

L'introduction du contrôle automatique généralisé en avionique et la sécurité de vol

Philippe Poisson-Quinton - Joseph Taillet

LE transport aérien subira, dans la prochaine décennie, une mutation profonde par suite de l'extension du rôle de l'électronique dans les équipements de bord. En effet, la nécessité de réduire la consommation de carburant et la charge du pilote sans sacrifier la sécurité impose, en même temps que s'introduisent l'automatique et la micro-informatique dans l'avionique, une optimisation des dispositions destinées à assurer la fiabilité du système dans les plus dures conditions d'environnement.

Le Contrôle automatique généralisé (CAG), dont un aspect essentiel consiste à remplacer les chaînes d'action lentes commandes-gouvernes par des boucles automatiques à action rapide gérées par micro-ordinateurs à partir des entrées fournies par le pilote, apportera de lui-même un accroissement de la sécurité en diminuant la charge de travail du pilote, en réduisant les efforts sur la structure, en diminuant l'effet des turbulences et en reconfigurant instantanément la position des gouvernes en cas de panne de moteur.

Cependant son adoption rend inacceptable toute défaillance de l'électronique sous l'effet perturbateur de l'environnement naturel (électricité statique, foudre) ou artificiel (rayonnements électromagnétiques).

C'est pourquoi un effort important est actuellement consenti sur le plan mondial pour préparer l'introduction du

CAG par des études approfondies de ces effets perturbateurs, afin d'optimiser les mesures de protection. Les recherches correspondantes portent aussi bien sur la caractérisation des phénomènes naturels ou artificiels et la modélisation de l'aéronef que sur les techniques de durcissement du matériel et des logiciels.

INTRODUCTION

Sous quelle forme l'électronique apparaît-elle, en 1983, dans le transport aérien ? Quelle est l'évolution prévisible de cette électronique au cours de la prochaine décennie ? Quelles conséquences cette évolution aura-t-elle sur la sécurité des vols ? Enfin, quels sont les moyens par lesquels les pouvoirs publics et les industriels concernés entendent garantir cette sécurité au travers des mutations techniques à venir ?

Le but de cette communication est de répondre succinctement à ces questions fort importantes pour l'avenir du transport aérien, en mettant en lumière le jeu complexe par lequel on peut compenser, en utilisant l'innovation technologique, les contraintes dues aux conditions socio-économiques.

L'INNOVATION ET LA SÉCURITÉ DANS LE DOMAINE DU TRANSPORT AÉRIEN

Nous ferons d'abord la différence entre les systèmes au sol (radars du contrôle aérien, par exemple) et les systèmes de bord, qui forment à proprement parler l'avionique. L'électronique constitue la base des systèmes au sol ; elle constitue également un maillon essentiel de certaines fonctions de l'avionique, comme les télécommunications ou les aides à la navigation et les systèmes d'atterrissage sans visibilité. Cependant l'électronique moderne, sous les aspects de l'automatique et de la micro-informatique, commence à peine à pénétrer le monde de l'avionique. Cette situation s'explique par les remarques suivantes :

1. Parmi tous les moyens de transport, l'avion est celui qui bénéficie du taux d'accidents le plus bas au passager-kilomètre ; ce résultat a été obtenu, malgré les conditions d'environnement très dures du transport aérien — un avion ne peut pas être mis à l'arrêt, comme un train, en cas de panne ; il doit atterrir ! — grâce au caractère « de pointe » que présente l'industrie aéronautique, qui pousse très loin les études et essais de ses prototypes et évite de disperser ses efforts sur un trop grand nombre de types d'appareils. L'environnement technologique de cette industrie favorise l'innovation lorsqu'elle est motivée par des besoins réels : or la sécurité est une condition impérative à respecter pour vendre un avion, qu'il soit à vocation civile ou militaire. En effet, en contraste avec le cas de l'automobile, où la relative autonomie du conducteur-utilisateur l'incite à accepter une part de risque en fonction de sa responsabilité dans la conduite du véhicule, dans le cas du transport aérien le passager-utilisateur est intransigeant vis-à-vis des insuffisances de sécurité, qu'il impute, à juste titre, au seul transporteur. Il faut donc s'attendre à voir les bureaux d'études des constructeurs s'intéresser aux systèmes nouveaux destinés à accroître la sécurité du vol.

2. Parmi tous les systèmes de transport, le transport aérien est celui qui exige la coopération la plus étendue sur le plan mondial, aussi bien dans le domaine du contrôle aérien et des aides à la navigation que sur le plan de la maintenance : cette coopération exige une certaine standardisation des équipements et une très longue concertation avant d'introduire une quelconque innovation, car toute modification doit être adoptée de façon universelle. Une telle contrainte freine parfois l'innovation, mais elle éli-

mine le risque de voir la sécurité diminuée par la mise en service prématurée d'un nouveau système mal étudié. Elle peut, cependant, conduire à certains risques dans les cas où les conditions d'environnement électromagnétique se détériorent au cours du temps, comme conséquence, par exemple, du progrès industriel, alors qu'il est pratiquement impossible de modifier, pour tous les appareils en service sur le globe, la structure de certains instruments de navigation. C'est, en particulier, le cas des radiocompas des avions de tourisme, que leur rusticité ne met pas toujours à l'abri de certains parasites industriels ; leur utilisation comme aide à l'atterrissage est pour cette raison très fortement limitée par les règlements en vigueur.

D'une façon générale, on comprend que cette contrainte introduise un délai très long entre les résultats de la recherche et l'application opérationnelle. Or il est clair que, dans un domaine aussi sensible aux conditions de sécurité que le transport aérien, une solution ne peut être envisagée que si sa fiabilité est extrêmement élevée. Les taux moyens de probabilité de panne recherchés pour les équipements avioniques sont de l'ordre de 10^{-3} par heure de vol dans le cas où la panne est sans conséquences sur la sécurité, de 10^{-7} par heure de vol lorsque le danger qu'elle introduit peut être contrôlé momentanément par l'action du pilote et de 10^{-9} par heure de vol lorsque le danger qu'elle introduit est immédiat et sans appel.

Il n'y a pas si longtemps que le remplacement par des circuits intégrés de l'électronique à tubes à vide de l'après-guerre permet d'envisager ces ordres de grandeur ; il a fallu attendre le développement foudroyant de la micro-électronique, avec ses progrès permanents en matière de réduction des prix, des poids, des volumes et de taux de pannes, pour que les centres de recherche et les bureaux d'études des industries aéronautiques s'intéressent à de nouveaux concepts fondés sur la fiabilité élevée de l'électronique. Bien entendu, certaines de ces innovations mettront un certain temps avant d'être introduites de façon opérationnelle dans le domaine de l'aviation de transport commerciale.

L'AVIONIQUE DANS LE TRANSPORT AÉRIEN EN 1983 ET LES PERSPECTIVES POUR LA PROCHAINE DÉCENNIE

C'est la raison pour laquelle on distingue actuellement trois générations d'avions de transport :

a. une génération d'appareils en service depuis une vingtaine d'années environ (Caravelle, Mercure, Boeing 707, 727, 747, DC-10, L-1011, etc.),

b. une génération en service depuis une date relativement récente (Airbus, Boeing 767, etc. et le Concorde),

c. une génération encore au stade du projet pour les avions civils, mais qui devrait être opérationnelle avant la fin de la décennie ; les précurseurs de cette génération sont représentés par quelques avions militaires de conception récente, par la navette spatiale et par des avions expérimentaux équipés de commandes électriques permettant leur contrôle automatique.

L'avionique des appareils de la première génération comprend essentiellement des systèmes de radionavigation, de navigation inertielle et de radiocommunications qui comportent beaucoup d'électronique et des instruments de pilotage qui en comportent peu. L'ensemble est conçu comme une superposition de systèmes isolés destinés chacun à assurer une fonction bien déterminée. L'interface homme-machine est assuré par une multiplicité d'appareils à aiguille mobile devant des cadrans qui

envahissent jusqu'au plafond du poste de pilotage, et par des commandes (manche, palonnier) qui agissent sur les gouvernes par l'intermédiaire de liaisons le plus souvent hydrauliques. L'automatique est représenté par un asservissement à faible bande passante, le pilote automatique, qui permet à l'équipage de lâcher les commandes tout en les maintenant sur des valeurs de consigne affichées à l'avance : un tel asservissement ne saurait assurer les opérations complexes associées au décollage ou à l'atterrissage, ou encore réagir devant une difficulté imprévue. Le danger majeur de cette situation réside dans la condition d'extrême tension à laquelle elle soumet le pilote : en effet, la dispersion des informations accroît de façon dangereuse la charge de travail de l'équipage et sa fatigue peut le conduire, dans les cas où survient une difficulté imprévue, à une estimation erronée de la conduite à tenir.

Une autre difficulté provient de la spécialisation des chaînes de l'avionique ; il n'est actuellement pas possible de reconfigurer l'ensemble de l'électronique pour pallier la panne d'un sous-ensemble donné ; le seul remède capable de garantir la permanence de certaines fonctions essentielles est le triplement des instruments correspondants (cas des centrales inertielles).

Dans la deuxième génération d'avions de transport, un effort important a été fait pour présenter de façon rationnelle et agréable les informations essentielles qui permettent de piloter : commutation séquentielle sur écrans cathodiques couleur banalisés, avec présentation alphanumérique ou symbolisme graphique facile à interpréter, des informations relatives à l'attitude de l'avion, à sa route, à son altitude, au régime des moteurs, etc. Par ailleurs, sur certains de ces appareils, les chaînes de commande hydrauliques ont été remplacées par des chaînes électriques (Concorde). Le poste d'équipage n'est plus envahi par les cadrans et le tableau de bord présente l'aspect attrayant d'une interface informatique à graphisme coloré. Cependant, le rôle de l'automatique reste limité : les fonctions de l'avionique sont toujours séparées et la chaîne de pilotage est toujours une boucle ouverte à faible bande passante, fermée par un maillon humain, le pilote, qui agit sur les commandes après avoir interprété les indications visuelles fournies par le monde extérieur et par les instruments de la planche de bord.

Dans la troisième génération, dont les éléments précurseurs existent déjà sous la forme prise par les plus récents avions de combat (F.16, Mirage 2000, etc.), l'automatisation est quasi complète. Le pilotage de l'aéronef est effectué par des dispositifs d'asservissement agissant, à l'aide d'actuateurs à faible temps de réponse, sur des gouvernes à faible inertie. Le rôle du pilote consiste à introduire des consignes (par l'intermédiaire de leviers de commande) dans cette boucle d'asservissement ; la chaîne de pilotage tire ses informations de capteurs inertiels, pneumatiques, optiques ou électriques et comporte un ou plusieurs microordinateurs qui calculent les ordres à donner aux gouvernes pour atteindre ces objectifs. Les algorithmes utilisés sont élaborés en fonction de modèles approfondis qui prennent en compte les données aérodynamiques, structurales et de mécanique du vol de l'appareil ; ces données sont très complètes en ce sens qu'elles couvrent un domaine très étendu de conditions de vol.

Par ailleurs, les systèmes correspondant aux différentes fonctions de l'avionique ne sont plus spécialisés et séparés, mais multifonctions et intégrés dans un ensemble complexe géré par ordinateur, l'information circulant d'un poste à l'autre, sous la forme de signaux électriques ou optiques, sur un bus commun. De la sorte, on peut compenser la panne d'un sous-ensemble correspondant à une fonction essentielle par le prélèvement d'un sous-ensemble identique sur une chaîne de mesure correspon-

dant à une fonction moins importante.

On voit qu'il ne s'agit plus ici d'une évolution de l'avionique, mais d'une mutation profonde des principes et du matériel. Cette nouvelle philosophie de l'avionique a reçu un nom de baptême : le Contrôle automatique généralisé ou CAG [1].

Depuis plus de dix ans, la technologie CAG a donné lieu à des recherches considérables conduites jusqu'aux vols de démonstration sur de nombreux avions expérimentaux ; nous en sommes maintenant aux applications — avec la sécurité qu'elles imposent.

La *figure 1* schématise une configuration d'avion de transport de cette troisième génération, sur lequel a été intégré un réseau de transmission des ordres entre les calculateurs digitaux et les gouvernes de pilotage de l'avion ; ces liaisons sont électriques, mais elles seront doublées par des réseaux de fibres optiques assurant une redondance dissemblable recherchée pour la sécurité ; les gouvernes rapides à faible inertie sont actionnées par des actuateurs électro-hydrauliques ou, dans l'avenir, par des moteurs-couples électriques (aimants au samarium) ; le poste de pilotage a évolué considérablement : présentation sélectionnée des informations sur écrans cathodiques et nouvelles commandes de pilotage concourent à une réduction sensible de la charge de travail des pilotes, d'où une meilleure sécurité de vol.

Sur cette même figure 1, on a passé en revue les principaux objectifs du CAG qui vont permettre d'améliorer, à la fois, les caractéristiques aérodynamiques et structurales de l'avion et donc contribuer à une meilleure économie de vol. Mais, à partir du moment où ce réseau électronique puissant a été intégré à l'avion, des retombées importantes sont offertes qui améliorent encore l'économie d'exploitation de l'avion et renforcent la sécurité du vol : la *figure 2* passe en revue ces retombées qui concernent, en particulier, la conduite de la propulsion et la gestion du vol, y compris l'autosurveillance des systèmes de bord et la maintenance.

CONTRÔLE AUTOMATIQUE GÉNÉRALISÉ ET ÉCONOMIE DE CARBURANT

La stabilisation artificielle de l'avion, illustrée par la *figure 3*, est une fonction CAG particulièrement intéressante parce qu'elle permet de réduire à la fois sa masse structurale (surfaces réduites d'empennage et d'aile) et sa résistance à l'avancement, tout en permettant des vitesses plus faibles de décollage et d'atterrissage ; l'effet « boule de neige » de ces gains peut conduire à une amélioration sensible d'un projet adapté à une mission donnée : augmentation de la charge utile ou du rayon d'action, ou économie de carburant (de l'ordre de 3 à 6 % suivant la mission) ; cependant, voler « instable » exige une parfaite fiabilité de la chaîne automatique de contrôle commandant la gouverne de profondeur, pour éviter la divergence du mouvement longitudinal de l'avion en face de toute perturbation en incidence.

Les bénéfices de l'instabilité contrôlée sont particulièrement notables sur les configurations d'avions delta sans queue comme le Mirage 2000 ; ils ont été également démontrés en vol sur un Concorde expérimental de l'Aérospatiale équipé spécialement d'une chaîne de pilotage digitale redondante, avec un gain de plus de 10 % sur le rendement aérodynamique en subsonique (régimes de montée et d'attente très coûteux en carburant).

À propos du Concorde, il y a lieu de rappeler que ce transport supersonique unique au monde ne peut réaliser ses traversées transatlantiques quotidiennes que parce qu'il est doté d'un système de transfert programmé de carburant qui lui permet de

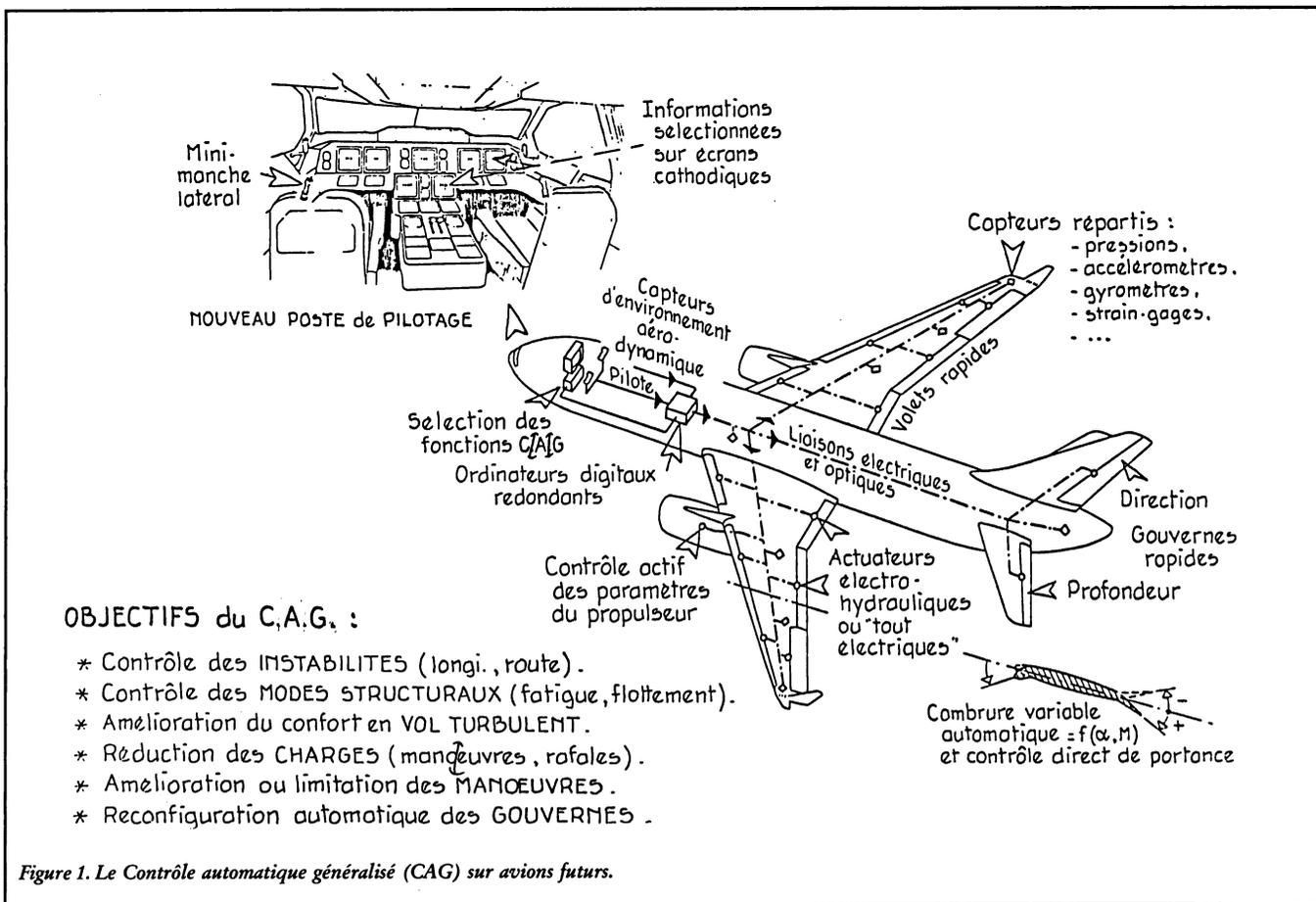


Figure 1. Le Contrôle automatique généralisé (CAG) sur avions futurs.

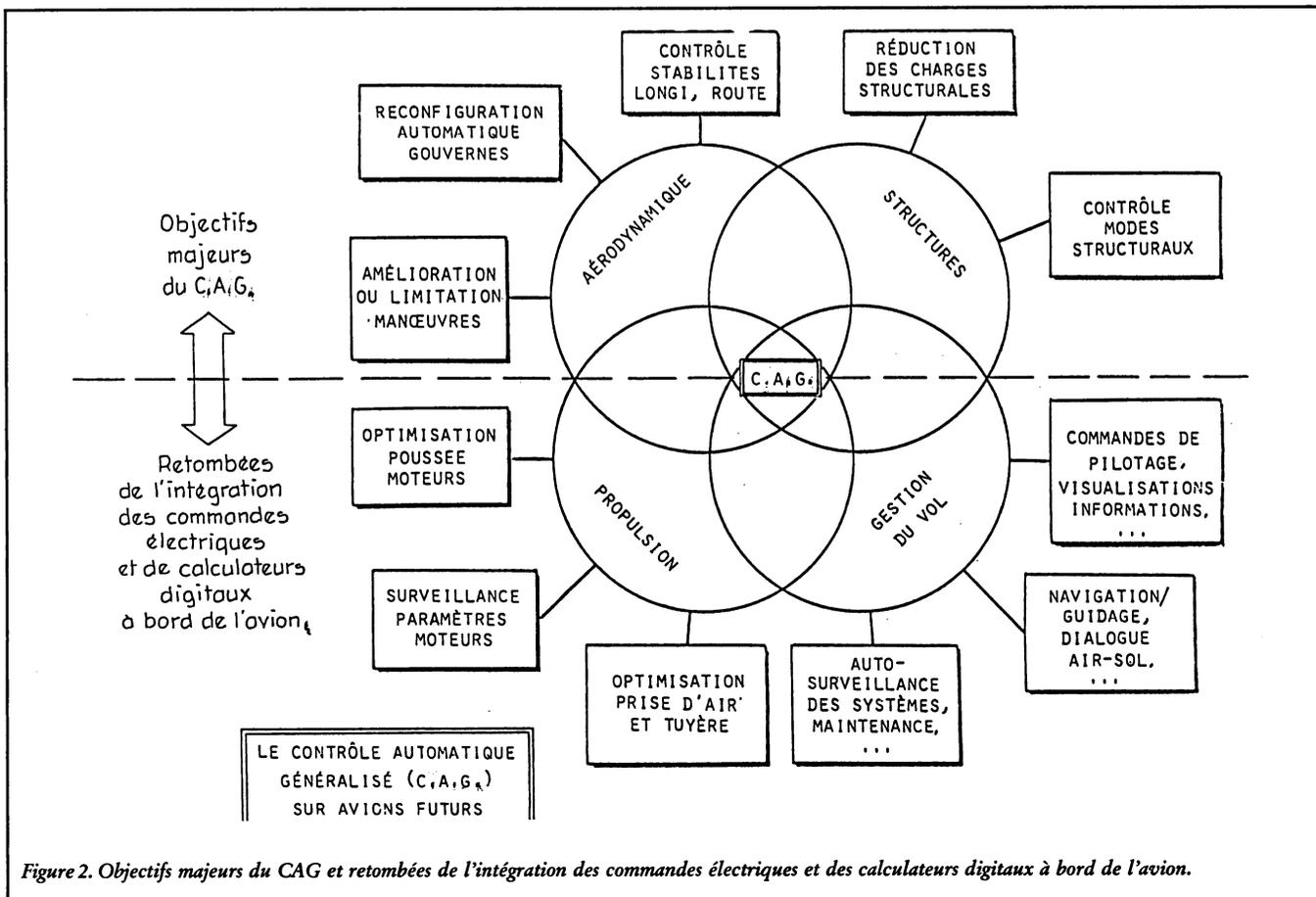


Figure 2. Objectifs majeurs du CAG et retombées de l'intégration des commandes électriques et des calculateurs digitaux à bord de l'avion.

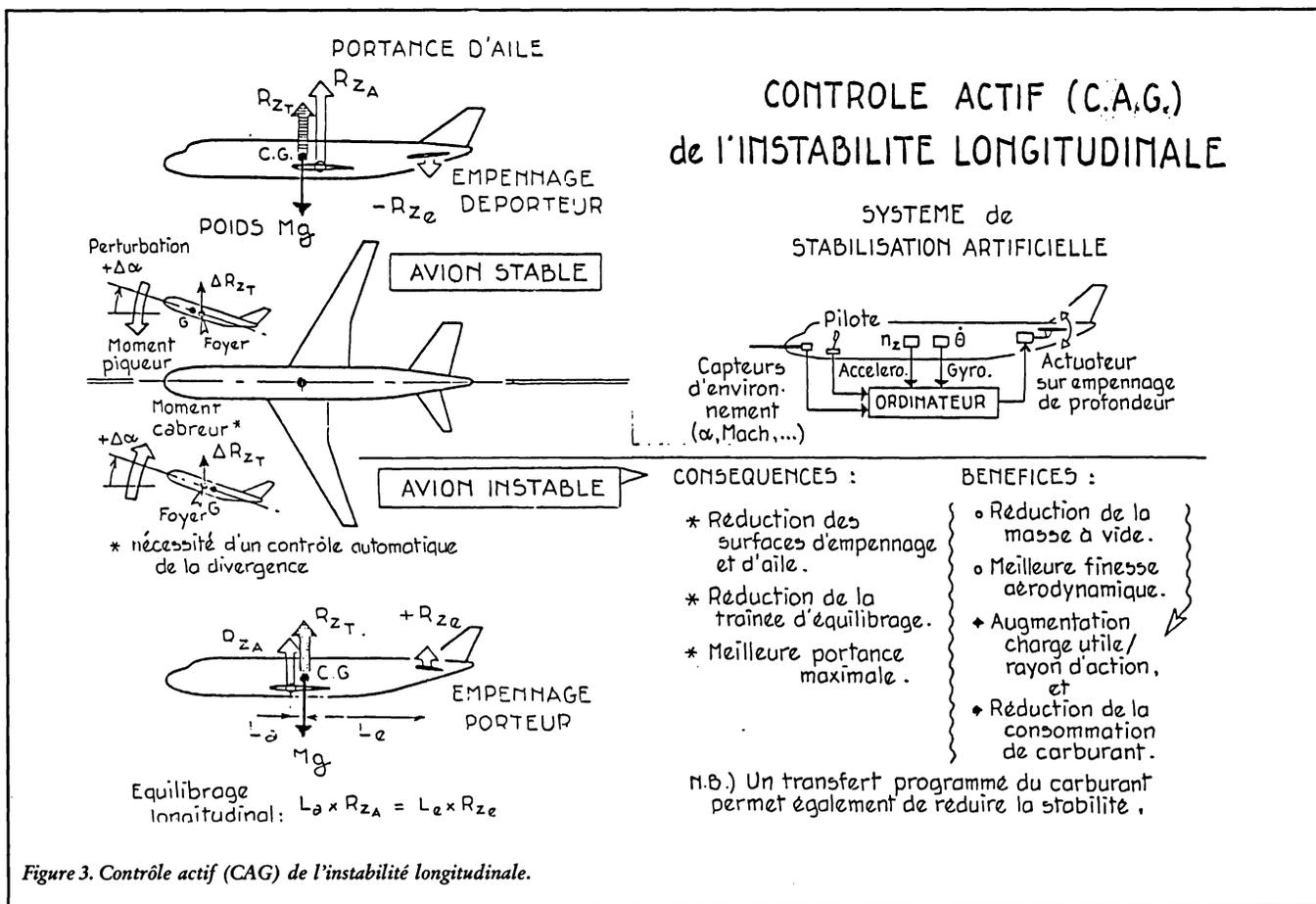


Figure 3. Contrôle actif (CAG) de l'instabilité longitudinale.

voler en croisière supersonique avec une stabilité longitudinale réduite ; ce transfert optimisé par ordinateur va être introduit également sur de futurs Airbus (gain de 3 % environ sur la consommation).

Un autre concept CAG permettant d'améliorer indirectement le rendement aérodynamique – et donc l'économie du vol – est basé sur la limitation automatique des contraintes structurales apparaissant à l'encastrement de l'aile au fuselage lors de manœuvres risquant de dépasser les limites de sécurité imposées (facteur de charge limité à 2,5 g pour un avion de transport) : un braquage négatif programmé des ailerons permet ainsi de soulager ces contraintes et, pour une masse structurale donnée, il devient possible d'augmenter l'envergure de l'aile, donc sa finesse aérodynamique ; ce concept est appliqué sur une version améliorée de l'avion de transport Lockheed 1011-500 où une augmentation permise de 6 % de l'envergure a conduit à une réduction de 3 % de la consommation de carburant.

De tels systèmes automatiques sont également utilisés pour réduire l'effet des turbulences atmosphériques sur la fatigue structurale, ce sont les « absorbeurs de rafales » qui permettent de réduire la masse structurale et de prolonger la durée de vie de l'avion (c'est le cas des applications aux flottes de bombardiers B-52 et de transport C-5A de l'US Air Force).

Enfin, le contrôle automatique du braquage des volets de bord d'attaque et de bord de fuite permet d'optimiser en permanence la voilure pour une efficacité aérodynamique maximale dans toute l'enveloppe de vol.

CONTRÔLE AUTOMATIQUE GÉNÉRALISÉ ET SÉCURITÉ DU VOL

Plusieurs concepts CAG sont déjà utilisés pour augmenter la sécurité du vol aussi bien sur avions militaires que sur avions civils :

– il s'agit d'abord d'empêcher des excursions dangereuses hors du domaine normal de l'avion par la limitation automatique des angles d'incidence et de dérapage, du facteur de charge, du nombre de Mach, etc. ; la charge de travail du pilote s'en trouve considérablement réduite en opération (F-16, Mirage 2000, Concorde, etc.) ;

– pour certaines configurations d'avions, la panne soudaine d'un moteur peut être fatale si on ne peut immédiatement « reconfigurer » la position des gouvernes ou de l'entrée d'air ; seuls des systèmes automatiques – donc très rapides – permettent d'assurer la sécurité dans de telles conditions (cargo à atterrissage court Boeing YC-14, Lockheed SR-71, Concorde, etc.), avec la fiabilité adéquate de l'électronique.

Nous avons vu que le CAG permettait de limiter les effets des rafales sur la structure de l'avion, contribuant ainsi à la sécurité du vol ; mais un autre aspect de ce contrôle est d'augmenter le confort, aussi bien pour les passagers volant sur des avions court-courrier dans le mauvais temps, que pour les pilotes militaires en vol de pénétration à basse altitude et grande vitesse.

Actuellement, la plupart des avions de transport sont déjà équipés de systèmes automatiques permettant d'amortir les mouvements de lacet pour réduire les accélérations latérales dues à la turbulence, particulièrement pénibles à l'arrière de la cabine. Dans la prochaine étape, un système CAG intégré permettra de réduire ces accélérations à des seuils jugés adéquats pour le

confort, soit respectivement à 0,11 g et 0,055 g pour les accélérations verticales et transversales.

Enfin, sur les avions militaires, l'emport de charges suspendues sous les ailes entraîne un risque de « flottement » structural extrêmement dangereux (couplage entre la structure souple et les forces aérodynamiques induites par ces déformations) qui peut être amorti automatiquement par un système « antiflottement » ; on peut ainsi augmenter considérablement le domaine de vol « sûr » de l'avion ; cependant, l'application de ce système aux avions de transport — qui permettrait de réduire la masse structurale de l'aile — pose des problèmes très sévères de fiabilité de la chaîne de contrôle, en raison du caractère explosif de ce flottement en cas de panne (dans le cas d'un avion militaire, on peut larguer immédiatement les charges suspendues sous les ailes, pour écarter ce risque).

Dans ce qui précède, nous avons noté à chaque fois que le CAG pouvait concourir à la sécurité du vol à *condition* qu'une fiabilité très grande des systèmes automatiques soit garantie ; nous allons en voir les conditions.

SÉCURITÉ DE VOL ET FIABILITÉ DE L'AVIONIQUE : L'ENVIRONNEMENT ÉLECTROMAGNÉTIQUE

L'introduction du CAG impose une probabilité de panne de l'ordre de 10^{-9} par heure de vol pour l'avionique utilisée sur les chaînes d'asservissement destinées au pilotage de l'avion ; en effet, une panne d'une telle chaîne constituerait un danger immédiat et irrémédiable. Or, bien que la fiabilité de la micro-électronique ait atteint des niveaux très élevés — que l'on peut encore améliorer par l'utilisation de la redondance, surtout en faisant appel à des chaînes de structure dissemblable — l'environnement électromagnétique de l'avion peut constituer un obstacle redoutable à l'obtention de la fiabilité requise. En effet, la micro-électronique peut, en premier lieu, être endommagée par la présence des champs électromagnétiques perturbateurs de niveau suffisamment élevé ; en second lieu, si le niveau des parasites est insuffisant pour créer des dommages permanents, le bruit ou les impulsions en provenance de l'environnement peuvent fausser de façon critique l'exécution des programmes d'ordinateur qui commandent l'exécution des manœuvres et assurent la stabilité des chaînes d'asservissement.

Ce danger est encore augmenté par l'évolution de l'architecture de l'avion moderne, qui comporte de plus en plus de composites diélectriques en lieu et place du métal, ce qui ménage de plus en plus d'ouvertures perméables aux ondes électromagnétiques dans la cage de Faraday que constituait la cellule métallique des avions de la précédente génération. C'est cette structure en cage de Faraday qui permet à Concorde de voler avec ses commandes électriques sans être gêné par l'environnement électromagnétique.

La protection la plus rigoureuse contre ces perturbations est donc absolument indispensable à l'adoption du CAG. Si ce sujet n'était pas parfaitement dominé dans les quelques années à venir, les bénéfices que l'on pourrait tirer de l'application des asservissements rapides aux avions civils apparaîtraient comme un piètre avantage vis-à-vis de la vulnérabilité de ces systèmes aux effets de l'électricité statique, de la foudre et des parasites radioélectriques créés par l'homme. Il est clair qu'on ne saurait mettre en service un moyen de transport susceptible de réactions imprévisibles, par exemple sous l'effet d'un foudroiement ! Par ailleurs, il ne faut pas non plus que le bénéfice acquis en matière

d'allègement par l'emploi des nouvelles technologies soit perdu par suite de l'utilisation d'une masse importante de blindages destinés à protéger les circuits contre les parasites extérieurs : c'est pourquoi cette protection doit être optimisée en poids à partir de la connaissance précise des phénomènes naturels et artificiels qui constituent la menace à combattre.

Cette constatation a suscité un effort sans précédent de recherche et de développement dans le domaine de la compatibilité électromagnétique, en liaison avec une investigation fondamentale relative aux phénomènes d'électricité atmosphérique. Cet effort reçoit une justification supplémentaire par l'observation des difficultés survenues dans des secteurs voisins de l'industrie spatiale, où de coûteux déboires ont été enregistrés du fait de perturbations causées par l'environnement électrique (accidents d'origine électrostatique sur les lanceurs spatiaux, défauts de fonctionnement des satellites géostationnaires sous l'influence des décharges électriques causées par la charge électrostatique accumulée par le satellite pendant les orages magnétiques). Il apparaît clairement aujourd'hui que tout grand système aérospatial doit soigneusement être examiné sur le plan de son comportement électrique, en relation avec les perturbations en provenance de son environnement naturel ou artificiel.

RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT DANS LE DOMAINE DE LA PROTECTION DE L'AVIONIQUE CONTRE LES PERTURBATIONS ÉLECTROMAGNÉTIQUES

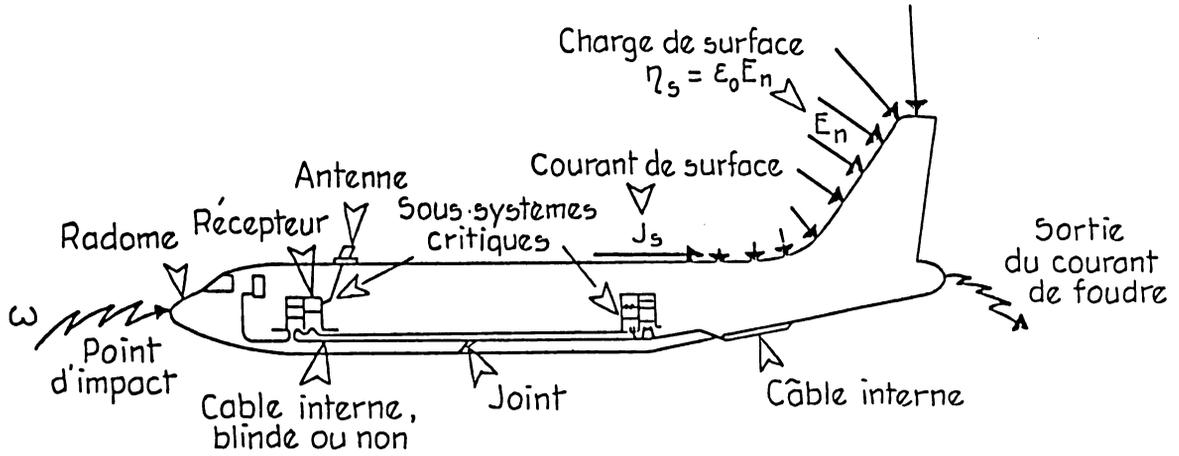
Cette protection s'étend à plusieurs types de menace : parasites internes dus aux équipements eux-mêmes, décharges électrostatiques, foudre et impulsion électromagnétique due à l'explosion en altitude d'un engin nucléaire. Le premier type de menace est traité par des méthodes non spécifiques au domaine aéronautique, dont nous ne parlerons pas ici ; le dernier est justiciable de solutions identiques à celles qui sont adoptées dans le cas de la foudre. Nous mentionnerons donc ici seulement, à titre d'exemple, la démarche générale qui est adoptée pour optimiser la protection de l'avionique contre les perturbations électromagnétiques dues à la foudre. Les effets du foudroiement sur un avion sont schématisés sur la *figure 4*, en même temps que les principaux mécanismes de couplage entre le courant de foudre et les sous-systèmes critiques.

Sans compter les ingénieurs et chercheurs qui étudient la foudre en vue d'autres objectifs, les spécialistes qui s'intéressent au problème des interactions de la foudre avec les aéronefs sont en 1983 au nombre de plusieurs centaines, répartis entre les pays possédant une industrie aérospatiale importante. La description de la physique du phénomène et la discussion approfondie de ses relations avec l'aéronef ne font pas partie de notre sujet ; nous renvoyons le lecteur aux articles de synthèse publiés dans ce domaine [2], [3], [4]. Nous soulignerons seulement les divers aspects des recherches à poursuivre avant la généralisation de méthodes de protection suffisamment efficaces pour autoriser l'application du CAG sur les avions de transport civils. Ces aspects sont schématisés sur la *figure 5*.

1. Compléments de caractérisation

Les données statistiques sur la foudre ont été pour la plupart collectées avec des instruments ne présentant ni la bande passante suffisante ni la faculté de permettre l'enregistrement des phénomènes qui précèdent le coup de foudre ; or les perturbations causées sur l'avionique sont liées à la rapidité du front de montée du courant de foudre et aux émissions électromagnéti-

FOUDROIEMENT d'un AVION



COUPLAGES ELECTROMAGNETIQUES sur un AERONEF

Figure 4. Effets du foudroiement d'un avion et mécanismes de couplage entre le courant de foudre et les sous-systèmes critiques de l'avionique.

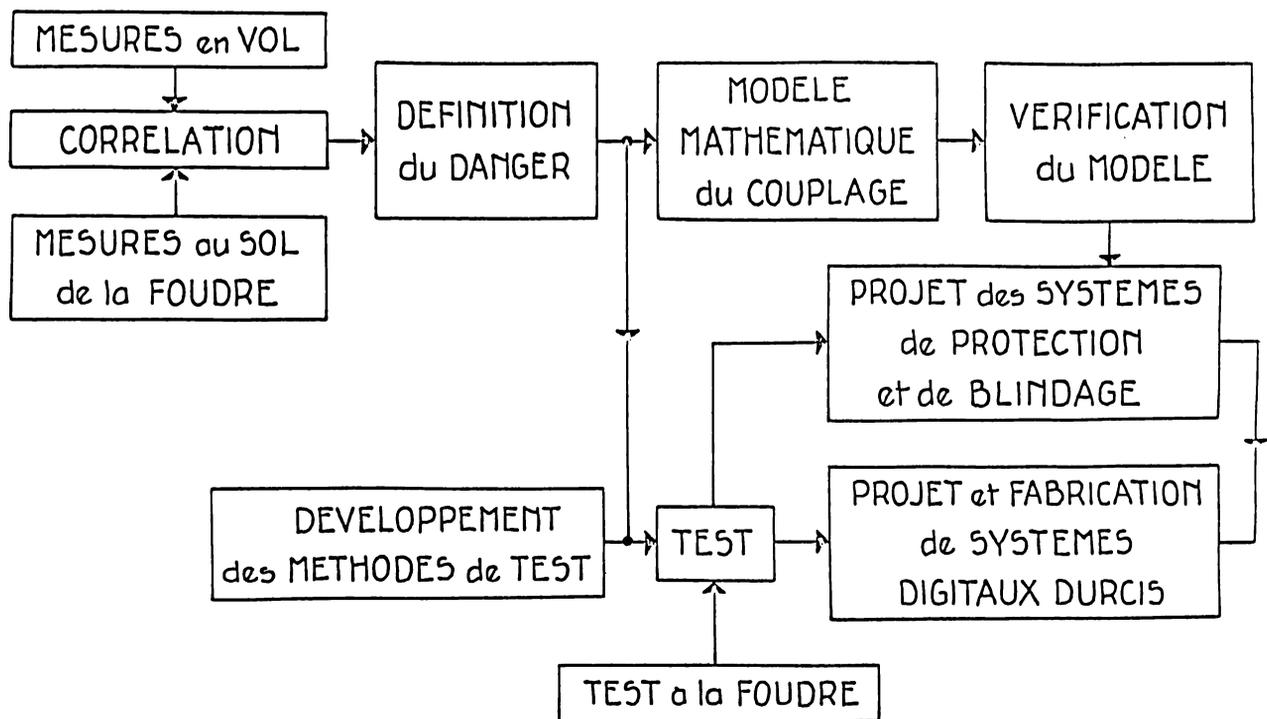


Figure 5. Organigramme des recherches et développements indispensables pour permettre l'introduction du Contrôle automatique généralisé sur les avions de transport.

ques de ses précurseurs. C'est pourquoi les chercheurs se livrent actuellement à de grandes campagnes de caractérisation de la foudre utilisant des instruments modernes (bande passante de 200 MHz) et mettant en œuvre des foudroiements naturels ou déclenchés par des tirs de fusées paragrêle munies d'un long fil métallique. Les caractéristiques de la foudre en altitude sont encore mal connues et des avions-laboratoires spécialement équipés volent à la lisière des orages pour compléter la statistique (C-130 de l'USAF et F-105 de la NASA aux États-Unis, C-160 TRANSALL de la DTCA en France). Ces travaux doivent fournir un modèle du phénomène qui permettra en particulier de dimensionner correctement les systèmes de protection.

2. Etude du couplage aux circuits avioniques

Cette étude comporte une part importante de modélisation et de calculs numériques, ainsi que des expériences de vérification. Elle permet de prévoir la pénétration du champ perturbateur dans les différentes zones de l'avion.

3. Définition et mise en œuvre de moyens d'essais et de simulation

La structure complexe d'un avion muni de tout son équipement est assez différente du modèle simplifié qui permet d'aborder, par le calcul, le problème du couplage pour qu'il soit nécessaire de procéder à des vérifications et à des essais de qualification sur tout ou partie d'un vol réel. C'est le rôle des services techniques des différents pays intéressés de définir les moyens d'essai nécessaires. Ce sont ces services qui peuvent, après l'essai d'un prototype ou d'un élément de prototype à des impulsions de courant ou de tension représentatives du coup de foudre, constater l'immunité de l'avionique et prononcer la qualification.

4. Recherche des méthodes de durcissement

Il s'agit de tous les procédés destinés à assurer la protection des circuits avioniques contre les perturbations électromagnétiques ; cette recherche fait partie du domaine de responsabilité des constructeurs (avionneurs ou équipementiers). Les méthodes utilisées comprennent, d'une part, la protection du matériel par blindage électromagnétique, filtrage et utilisation de l'optoélectronique (transmissions par fibres optiques) et, d'autre part, la protection du logiciel. Cette dernière classe de méthodes fait actuellement l'objet de puissantes investigations au Centre de recherches Langley de la NASA, où l'on étudie l'élaboration de logiciels insensibles aux parasites (« fault-tolerant softwares »).

5. Elaboration de recommandations et de normes

L'ensemble de cette démarche doit converger vers l'élaboration de recommandations à l'usage des constructeurs et de normes de qualification dont le respect doit garantir des taux de panne inférieurs aux valeurs maximales tolérées pour assurer la sécurité du vol avec CAG.

CONCLUSION

Les nouvelles méthodes de l'automatique et de l'informatique tendent à faire leur entrée dans le domaine du transport aérien non pas en se superposant ou en se substituant graduellement aux systèmes existants, mais en bouleversant complètement les principes mêmes auxquels on a fait jusqu'à présent appel en mécanique de vol. Ce bouleversement, qui s'impose par les bénéfices qu'il entraînera sur le plan économique, doit aussi avoir une influence très favorable sur la sécurité du vol, avec cependant une réserve fondamentale : la condition expresse que l'électronique de bord puisse être protégée contre les agressions les plus brutales de l'environnement électromagnétique de l'aéronef. Ceci explique l'importance de l'effort accompli actuellement en

recherche et développement non seulement pour élaborer les meilleurs instruments et les systèmes les plus performants, mais aussi pour protéger de la façon la plus efficace cette avionique contre les perturbations causées par les phénomènes électriques naturels ou créés par l'homme.

Références bibliographiques

1. Ph. POISSON-QUINTON et J.-C. WANNER, « Evolution de la conception des avions grâce aux commandes automatiques généralisées », Conférence S.E.E., Grenoble, 1977, *Aéronautique et Astronautique*, n° 71, 1978-4.
2. « Atmospheric Electricity/Aircraft Interactions », *Lecture Series AGARD*, n° 110, juin 1980.
3. J. TAILLET, « Protection des aéronefs contre la foudre », *Aéronautique et Astronautique*, n° 93, 1982-2.
4. J. TAILLET, « l'Electricité atmosphérique et la sécurité du transport aérien », journées Physique et Industrie, Société française de physique, septembre 1982, *les Applications de la physique aux progrès des systèmes de transport*, Editions de Physique, 1983.