des courbes moyennes ayant sensiblement l'allure donnée figure 1.



(\*) Grâce à des méthodes dérivées de celles mises au point au centre d'essai de la NASA à Ames par George E. Cooper, il est possible d'établir dix classes de difficulté de pilotage identifiables par les pilotes ; les pilotes rôtés à ces méthodes d'évaluation sont en général d'accord à une classe près pour caractériser la difficulté d'essai (ref. 2).

Si d'un autre côté nous portons en ordonnée la charge de travail du pilote, nous obtenons un graphique du type de celui donné figure 2. Nous n'avons pas encore défini de façon précise la charge de travail ; elle n'est fournie pour l'instant que par une appréciation subjective du pilote, la valeur 100 % correspondant au maximum que celui-ci est capable de fournir.

Cette expérience montre ainsi qu'il n'est pas possible d'utiliser des mesures de performances de l'ensemble homme-machine pour évaluer la difficulté de pilotage ou la charge de travail du pilote, du moins dans la zone où la charge de travail varie. Or c'est précisément dans cette zone qu'il est intéressant d'évaluer cette charge de travail : on conçoit aisément que pour des tâches que le pilote doit effectuer journellement il est fondamental que la charge de travail soit très faible (donc le travail très facile) ; la charge maximale que peut fournir un pilote peut, en effet, être réduite pour des raisons physiques (fatigue, maladie) ou des raisons psychologiques (préoccupations extérieures au pilotage, soucis familiaux ou professionnels par exemple). Or l'erreur de pilotage peut se produire chaque fois que la charge de travail nécessaire est supérieure à la charge disponible chez le pilote.

Par contre, pour les tâches ayant un caractère exceptionnel, on peut accepter une charge de travail nécessaire plus grande puisque la probabilité de se trouver à avoir à accomplir cette tâche avec une faible charge de travail disponible est alors très petite.

On voit donc tout l'intérêt de pouvoir définir avec précision puis mesurer la charge de travail, mais notre expérience montre que l'on n'obtiendra rien par mesures des performances avion.

#### IV. Charge de travail

L'analyse du comportement du pilote doit nous permettre de répondre à la question "le travail du pilote est-il manuel ou intellectuel ?" et de définir alors la charge de travail.

##### 1. Recueil des informations de pilotage

Les paramètres définissant la trajectoire de l'avion et ceux intéressant la Sécurité Immédiate (position, vitesses, assiettes) sont connus de l'équipage de diverses façons :

- certains sont directement ou indirectement mesurés et présentés sur le tableau de bord sous forme analogique, quelquefois digitale (parfois des indications de position sont transmises par radio) ;
- certains ne sont pas mesurés, car directement accessibles au pilote (position de l'avion en vol à vue, accélérations linéaires ou angulaires) ;
- enfin certains paramètres caractérisant l'Etat de l'Avion sont fournis au tableau de bord (régimes moteur, position du train, des volets, etc).

L'ensemble de ces données est recueilli par les différents capteurs humains : oeil (vision centrale), oreille, membres (capteurs d'efforts aux commandes), oeil (vision périphérique), oreille interne (capteur d'accélération

angulaire) ensemble du corps (capteurs d'accélération linéaire).

Il faut noter qu'une donnée n'est recueillie par un capteur et transmise au cerveau (donc utilisée) que dans la mesure où le cerveau en donne l'ordre, c'est-à-dire "appelle" l'information. Ceci est d'autant plus vrai que le capteur est capable de recueillir des données plus précises (nous avons cité ci-dessus les capteurs dans l'ordre de précision des données recueillies) ; le recueil des informations par l'oreille interne, l'ensemble du corps et la vision périphérique, s'apparente à un acte réflexe et est généralement utilisé à titre d'alarme pour déclencher le recueil volontaire des données précises (mobilisation de l'attention).

Ces remarques sont d'autant plus importantes qu'elles ont pour conséquence que le cerveau ne peut recueillir simultanément plusieurs données précises : il dirige le regard sur tel instrument, tel phénomène, il commande l'écoute de tel signal, demande l'évaluation de tel effort sur une commande, ceci successivement et non simultanément. Cet ordre de balayage peut être modifié par la transmission d'un signal d'alarme, mais le signal d'alarme doit être d'autant plus intense que l'attention est plus mobilisée. (Combien de pilotes se sont posés train rentré sans entendre l'avertisseur sonore ou sans voir le cli-gnotant signalant le train non sorti parce que la visibilité étant mauvaise et le trafic aérien important, ils portaient toute leur attention sur la captation d'information visuelle de la position de la piste et des autres avions).

Les données une fois recueillies sont transmises au cerveau sous forme d'influx nerveux et traitées par celui-ci qui, soit par comparaison directe avec des données mises en mémoire, soit par calcul suivant des "programmes" stockés en mémoire en déduit deux types différents d'actions :

- a) une action par l'intermédiaire des mains et des pieds sur les commandes utilisées comme commandes principales au cours de la Sous-Phase ;
- b) une sélection d'un capteur particulier en lui demandant de recueillir une donnée particulière.

Analysons de plus près ces deux "sorties" du cerveau en donnant un exemple.

##### 2. Exemple de travail du pilote

Supposons le pilote amené à effectuer sans visibilité la Sous-Phase "Descente finale" de la Phase Approche ILS. Il dispose de l'indicateur d'I.L.S. à aiguilles croisées et de la planche de bord classique : horizon, altimètre, variomètre, anémomètre, conservateur de cap, "bille et aiguille".

A un instant donné le pilote a rassemblé l'information suivante :

- la vitesse est égale à la vitesse d'approche désirée ;
- le cap est égal au cap "localizer" ;
- les ailes sont horizontales ;
- l'assiette longitudinale est à la valeur recommandée (tenant compte de l'incidence et de la pente) ;

- l'indicateur I.L.S. montre que l'avion se trouve au-dessus et à droite de la trajectoire I.L.S.

En réalité le cerveau du pilote n'a pas recueilli telles quelles ces informations. Par un balayage des yeux (nous reviendrons sur ce point) il a recueilli

- une position de l'aiguille de l'anémomètre ;
- une position de l'aiguille ou de l'alidade du conservateur de cap ;
- une position angulaire de la barre de l'horizon artificiel et une position du centre de cette barre par rapport à la maquette ;
- une position des deux aiguilles de l'I.L.S. par rapport au repère central de l'indicateur.

C'est donc à la suite d'une opération mentale assez complexe comportant en particulier des comparaisons avec des données en mémoire (vitesse d'approche\*, cap localizer, assiette longitudinale et latérale) que le pilote parvient à l'analyse de cette situation.

Par une seconde opération mentale il en déduit une tactique à suivre pour respecter la sécurité à court terme, c'est-à-dire passer dans la fenêtre objectif à 300 pieds (la loi de pilotage est là pour l'aider à trouver la bonne tactique).

Dans notre situation particulière le pilote décide donc d'incliner l'avion à gauche et de diminuer l'assiette longitudinale. Sachant par expérience qu'une diminution d'assiette se traduit par une augmentation de vitesse sur trajectoire, il décide également de réduire la poussée (ou d'augmenter la traînée en utilisant les aérofreins) Suivant son entraînement, c'est-à-dire suivant le nombre de données emmagasinées en mémoire, le pilote décidera, avec plus ou moins de précision, de l'ordre de grandeur des manoeuvres élémentaires à effectuer. Le pilote sait que pour corriger un écart de deux points de l'indicateur ILS (en latéral), en début de descente, il suffit d'incliner l'avion à gauche de 20° en 5 secondes, de l'incliner à droite de 20° puis de le ramener ailes horizontales avec le même taux pour corriger l'écart ; bien entendu les temps ne sont pas connus du pilote de façon aussi précise et les manoeuvres ne se font pas au chronomètre : le pilote utilise le taux d'inclinaison habituel et sait qu'un balancement 20° à gauche, 20° à droite et retour à l'horizontal donne la correction nécessaire. De même le pilote entraîné saura qu'une diminution d'assiette longitudinale de 2° pendant dix secondes suivie d'un retour à l'assiette initiale corrigera l'écart d'altitude. Enfin, il saura qu'une diminution de 100 t/m est nécessaire pour éviter une augmentation de vitesse hors tolérance au cours de la manoeuvre (si l'avion est au premier régime, le pilote pourra estimer qu'une variation de poussée n'est pas nécessaire pour une manoeuvre aussi courte).

(\*) Ces valeurs sont quelquefois mémorisées sous forme directe de position de l'aiguille (on sait par exemple qu'en approche l'aiguille du badin est horizontale à gauche ou verticale en haut). Ce type de mémorisation dépend de la nature de la figuration.

(\*\*) La main n'étant pas un capteur de position mais un capteur d'effort, le pilote ne détermine pas une valeur de déplacement de manette mais une réduction chiffrée en nombre de tours par exemple.

Jusqu'ici, le pilote n'a pas agi ; il n'a effectué que des opérations mentales d'analyse de la situation et de décision de tactique à suivre. Il lui reste encore une opération mentale à effectuer : déterminer les actions manoeuvres élémentaires, actions sur la commande de gauchissement, sur la commande profondeur et sur la manette des gaz ; là encore s'il possède un entraînement suffisant il saura qu'il faut fournir tel effort au gauchissement pendant tant de temps pour incliner l'avion à gauche de 20° au taux normal, tel effort sur la profondeur, tel déplacement de la manette des gaz\*\*.

Une fois cette décision prise le pilote agit, c'est-à-dire déplace les commandes. C'est alors qu'intervient le processus de contrôle des actions sous forme d'ordre, aux divers capteurs, de recueil de données nouvelles.

Les actions sur les commandes vont être modifiées en fonction des résultats obtenus, c'est-à-dire en fonction des données recueillies : il y a donc une succession de boucles d'asservissement entre chaque action sur une commande et son résultat jusqu'à ce que le résultat désiré soit acquis.

L'acquisition des données particulières d'évaluation du résultat nécessite l'appel par le cerveau de ces données c'est-à-dire la mise en état de transmission du capteur adapté à la mesure. L'ordre de "mise en service" du capteur est transmis au capteur par ce que nous appellerons une boucle interne du cerveau pour la différencier nettement de la boucle externe d'asservissement décrite à l'alinéa précédent.

La première boucle interne à être mise en service est la boucle main cerveau (ou pied cerveau) mettant en éveil le capteur d'effort constitué par la main (ou le pied).

Ainsi le cerveau va commander une action de déplacement du manche vers la gauche et commander la mise en service du capteur d'effort qui transmet une indication d'effort : le cerveau commandera le déplacement de la commande jusqu'à obtenir l'effort désiré ; le travail peut se schématiser ainsi :

- ordre de déplacement,
- appel de donnée d'effort,
- transmission de la donnée d'effort,
- comparaison de l'effort mesuré avec l'effort désiré,
- action corrective de déplacement,
- appel de donnée d'effort,
- etc.

L'action élémentaire ainsi réalisée : effort donné sur la commande de gauchissement, une deuxième boucle externe intervient pour contrôler la manoeuvre élémentaire. Le pilote sait que le taux de basculement en gauchissement doit être proche du taux désiré, mais il veut d'une part

le vérifier, d'autre part stopper l'action lorsque l'angle de gîte a atteint 20°. Il met donc en service une deuxième boucle interne, la boucle oeil cerveau, pour recueillir les données nécessaires au contrôle de la boucle externe.

D'une façon analogue à ce qui a été décrit ci-dessus le travail se schématise ainsi :

- ordre d'effort (ce qui suppose le contrôle d'effort décrit ci-dessus),
- appel de donnée d'angle de gîte,
- transmission de la donnée d'angle de gîte,
- comparaison avec l'angle de gîte désiré,
- correction de l'ordre d'effort,
- appel de donnée d'angle de gîte,
- etc.

Si le pilote veut contrôler le taux d'inclinaison latérale, le travail sera plus complexe car l'acquisition de la donnée doit se faire par au moins deux prélèvements de données d'angle  $\Phi$  séparés par un intervalle de temps donné pour estimer le  $\Delta \Phi / \Delta t$ . Le pilote ayant ainsi modifié l'angle de gîte doit cette fois contrôler l'effet de cette manoeuvre sur sa trajectoire ; il lui faut recueillir des données sur la trajectoire ; il va donc appeler ces données nouvelles en dirigeant l'oeil, par la boucle interne oeil cerveau, sur l'instrument le plus apte à le renseigner.

Cette fois il ne va pas s'instaurer une boucle externe conduisant à une action immédiate du pilote. Il y a d'abord appel d'un certain nombre d'informations (cap et position de l'aiguille de l'indicateur d'ILS), analyse de la situation et par un processus analogue à celui décrit ci-dessus mais moins complexe, décision de modification de la tactique.

Nous avons décrit ici le cas du contrôle de trajectoire par le système ILS. Si ce contrôle se fait grâce au système GCA, l'acquisition des données de trajectoire se fait par l'intermédiaire de l'oreille et c'est la boucle interne oeil cerveau qui sera alors mobilisée à cet effet.

Il faut noter que dans ce dernier cas une partie de l'analyse de la situation est faite par le contrôleur GCA au sol qui "prépare" la tactique à suivre en donnant non seulement des indications de position mais des ordres d'actions (ordre de cap à suivre et variations du taux de descente).

### 3. Analyse du travail du pilote

Cette remarque étant faite, on peut résumer le travail du pilote de la façon suivante :

- acquisition de données générales portant sur la position de l'avion par rapport à la trajectoire désirée et des assiettes de l'avion, c'est-à-dire paramètres intéressant la Sécurité à Court Terme et paramètres intéressant la Sécurité Immédiate (il s'agit bien entendu non seulement des paramètres de position mais également de leurs dérivées par rapport au temps) ;
- analyse de la situation et décision de tactique (basée sur la loi de pilotage) ;

- décomposition de la tactique en manoeuvres élémentaires et détermination de leurs "amplitudes" ;
- pour chaque manoeuvre élémentaire détermination de l'amplitude de l'action élémentaire sur les commandes ;
- action sur une commande, contrôle de l'effort (mise en service de la boucle interne main-cerveau) ;
- contrôle de la manoeuvre (modification de l'action élémentaire c'est-à-dire de l'effort) (mise en service de la boucle interne oeil cerveau recueillant les données relatives aux paramètres intéressant la sécurité immédiate) ;
- contrôle de la tactique par analyse des paramètres intéressant la Sécurité à Court Terme (mise en service de la boucle interne oeil cerveau ou oeil cerveau).

Nous n'avons décrit jusqu'ici que le début de l'action générale du pilote tendant à "rejoindre" la loi de pilotage. (Heureusement la manoeuvre est moins longue à exécuter qu'à décrire). Au moment où le pilote ayant achevé sa première manoeuvre élémentaire (inclinaison de 20° à gauche) déclenche la boucle interne oeil cerveau pour l'acquisition des paramètres nécessaires à l'analyse de la situation, celle-ci peut avoir évolué d'une façon différente de celle prévue : chute de la vitesse par exemple sous l'effet d'une rafale ; le pilote peut donc être amené à abandonner la tactique initiale pour rétablir promptement la situation nouvelle qui peut se révéler dangereuse (non respect de la Sécurité Immédiate).

D'une façon générale à chaque analyse de la situation le pilote vérifie d'abord les paramètres intéressant la Sécurité Immédiate puis les paramètres intéressant la Sécurité à Court Terme : la tactique décidée à pour premier but de respecter la Sécurité Immédiate (détermination des manoeuvres élémentaires nécessaires) et pour second but, une fois la Sécurité Immédiate assurée, de respecter la Sécurité à Court Terme.

Ceci signifie qu'une fois une manoeuvre élémentaire effectuée (parfois même au cours de la manoeuvre), le pilote doit surveiller non seulement les paramètres utiles au contrôle de la manoeuvre mais également tous les autres paramètres.

Cette opération est commandée par le cerveau qui centre la boucle interne oeil-cerveau successivement sur les différents instruments ; le passage d'un instrument à l'autre et l'ordre de balayage est commandé soit par un programme mis en mémoire et résultant de l'expérience du pilote, soit par une déduction logique résultant des lectures des instruments précédents et d'une analyse partielle de la situation : on peut "sauter" la lecture de l'altimètre si l'on a constaté que le variomètre est toujours au zéro (cas du vol en palier), ou la lecture du cap si l'angle de gîte est toujours nul.

Notons que cette opération de contrôle de la situation est très partiellement assurée par les capteurs non nobles qui peuvent intervenir pour avertir le pilote d'une situation anormale.

Nous avons décrit en détail le déroulement d'une manoeuvre avec sa boucle de contrôle externe



nécessitant l'utilisation d'une boucle interne (oeil-cerveau en général). Dans certains cas la manoeuvre peut être effectuée partiellement en boucle ouverte par le pilote ; celui-ci en profite alors pour centrer la boucle interne oeil-cerveau sur d'autres paramètres afin de renouveler plus rapidement son analyse de la situation ; cela lui permet de diminuer les retards de la boucle externe de contrôle de la tactique.

Cette remarque met en lumière le fait suivant très important.

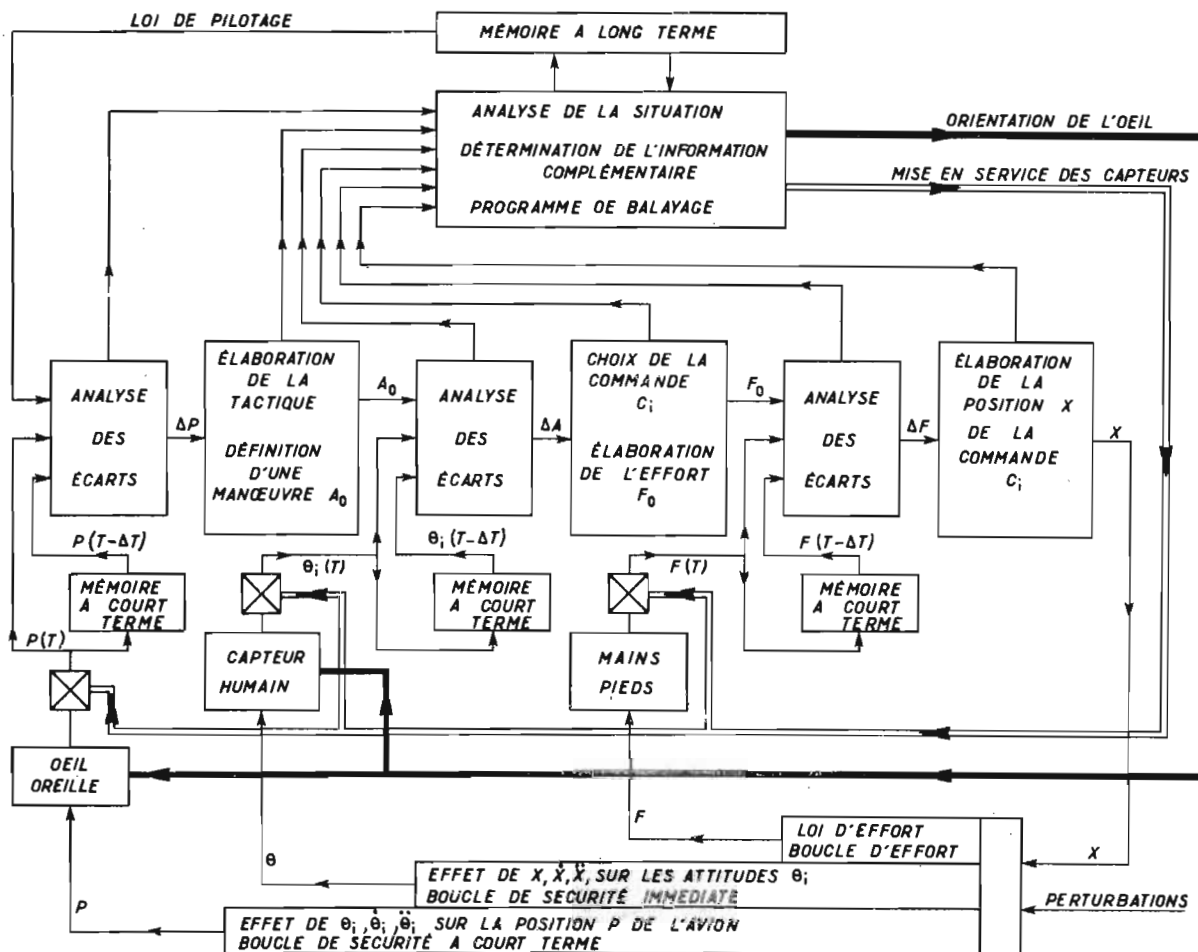
Toutes les opérations mentales d'analyse de situation, de décision de tactique, d'élaboration des manoeuvres élémentaires et des actions sur les commandes, de recueil d'information (commande des boucles internes) ne peuvent être effectuées que successivement à de très rares exceptions près, suivant un processus schématisé figure 3.

Nous sommes maintenant en mesure de proposer une définition de la Charge de Travail du pilote.

Le processus de pilotage et par conséquent le nombre des opérations élémentaires d'acquisition de traitement des données, d'élaboration des manoeuvres et des actions sur les commandes, d'élaboration du processus d'acquisition et d'analyse de données, dépendent de la Sous-Phase, de l'Etat de l'Avion, de l'Etat de l'Atmosphère et bien entendu de la Loi de Pilotage et du Travail Auxiliaire qui sont à la base du processus à suivre.

#### V. Définition et mesure de la Charge de Travail

La Charge de Travail du pilote (ou en généralisant la Charge de Travail de l'équipage) durant une Sous-Phase est mesurée par le nombre des opérations élémentaires de traitement de l'information décrites ci-dessus.



Comme nous venons de le voir la Charge de Travail est déterminée par la Tâche (Sous-Phase, Etat de l'Avion, Etat de l'Atmosphère, Loi de Pilotage et Travail Auxiliaire).

Une conséquence immédiate de la définition de la Charge de Travail est la suivante : il est pratiquement impossible de la mesurer directement. Une mesure directe reviendrait en effet à compter l'ensemble des bits d'information traités par le cerveau au cours de la Sous-Phase et ceci dans la mesure où le cerveau travaille comme un ordinateur digital binaire ce qui est loin d'être prouvé. Une autre conséquence est le peu d'espoir de définir et de bâtir expérimentalement la fonction de transfert pilote ; même pour une Tâche donnée le pilote ne fabrique pas une unique fonction de transfert mais une succession de fonctions de transfert déclenchées par le balayage de la boucle interne de recueil des données. Le programme de balayage dépend lui-même des valeurs relevées sur les instruments c'est-à-dire des actions du pilote et de l'effet de la turbulence sur l'avion. Le balayage est donc déterminé en partie par un phénomène aléatoire.

Si la mesure directe de la Charge de Travail s'avère pour le moment difficile à concevoir on peut envisager de mesurer les conséquences de cette Charge de Travail ; il est certain qu'un accroissement de Charge de Travail se traduit par une augmentation de la fatigue. Pour l'instant les méthodes de mesure de la fatigue due à un travail intellectuel demandent encore des mises au point et ne peuvent nous être utiles. Par contre, des expériences très intéressantes ont montré une corrélation assez nette par exemple entre le taux de modulation des battements du coeur, le diamètre de la pupille et la Charge de Travail estimée. Ces méthodes ne fournissent pas pour l'instant une mesure absolue de la Charge de Travail ; on constate simplement des variations de ces paramètres physiologiques dans des conditions données lorsque l'on accroît la difficulté de la Tâche. Ces méthodes doivent être approfondies car elles peuvent apporter une aide précieuse à la compréhension des phénomènes, fournir une confirmation à un jugement comparatif exprimé par les pilotes mais il n'est pas question, à l'heure actuelle du moins, de les utiliser directement pour mesurer la Charge de Travail.

On voit d'ailleurs difficilement une norme de Qualités de Vol fixer un taux de modulation minimum ou un diamètre maximal de la pupille au cours d'une Tâche !

Pour l'instant et faute de mieux nous ne voyons d'autres méthodes que de demander l'avis des pilotes pour juger la Charge de Travail.

Ces méthodes ont été mises au point par George E. COOPER et Robert P. HARPER (ref. 2). Elles ne reposent pas, notons le bien, sur un jugement direct des qualités de vol en vue d'une acceptation ou d'un refus de l'avion mais sur une estimation de la Charge de Travail sans demander au pilote si cette Charge de Travail est acceptable ou non (rappelons que le niveau acceptable de Charge de Travail dépend de la probabilité de la Tâche).

L'étude de la Pilotabilité, c'est-à-dire l'estimation de la Charge de Travail nécessaire pour l'accomplissement d'une Tâche déterminée, ne peut donc se faire qu'en introduisant l'homme

dans la boucle de pilotage. Une telle étude ne peut donc être entreprise que sur l'avion réel ou sur simulateur lorsque l'avion lui-même n'existe qu'à l'état de projet. Or il est indispensable de mener de telles études au niveau projet car les modifications d'architecture (dièdre, surface de dérive, flèche, position en hauteur du plan fixe etc) qui peuvent se révéler nécessaires sont trop importantes pour n'être mises en évidence qu'après le premier vol du prototype. Il est donc fondamental de disposer de simulateurs suffisamment évolués pour permettre une prédiction correcte de la Pilotabilité du futur avion. Quelles sont alors les qualités et caractéristiques d'un bon simulateur ?

## VI. Utilisation des Simulateurs

L'étude précédente du comportement du pilote impose les trois types de caractéristiques suivantes :

- a) reproduire fidèlement la tâche imposée au pilote et à l'avion ;
- b) reproduire fidèlement les moyens d'action du pilote sur l'avion (sortie pilote) ;
- c) reproduire fidèlement les perceptions du pilote (entrée pilote).

### 1. Reproduction de la Tâche

Il pourrait sembler que la première condition soit facile à réaliser : il suffit en principe de "demander" la même chose au simulateur et en vol : en réalité le problème se complique du fait des conditions psychologiques d'exécution.

Une forte turbulence rencontrée de nuit dans un gros cumulo-nimbus avec accompagnement d'éclairs et dans le tintamarre des grêlons, frappant la structure et le pare-brise, ne laisse généralement pas le pilote indifférent : c'est à cet instant bien souvent qu'il commence à douter que l'homme soit fait pour voler ! Il montrera, par contre, un sang-froid et une maîtrise remarquables au simulateur car il sait qu'à tout instant il peut demander la pause café.

Néanmoins, on constate que certains sujets sont plus aptes que d'autres à travailler au simulateur ; ils parviennent à se prendre au jeu et à se faire peur dans certains cas. Pour ces sujets, la simulation n'est pas un jeu de l'esprit : ils n'ignorent pas qu'elle est le plus souvent imparfaite, mais ils parviennent à se replacer dans des conditions psychologiques voisines de celles qu'ils auraient au cours du même vol réel.

Ceci exclut l'utilisation de personnes qui ne sont pas des pilotes expérimentés. En particulier, on rencontre fréquemment des ingénieurs et des techniciens chargés de la mise en oeuvre des simulateurs et qui sont capables de réaliser des performances ahurissantes parce qu'ils utilisent les défauts mêmes de la simulation comme sources d'information complémentaires ; ces techniciens ne peuvent en aucun cas recréer dans leur esprit les conditions psychologiques du vol puisqu'ils les ignorent et utilisent pour piloter des informations qui n'existent pas en vol réel.

Par ailleurs, il est fréquent de voir d'excellents pilotes dont le métier ne fait aucun

doute et qui ne peuvent exécuter sur simulateur des tâches qu'ils réaliseraient fort bien sur un avion. Ils ne peuvent convenir du sérieux de l'étude et voient dans le simulateur un jouet ou retrouvent un vieux souvenir d'un entraînement mal conçu sur "linktrainer" ; ces pilotes ne peuvent être utilisés valablement.

La première condition ne peut donc être satisfaite que par une sélection judicieuse et une formation psychologique des pilotes.

## 2. Identité des moyens d'action

La deuxième condition, identité des moyens d'action du pilote, est la plus simple à réaliser : il suffit de reproduire fidèlement les commandes et les sélecteurs à la disposition du pilote.

Le problème technique est néanmoins assez complexe car l'identité peut être faussée par des détails insignifiants au premier abord.

On sait, par exemple, que le moindre jeu dans les commandes peut modifier considérablement les qualités de vol d'un avion. Il est donc indispensable que soient reproduits non seulement les lois d'efforts, en fonction des déplacements, mais encore les seuils, les jeux, les zones d'inefficacité, les élasticités et même les réactions dues aux déplacements de l'avion simulé.

Souvent, l'identification totale est impossible ou peu utile et des approximations sont nécessaires. Ainsi, l'étude d'une figuration instrumentale de l'horizon artificiel, par passages successifs de plusieurs modèles sur un simulateur d'étude, ne nécessite pas l'identification exacte des poignées de manche. Par contre, lors de la conception d'un avion chez un constructeur, il est souhaitable d'introduire au plus tôt dans le simulateur des "éléments réels".

## 3. Identification des perceptions

Enfin, pour que l'activité cérébrale du pilote (la charge de travail est essentiellement constituée par l'activité cérébrale) soit semblable à l'activité réelle dans le même cas de vol, il faut satisfaire à la dernière condition, c'est-à-dire rendre identiques les sources d'informations.

Les perceptions du pilote sont de trois ordres : visuelles, auditives, inertielles. (Nous éliminerons "a priori" les perceptions olfactives qui ne se révèlent que rarement utiles, sauf pour détecter des pannes : fuites de carburant, de liquide hydraulique, fumées, etc).

Les sensations visuelles proviennent des instruments de bord et de l'observation au travers des vitres du pare-brise.

Les instruments de bord peuvent toujours être aisément reproduits.

La vision dans le pare-brise est donnée par des projections diverses effectuées devant les yeux du pilote : écran de télévision noir et blanc ou couleur, écran cinéma, plan, cylindrique, sphérique, projecteur d'images conventionnelles dites holomorphiques (un horizon, une piste, un damier, etc), projecteur d'ombres chinoises utilisant des moyens mécaniques simples.

Le système optimal doit être étudié dans chaque cas : si une simple ligne d'horizon suffit pour étudier la tenue d'assiette élémentaire,

l'étude de l'alignement et des évolutions avant l'atterrissage nécessite la projection d'une image de piste par ombre chinoise et l'étude de la transition du vol sans visibilité au vol à vue au cours d'une percée, de la balonnette et de l'arrondi nécessite un système compliqué et onéreux de télévision en couleurs.

La vision périphérique, fondamentale dans la tenue d'assiette latérale, peut être réalisée en plaçant le pilote au centre d'un écran sphérique. De récentes expériences effectuées par la N.A.S.A. montrent qu'un minimum de champ est important, mais qu'au-delà d'une limite de 30 degrés de part et d'autre de l'axe, une augmentation de champ n'est plus nécessaire.

Dans tous les cas, le choix de la visualisation doit être précédé d'une étude faite par des pilotes, pour déterminer le nombre minimal d'informations nécessaires afin d'éviter une sous-alimentation qui fausserait les résultats ou un système trop luxueux mais onéreux.

Les sensations auditives sont en général de peu d'importance pour le pilotage élémentaire. Il faut néanmoins que le pilote puisse recevoir le trafic radio, les indicatifs de balises, etc. En outre, un générateur de bruit d'ambiance peut se révéler utile pour masquer les bruits artificiels tels que le "chant du 400 Hz" des servomécanismes des instruments de bord.

Le problème de la reproduction des sensations inertielles est manifestement le plus délicat. Ces sensations inertielles sont recueillies d'une part par l'oreille interne qui détecte un mélange complexe d'accélération et de vitesses angulaires ainsi que la position angulaire de la tête par rapport à la verticale apparente, d'autre part par l'ensemble des muscles qui détectent les réactions d'appui du corps sur le siège et le plancher, c'est-à-dire les accélérations linéaires.

L'identité des accélérations linéaires, vitesses angulaires et accélérations angulaires ne peut en aucun cas être réalisée au sol, car cette identité suppose l'identité des trajectoires et des vitesses. On ne peut réaliser cette identité que sur un avion à stabilité variable. (Il faut se souvenir toutefois que si l'on reproduit le facteur de charge sur avion à stabilité variable, les vitesses angulaires ne seront reproduites que si la vitesse est la même, la relation facteur de charge, vitesse angulaire dépendant entre autres de la vitesse).

Heureusement, les sensations accélérométriques sont affectées d'un seuil important : par exemple, on commence à se sentir écrasé sur le siège à partir de 1,3 à 1,4 g ; en outre, on est plus sensible à une variation d'accélération qu'à l'accélération elle-même. Or, les accélérations continues ou à variation lente sont généralement faibles ; ce sont elles qui modifient par intégration la trajectoire et elles ne sont pas ressenties parce que faibles et variant lentement. Par contre, les accélérations à variation rapide qui sont bien ressenties par le pilote ne modifient que très peu la trajectoire.

Moyennant quoi, il est possible de construire des mouvements cabine qui ne reproduisent que les variations rapides d'accélération et non les variations lentes.

Mais il faut bien reconnaître que le choix

des caractéristiques de ces mouvements cabine est très délicat, chaque diminution des fréquences non filtrées se traduisant par une augmentation de l'amplitude maximale du débattement. Si le problème est à peu près soluble en ce qui concerne les accélérations normales, il est beaucoup plus délicat en ce qui concerne les accélérations et vitesses angulaires de roulis. Sur le simulateur, la mise en roulis se simule par une accélération de rotation (avec inclinaison latérale par intégration) tant que l'accélération résultant (par le calcul) de l'action du pilote est supérieure au seuil de perception ; dès que cette accélération tombe au-dessous du seuil de perception, on ramène la cabine "ailes horizontales" avec des accélérations et des vitesses angulaires inférieures au seuil de perception ; mais il y a des moments où la cabine se trouve inclinée latéralement avec, par conséquent, une verticale apparente (et réelle pour le pilote) non située dans le plan de symétrie de l'avion, ce qui n'est pas cohérent avec le vol réel.

On voit donc combien le problème peut être délicat ; l'écueil à éviter à tout prix est la contradiction flagrante entre deux perceptions. Le cerveau doit probablement utiliser des informations d'accélérations angulaires détectées par les canaux semi-circulaires pour améliorer la "poursuite" de l'oeil sur les objets regardés. C'est ce qui explique également que le passager d'un avion de transport de nuit ou dans les nuages (donc sans repère extérieur) puisse "voir" des mouvements de tangage et de roulis ; l'oeil voit des mouvements et pourtant rien ne tourne ! Si, par maladresse, on présente donc au pilote, dans le simulateur, des perceptions visuelles et inertielles contradictoires, il en résulte un malaise immédiat : on a vu des pilotes "tourner de l'oeil" au cours d'une mauvaise simulation (l'expression imagée fait bien comprendre le phénomène).

Lorsque l'on voit les problèmes posés par le simulateur sol, on est tenté d'augmenter le réalisme de la simulation en faisant voler le simulateur.

Le principe du simulateur volant, appelé généralement et improprement avion à stabilité variable, est simple : le pilote, au lieu d'agir directement sur les gouvernes, agit sur un calculateur embarqué chargé d'actionner les gouvernes de telle sorte que la réponse soit celle de l'avion que l'on désire simuler.

Ces simulateurs sont onéreux, mais ils permettent dans de nombreux cas de répondre aux trois exigences de la simulation ; en particulier l'avion "vole", ce qui résout le problème psychologique (pas de pause café) et les problèmes de visualisation et de mouvements cabine sont en grande partie simplifiés. Néanmoins, des limitations viennent du fait qu'on ne peut modifier que les trois équations de moment et l'équation de poussée-trainée ; il est impossible de modifier l'équation de portance et l'équation de force latérale (sauf dispositifs spéciaux du genre volets rapides pour l'équation de portance et panneaux verticaux à volets pour la force latérale).

#### VII. Utilisation des Simulateurs

Maintenant que nous avons défini l'outil, voyons-en les utilisations possibles.

Les études menées au simulateur peuvent porter sur les points suivants :

- a) études visant à comprendre le comportement du pilote pour dégager des règles générales de simplification du pilotage ;
- b) études à caractère général permettant de dégrossir les critères de qualité de vol adaptés à une catégorie bien délimitée d'avion ;
- c) détermination des caractéristiques aérodynamiques et massiques influant sur les qualités de vol pour un appareil ayant une mission bien définie, au stade avant-projet et au stade projet ;
- d) entraînement de l'équipage d'essai et préparation du premier vol d'un prototype ;
- e) études de diverses solutions d'amélioration des qualités de vol d'un prototype en cours d'essais.
- f) étude d'instruments présentant une nouveauté sur le plan des principes, de la figuration, de la nature de l'information fournie. Etude du cockpit d'un avion en projet ;
- g) étude du travail de l'équipage en matière de navigation au cours d'une mission complète ;
- h) vérification de la sécurité au cours des essais de certification dans des conditions difficiles à réaliser en vol (vols en turbulence intense par exemple) ou préparation des vols d'essais dans des conditions qui peuvent être dangereuse pour l'équipage d'essais (panne de systèmes vitaux par exemple) ;
- i) entraînement des équipages opérationnels, en particulier démonstration et entraînement dans des cas de vol dangereux, ou difficiles à réaliser en vol ;
- j) présentation aux équipages futurs utilisateurs pour critique du cockpit (il faut bien prendre garde à ce que l'équipage utilisateur soit averti du problème simulation et des limites de validité de la méthode) ;
- k) introduction de systèmes réels dans la chaîne de pilotage pour endurance et précertification dans des conditions voisines d'emploi.

Cette liste n'est manifestement pas exhaustive, mais on peut y voir la richesse des informations que l'on peut tirer des essais au simulateur sous la condition de bien choisir le simulateur adapté à chaque problème. Or, le choix est vaste, donc difficile. Le bilan entre la complexité du simulateur, son prix, la validité des essais, la valeur des résultats recherchés est à faire à chaque étude et une fois de plus, le mieux est bien souvent l'ennemi du bien. Que l'on se souvienne que le meilleur simulateur d'un avion est l'avion lui-même.

### Bibliographie

1. Etude de la Sécurité des Aéronefs en utilisation.  
J-C. Wanner - Octobre 1969 - Publication Service Technique Aéronautique.
2. The use of pilot rating in the evaluation of aircraft handling qualities.  
George E. Cooper et Robert P. Harper  
NASA Technical note TN.D 5153 Avril 1969.
3. Man Machine Integration: a long term look.  
G. Melvill Jones - The Aeronautical Journal of the Royal Aeronautical Society - Number 694 - Volume 72 - Octobre 1968.
4. La Simulation des Aéronefs Buts et Moyens. Application au développement d'un projet "Concorde".  
J. Monfort et J. Pinet  
Association Technique Maritime et Aéronautique - Session 1970.