

L'histoire des commandes de vol électriques

Grande question : quel fut le premier appareil équipé de commandes de vol électriques ou "CDVE" ? Vous allez soit me répondre "je ne sais pas" ou "facile, l'A320 !". La deuxième réponse est la bonne mais ce n'est pas si simple que ça. Comme beaucoup d'innovations techniques, il y a eu des essais et des erreurs avant d'arriver à la fiabilité des systèmes actuels. Comment est-on passé d'un système purement mécanique à un véritable système numérique capable de piloter l'avion tout seul (ou presque) ?



Un avion, une révolution ?

Pour mieux comprendre ce que sont les CDVE et d'où elles viennent, il va falloir faire un petit retour en arrière. Des débuts de l'aviation aux années 40, malgré quelques modernisations, le principe des commandes de vol est resté le même : commandes mécaniques à câbles. Dans ce système, le manche du pilote agit sur des câbles, qui via des poulies et renvois, permettent de contrôler les surfaces de vol sur les trois axes. On trouve en outre des commandes de trim permettant d'équilibrer l'avion au neutre, de telle sorte que l'avion reste stable lorsque le pilote lâche le manche. Pour de plus amples renseignements, je vous invite à vous reporter à [mon autre blog](#) où je traitais le cas des [commandes de vol du Super-Guppy](#), identique à celles du Stratocruiser et des avions des années 50.

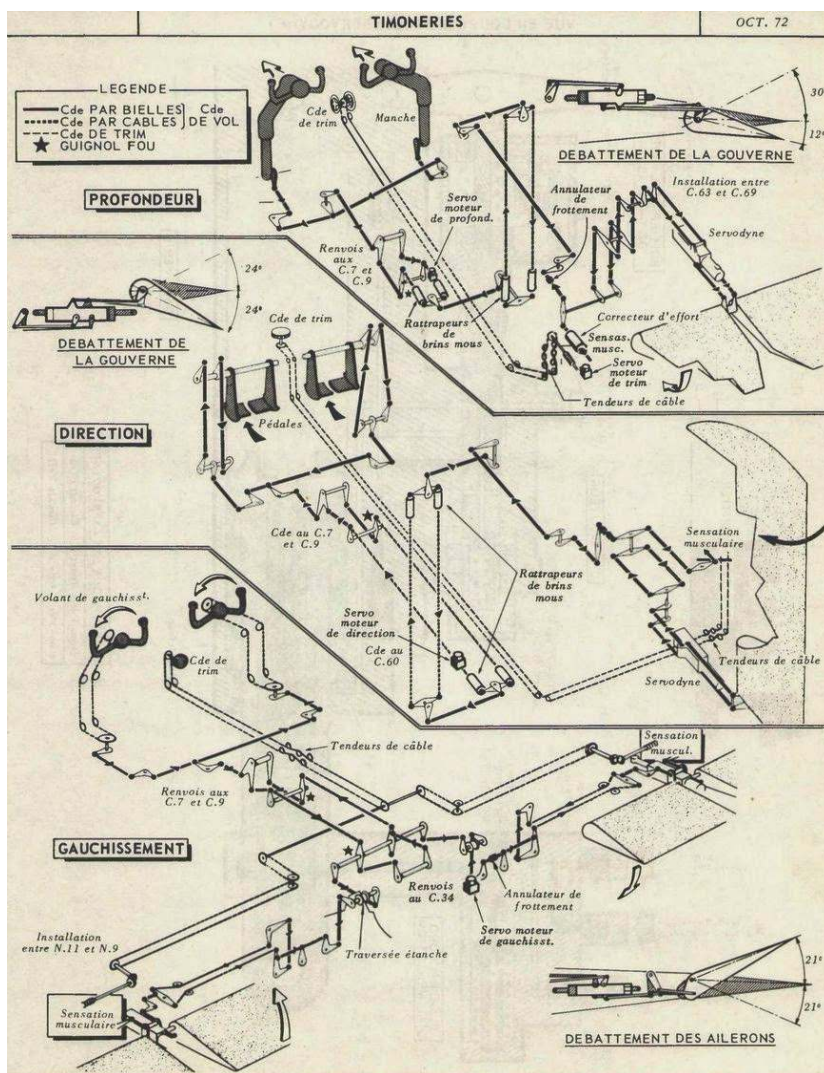
A la fin des années 40, l'apparition des turboréacteurs va faire faire un bond en avant en terme de performance aux avions : on passe d'un régime de vol subsonique à un régime transsonique voire même supersonique à partir de 1947. Or de telles variations de vitesses et d'altitude modifient le comportement des gouvernes : l'avion répond bien près du sol, mais répond moins bien à haute altitude, ou l'inverse. Le [Boeing 707](#) sera le premier équipé de trim (compensateurs) électriques, mais ce sera un échec : trop puissant et mal maîtrisé il conduira à des crashes, dont celui du "château de Sully" d'Air France à Orly en 1962.



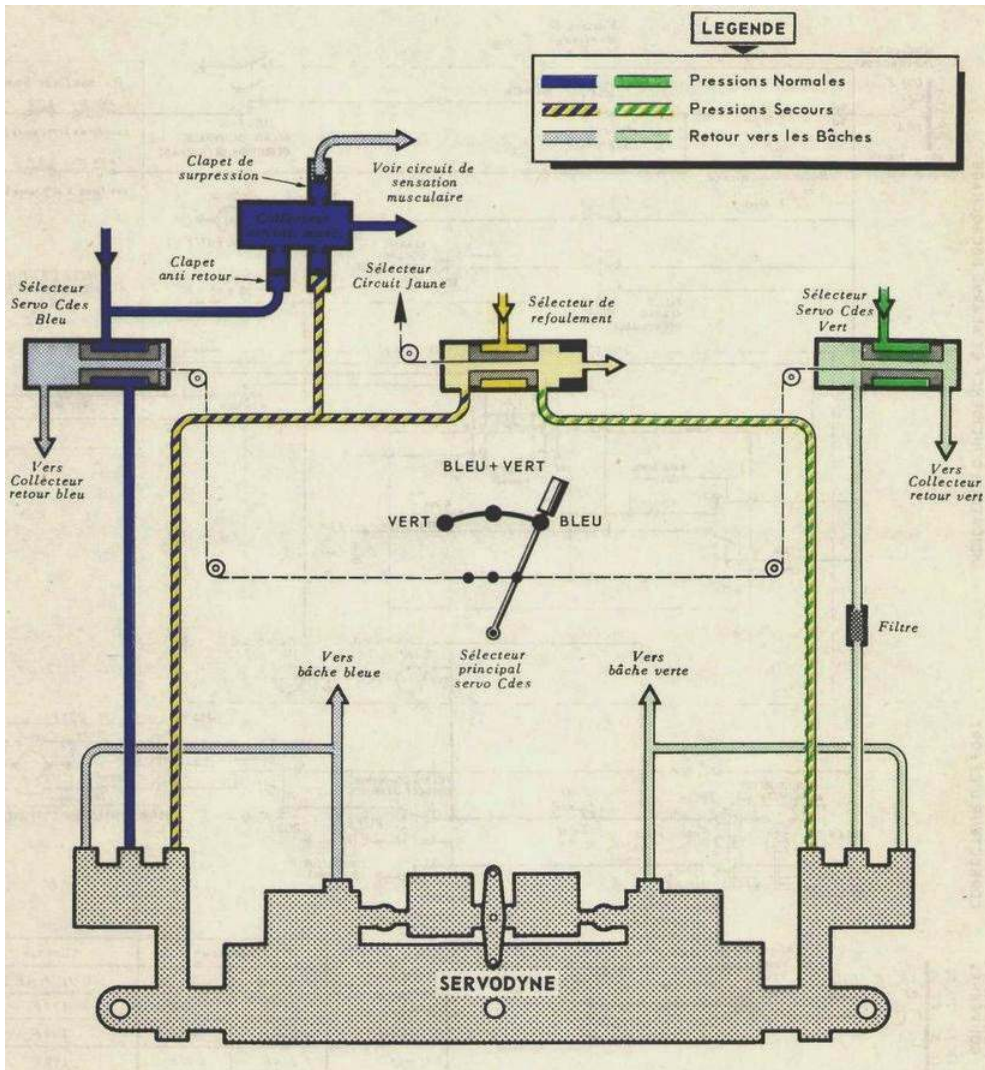
Les restes du "Chateau de Sully" après son crash, dû à un moteur électrique de trim bloqué ayant empêché l'appareil de décoller

L'électricité n'est pas prête, mais c'est l'énergie hydraulique qui va apporter une réponse : les servo-commandes hydrauliques vont apparaître et vite devenir populaire sur les avions à réactions d'après guerre, comme le [Comet](#), la [Caravelle](#)...mais aussi le [Vautour](#), [Mystère IV](#) et [Mirage III](#). Dans ce système, le manche du pilote reste le même, et toute la timonerie de commande

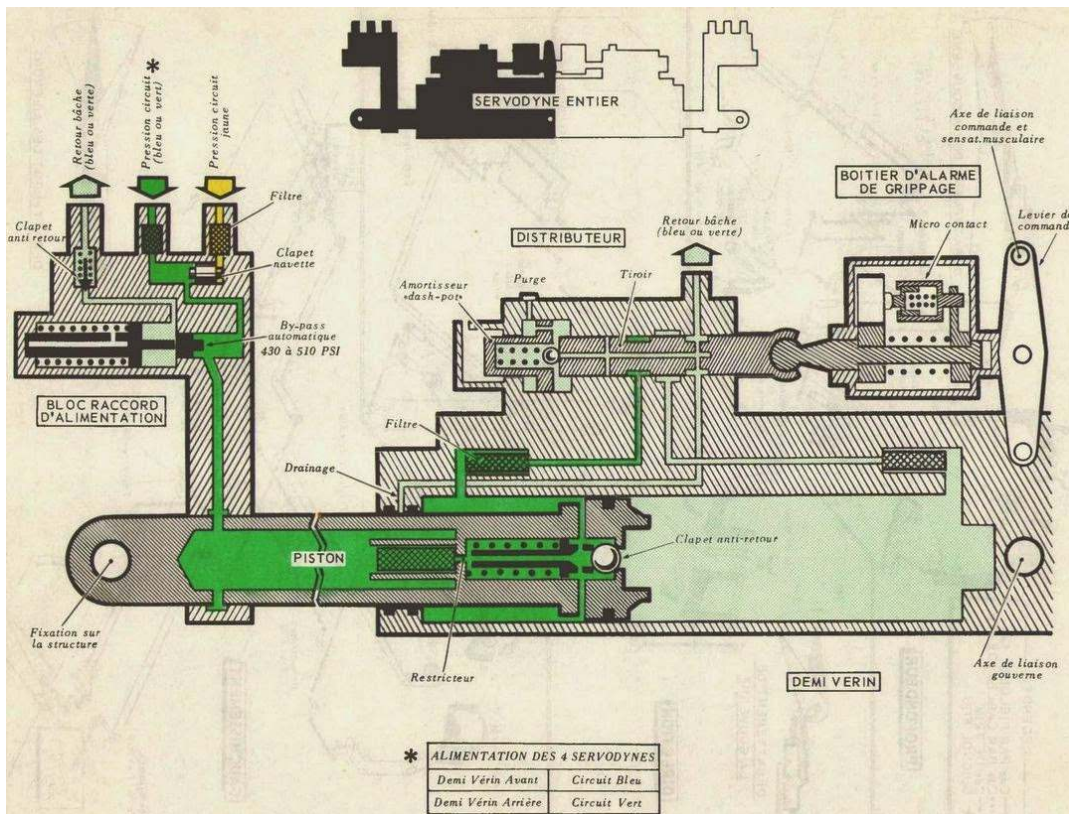
reste inchangée. En revanche, la timonerie n'est plus connectée à des commandes, mais à des tiroirs d'admission des servo-commandes, qui contrôlent directement les gouvernes. Problème : le pilote ne "sent" plus l'avion. Pour obtenir un sentiment comparable à celui de l'air sur les surfaces mobiles, il faut donc installer un système de retour de force artificiel, donnant au pilote des sensations d'effort correctes.



Sur Caravelle : une timonerie de commande "classique"...



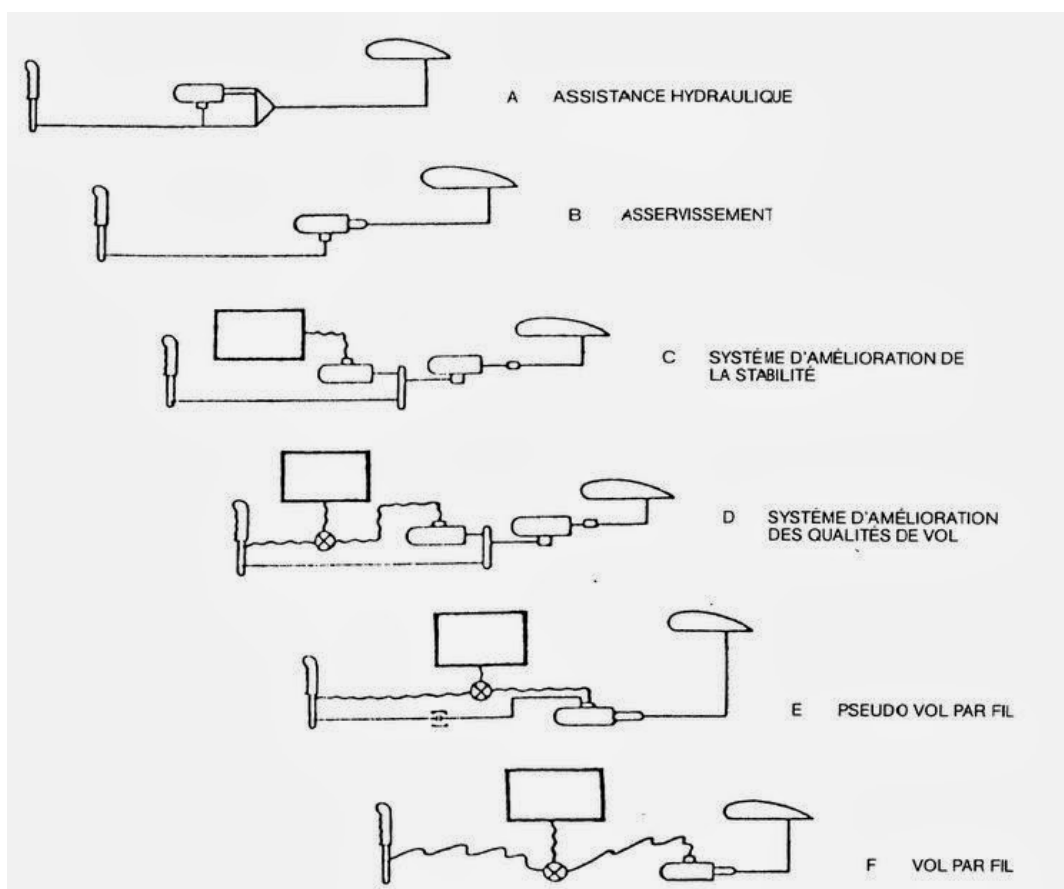
...mais le pilote en réalité ne commande plus les gouvernes, mais des servodynes, constitués de deux vérins montés dos à dos...



...chaque vérin est alimenté par un circuit hydraulique différent....

Les servo-commandes permettent de réduire l'effort musculaire du pilote...mais la timonerie de commandes reste inchangée, et elles ne permettent pas d'améliorer la stabilité de l'avion. Dès 1952, les anglais (bombardier Avro "[Vulcan](#)") et canadiens (sur le [CF-105 "Arrow"](#)) testent des vérins électrohydrauliques en boucle ouverte, et en France, le concept de commandes de vol électrique (CDVE) apparaît dès 1955 dans des recherches au STAé (Service Technique de l'Aéronautique).

Mais avant d'aller plus loin, arrêtons nous un instant sur une différence fondamentale entre "commandes électriques", et "commandes de vol électrique CDVE". Les commandes électriques agissent en "boucle ouverte", c'est-à-dire que à chaque déplacement du manche correspond un déplacement des gouvernes, et ce pour tous les domaines de vol. C'est ensuite au pilote de vérifier le comportement de l'avion. Ce système est plus simple, et permet d'éliminer l'encombrante tringlerie des commandes de vol, mais c'est à peu près tout. Dans le cas des CDVE, le déplacement du manche correspond à une consigne (par exemple à un déplacement du manche correspond un facteur de charge) et l'avion maintient cette consigne tant que le pilote n'a pas relâché le manche. Ce système est plus complexe, car du coup pour une même consigne, il faudra un grand déplacement des ailerons à basse altitude et basse vitesse, mais un tout petit débattement obtient le même résultat à haute vitesse et haute altitude : l'avion devient malin, car il sait envoyer un ordre à la gouverne, et vérifier que cet ordre est bien compris et obtient le résultat attendu. Pour le pilote, cela veut dire que le comportement de l'avion ne se sent plus à travers le manche, mais directement à travers les instruments.



Les différents types de commandes de vol.

- A : simple assistance hydraulique (Mystère IV)
- B : asservissement : le pilote n'a plus directement la main sur les commandes (Brabazon)
- C : amélioration de la stabilité (Caravelle)
- D amélioration des qualités de vol (Mirage IV)
- E : Fly by Wire : CDVE avec système de réversion manuel (Concorde)
- F : Fly By Wire total : plus aucun secours mécanique (A320)

Un tel système CDVE permet également d'ajouter des automatismes transparents pour le pilote. Prenons l'exemple d'un avion à voilure delta : à vitesse supersonique, le foyer de portance recule à cause de la formation d'onde de choc, et cela provoque un couple piqueur puissant qu'il faut contrer par la gouverne de profondeur : une compensation automatique facilite le travail du pilote. C'est ainsi que la Mirage IV ou l'Avro Arrow (tout deux conçus à la fin des années 50) ont bénéficié de CDVE avec compensation automatique en profondeur.

En 1962, va avoir lieu une "expérience" sur un Mirage IIIB, le c/n 225 : modifié, l'appareil devient à stabilité variable. Même si il conservait ses commandes hydrauliques, le pilote ne le contrôlait plus directement, mais par l'intermédiaire de calculateurs à loi variables. Il était le fruit des travaux de Gilbert Klopstein, un ingénieur pilote du CEV. Ainsi équipé, l'appareil pouvait simuler d'autres avions, donner l'illusion au pilote que le moteur était haut perché sur le dos, ou haut contraire pendu sous

une nacelle bien en deçà du fuselage ! L'appareil était génial et plaisait beaucoup, mais aux dires du général Alain Brossier, il possédait un gros défaut : "il était indispensable que le "Klop" (Klopstein), lui et personne d'autre, soit à la place arrière, lui seul pouvant jouer de tous les potards (potentiomètres) et bitards (boutons) qu'il y avait installés"...en clair, seul Klopstein savait faire voler l'avion. Il pouvait concocter n'importe quelle loi de pilotage depuis la place arrière, permettant au pilote de voler comme si il était sur Concorde ou sur Mirage IV, voire des avions farfelus !

J'ai suivi des cours à TAT Dinard fait par Gilbert Klopstein, j'ai découvert beaucoup de choses sur l'avion, tout cela expliqué avec une extrême simplicité. Merci « Le Klop » (c.chassagne)



Le "jouet" de Klopstein : le Mirage IIIB no 225

Les commandes électriques sont nées, et vont d'abord être installées en doublement des commandes mécaniques, avant d'être mises en œuvre seules sur le F-16 en 1974 puis sur le Mirage 2000 en 1978...pourtant, il ne faut pas négliger un autre avion qui sera capital pour la mise au point des CDVE : Concorde. Sur Concorde, les CDVE avaient été choisies en raison de l'échauffement et de la dilatation de la cellule, qui risquait d'empêcher une bonne utilisation des câbles de commandes classiques...mais en même temps sera installé un système de secours par câble, permettant une réversion mécanique par câble en cas de pannes des CDVE (le cas de la foudre était particulièrement redouté).

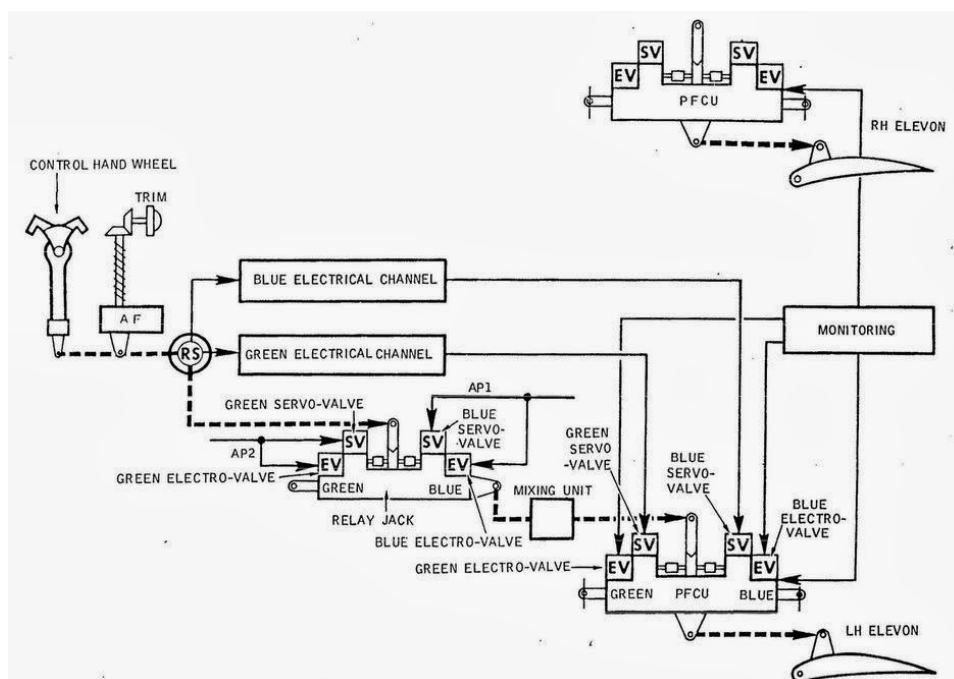
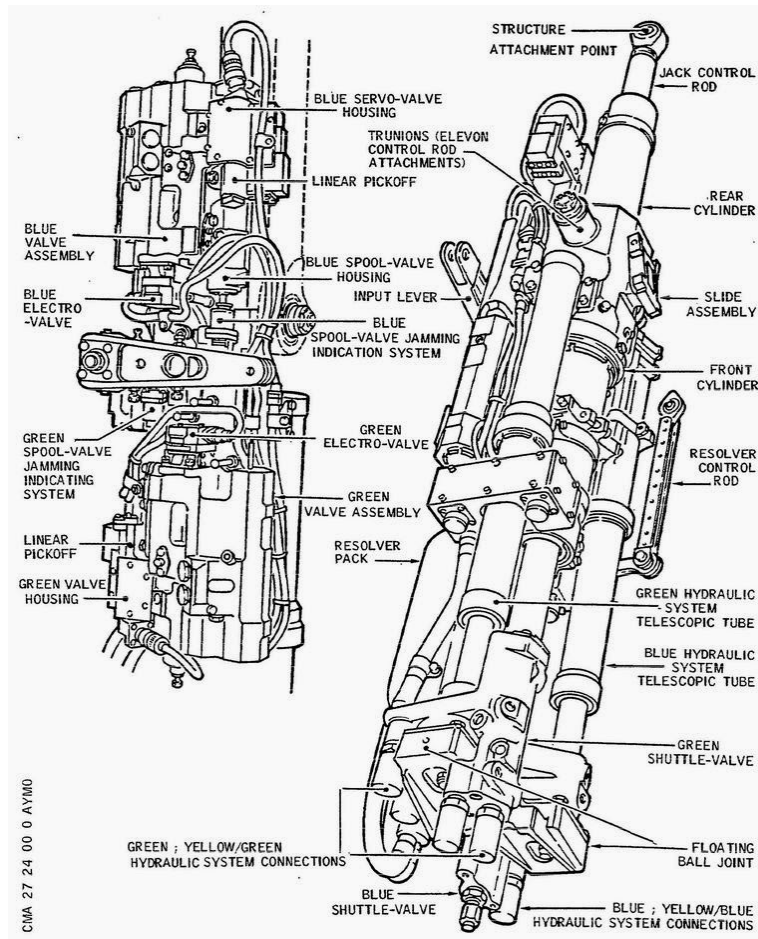
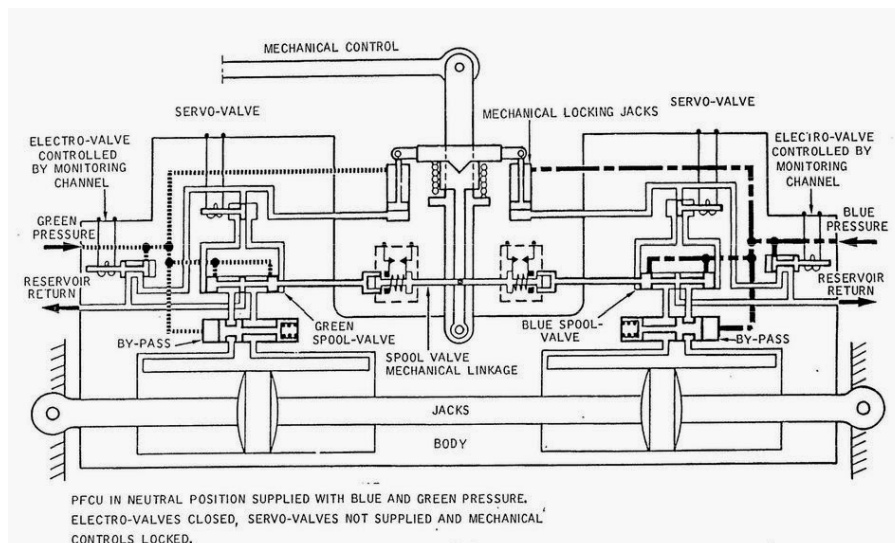


Schéma de principe des commandes de vol électriques de Concorde, avec deux voies : une de commande et une de suivi. Les PFCU (Primary Flying Control Unit) sont les vérins hydrauliques....

Pourtant Concorde n'a pas de calculateurs numériques : de simples calculateurs analogiques, qui répliquent le fonctionnement que l'appareil aurait eu avec une timonerie de commandes "classique", mais dans tous les domaines de vol, car le comportement de Concorde n'était pas du tout le même en subsonique que en supersonique, étant naturellement instable sur ses 3 axes. Le maintien de la stabilité dans le domaine transonique était particulièrement important, à la fois pour le confort et la sécurité de l'avion tout court. On peut ainsi voir les CDVE de Concorde comme un système de compensation automatique ultra-perfectionné. Deux circuits de commande et de surveillance fonctionnent en parallèle, et sont en plus redondés pour assurer la sécurité du système...



Les PFCU de Concorde étaient particulièrement impressionnants...



....PFCU de Concorde : double corps et double alimentation hydraulique séparées

Le système a déjà bien avancé, mais une autre révolution se prépare : [la révolution du numérique...](#)

[L'histoire des commandes de vol électriques \(2/3\)](#)

Malgré la [grande réussite des commandes de vol de Concorde](#), il ne faut pas en rester là ! Ce n'est que la première génération de CDVE !



L'A320, la naissance d'une légende

En 1978, la SNIAS obtient le financement de 10 heures d'essais sur Concorde, pour l'équiper d'un mini-manche en, histoire de voir la réaction du pilote. En effet, tant qu'il fallait actionner des câbles, les pilotes avaient besoin d'un grand manche avec un débattement important...mais avec les CDVE, le manche devient un simple potentiomètre, et plus rien ne justifie le grand volant de direction. Les essais sont concluants, et l'Aérospatiale renouvellera l'expérience en 1982 sur l'Airbus [A300B2 n°3](#). Il ne s'agit pas à proprement parler de commandes de vol électroniques, car l'expérience est faite en bouclant le mini-manche sur le pilote automatique, ce qui permet de piloter l'avion via le manche. Airbus n'est pourtant pas le premier à faire cette expérience : l'USF l'a déjà faite sur un [B-47E](#) modifié, avec un mini-manche en tanguage uniquement, entre 1967 et 1969.

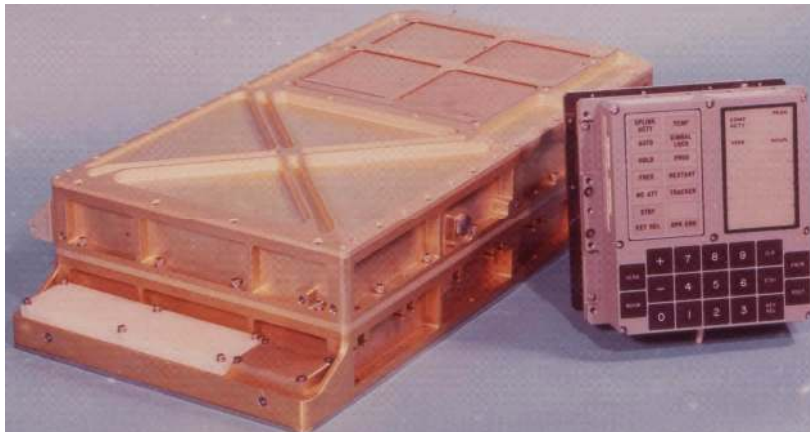


Mini-manche monté sur Concorde

Au début des années 70, c'est une autre révolution qui se prépare : le numérique arrive en force, avec l'avènement du circuit-intégré. La NASA est la première à tester un appareil équipé de commandes de vol numériques. Il s'agit d'un F-8 "Crusader" bricolé et équipé d'un ordinateur de guidage d'Apollo, construit mais non utilisé suite à l'arrêt du programme lunaire !



Le F-8 "Crusader" de la NASA...



Avec à son bord un ordinateur de guidage d'Apollo (34 Ko de mémoire !)

Le F-16 entre en service en 1979, équipé de CDVE, mais avec des calculateurs analogiques, le numérique manquant encore de maturité. Il faudra attendre dix ans de plus et l'arrivée du F-16 Block 40 pour que les calculateurs numériques fassent leur apparition. En France, l'histoire est à peu près identique : le Mirage 2000 sera équipé de calculateurs analogiques sur ses premières versions, et c'est l'arrivée du Mirage 2000D, qui vole début 1991, qui introduira le premier la "révolution numérique" dans l'armée de l'air.



Le mini-manche monté sur Concorde préfigure le "side-stick" d'Airbus

Sur ces deux avions (F-16 et Mirage 2000), le but n'est plus de disposer d'une assistance au pilotage, mais bien de supprimer la timonerie des commandes de vol "classiques" qui est encombrante et demande de la main d'œuvre pour l'entretenir. On estime que sur l'A320, le passage aux CDVE a fait gagner 300kg de câbles, poulies et renvois en tout genre... Mais en plus, on peut exécuter les ordres des pilotes de manière instantanée, tout en tenant compte d'un grand nombre de paramètres extérieurs (altitude, vitesse, dérive due au vent etc...). On voit tout de suite la grande différence avec un système de compensation : il faut que le système soit "intelligent" (j'emploie le mot avec guillemet, car comme tout, l'intelligence est juste une manière de dire "peut synthétiser des informations complexes" et non pas "être créatif"). Il faut donc des logiciels complexes capables de gérer les commandes.

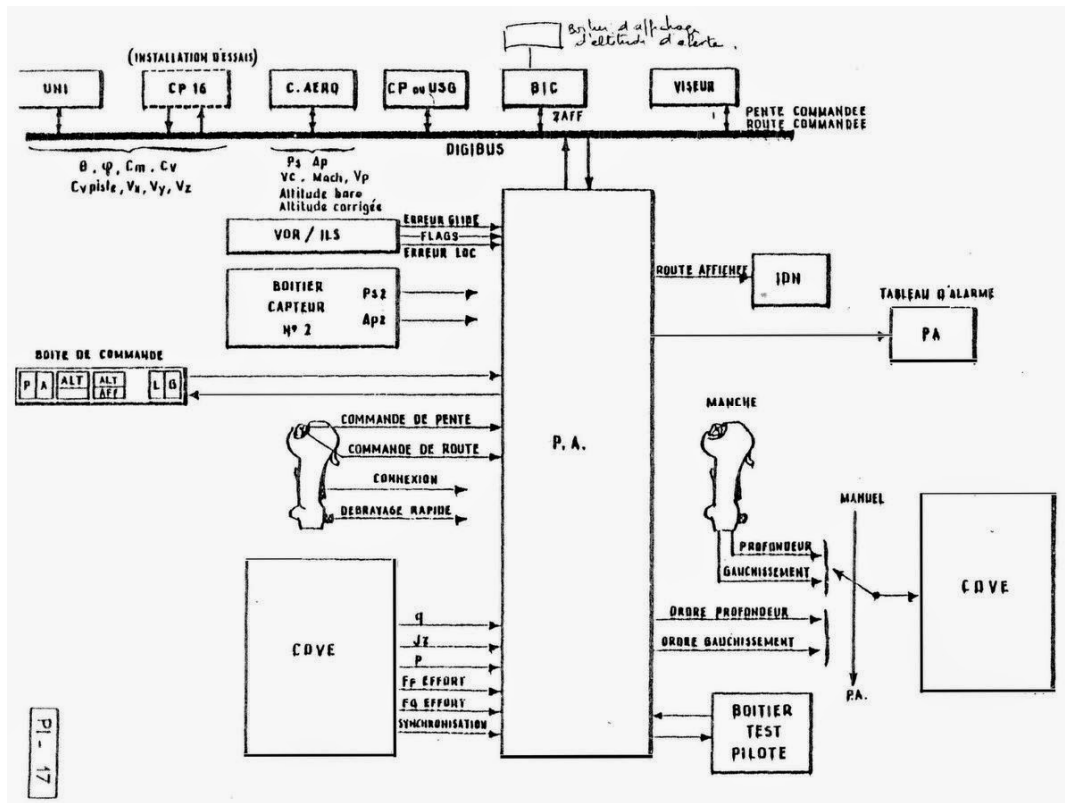


Schéma du pilote automatique sur Mirage 2000C : on voit l'importance des CDVE...

Logiciel...cette grande invention du 20ème siècle si mystérieuse...vous en manipulez tous les jours, et vous savez que un logiciel "ça plante"...que se passe-t-il si un logiciel de commandes de vol plante sur un avion ? Pour faire simple : il n'y a plus d'avion...il n'y a aucun droit à l'erreur : le système doit être parfait.

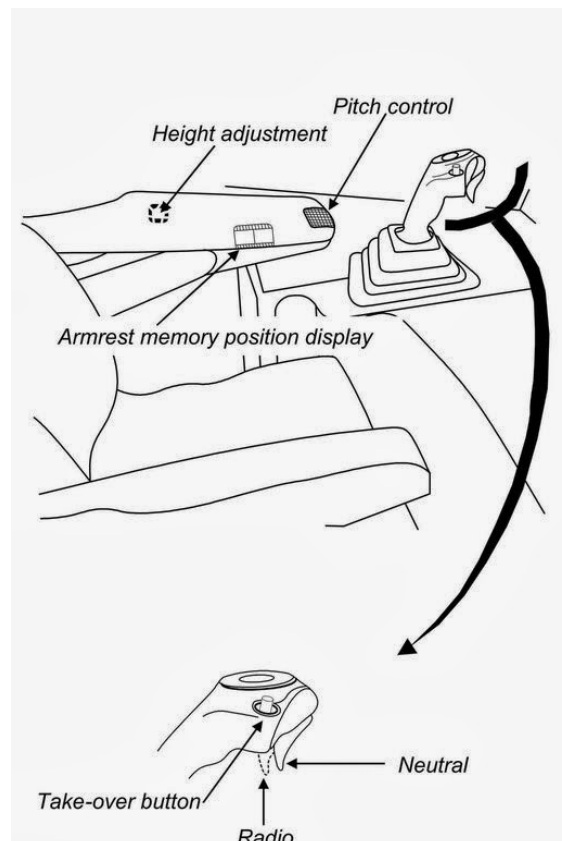
Mais aucun système n'est parfait...il faut donc s'assurer qu'aucune panne n'aura de conséquence catastrophique sur l'avion, ou sur la capacité à le piloter. Pour cela il fallait "mesurer" le risque de chaque panne et en évaluer les conséquences. En aéronautique, un événement catastrophique doit avoir une probabilité d'occurrence de 10^{-9} , c'est-à-dire une chance sur un milliard d'arriver !



Voler en faisant confiance à des ordinateurs ? Comment faire ?

Cette classification des pannes permet de définir ce que l'avion peut supporter. Si une panne se produit toutes les 100 heures de vol, mais qu'elle n'a aucune gravité, on peut faire avec...par contre si cette panne est catastrophique (par catastrophique on entend : qui risque d'endommager l'avion au-delà de toute réparation ou de blesser et/ou tuer des passagers ou membres de l'équipage) alors ce n'est pas acceptable. C'est très schématisé, mais c'est le principe.

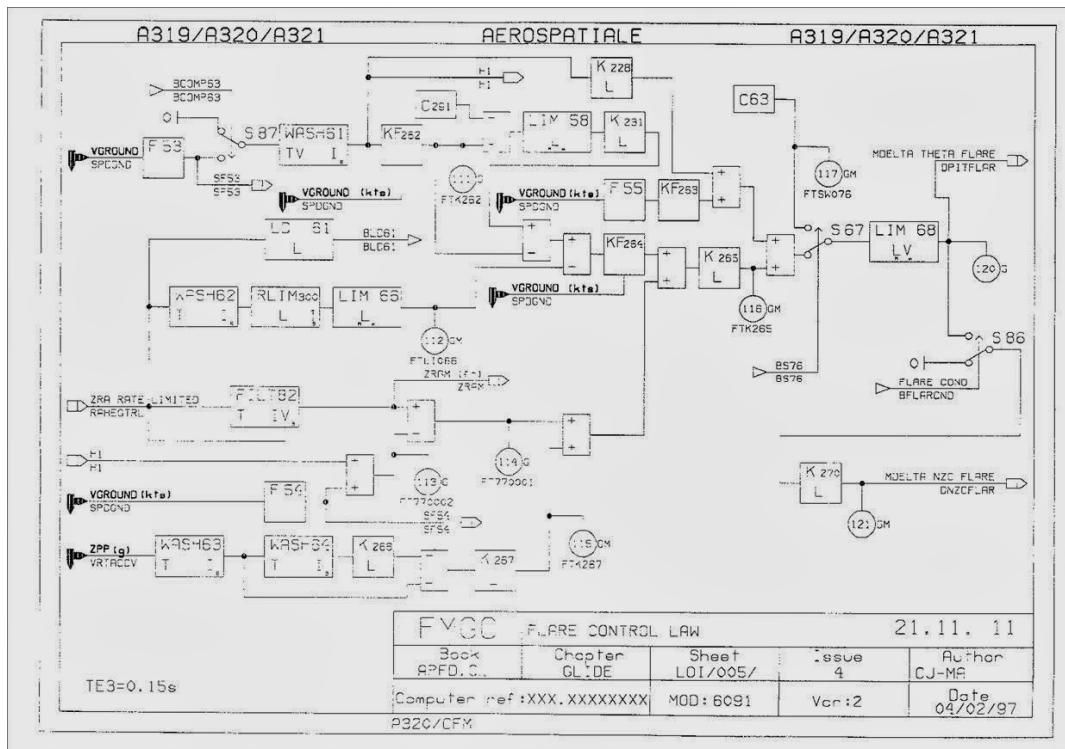
Pour l'A320, Airbus prend une décision risquée et très lourde de conséquences : l'avion sera piloté par des calculateurs, et ce sans aucun secours mécanique (contrairement à Concorde) ...il n'y a donc plus droit à l'erreur ! Comment faire ? Méthodologie...tout est dans la méthodologie ! Il faut tout penser depuis le début : combien de calculateurs, quelles architectures, qui contrôle quoi : tout est précisément écrit et vérifié de manière indépendante, avant même que la première ligne de code soit écrite !



Le "side stick", caractéristique des appareils Airbus à CDVE

Airbus va ainsi créer un atelier logiciel. On nomme un chef de service qui reçoit sa mission simplement "tu recrutes 60 ingénieurs et tu te débrouilles !" ...et comme personne ne savait démontrer la fiabilité d'un logiciel, il faudra mettre au point une méthodologie de développement permettant de s'assurer de la qualité du logiciel exécutable. Airbus va ainsi mettre au point une méthode de SAO, "Spécifications Assistée par Ordinateur", qui permet de remplacer les mots par des schémas, rendant les spécifications beaucoup plus claires et moins sujet à interprétation. Il n'y a en effet rien de pire qu'une spécification pouvant être interprétée. Plus tard SAO va évoluer pour devenir SCADE ou "Safety Critical Application Development Environnement", logiciel encore utilisé aujourd'hui dans l'aéronautique et le spatial. C'est seulement après ces étapes que l'écriture du code à proprement parler pouvait commencer.

Grâce à SAO, le développement de l'A320 va suivre un processus itératif : la spécification SAO est codée sur un PC puis exécutée. Si le développeur est satisfait, il envoie le code au laboratoire de vol pour simulation, qui valide et recueille l'avis du pilote. Le code est ensuite retravaillé ou accepté.



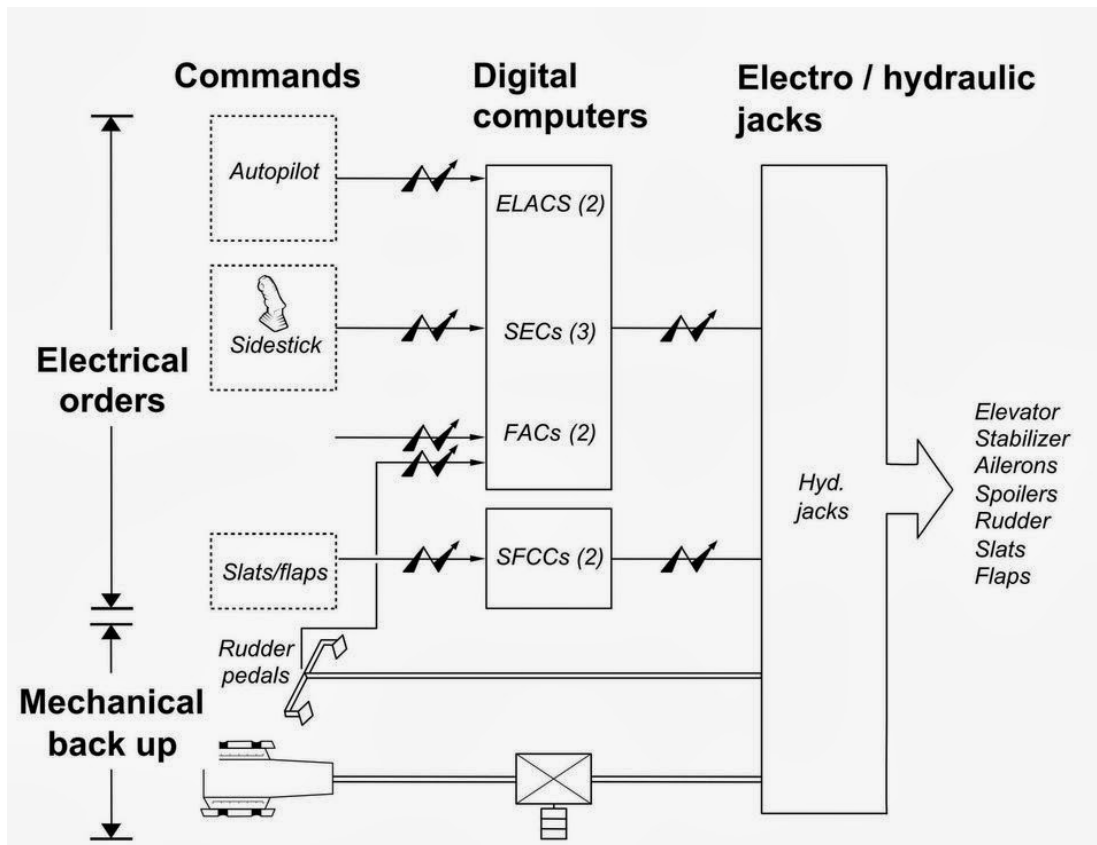
Exemple de schéma bloc généré sous SAO pour Airbus

Comme il n'est pas possible de faire un calculateur avec suffisamment de fiabilité pour tenir l'objectif de 10^{-9} , il va falloir faire appel à une architecture à la fois

- redondée, c'est-à-dire mettre plusieurs calculateurs en parallèle de telle sorte que si l'un tombe en panne, les autres continuent à fonctionner correctement
- "fail-safe", c'est-à-dire que même en cas de panne, il ne faut pas provoquer de catastrophe et assurer la sécurité malgré tout. Concrètement, si un calculateur ne peut plus fonctionner correctement, il va se mettre en situation "dégradée", c'est-à-dire continuer de fonctionner mais avec un logiciel plus rudimentaire, qui sera moins confortable pour les passagers, mais qui continue de fonctionner quand même.

C'est ainsi que l'A320 possède pas moins de 7 calculateurs de commandes de vol:

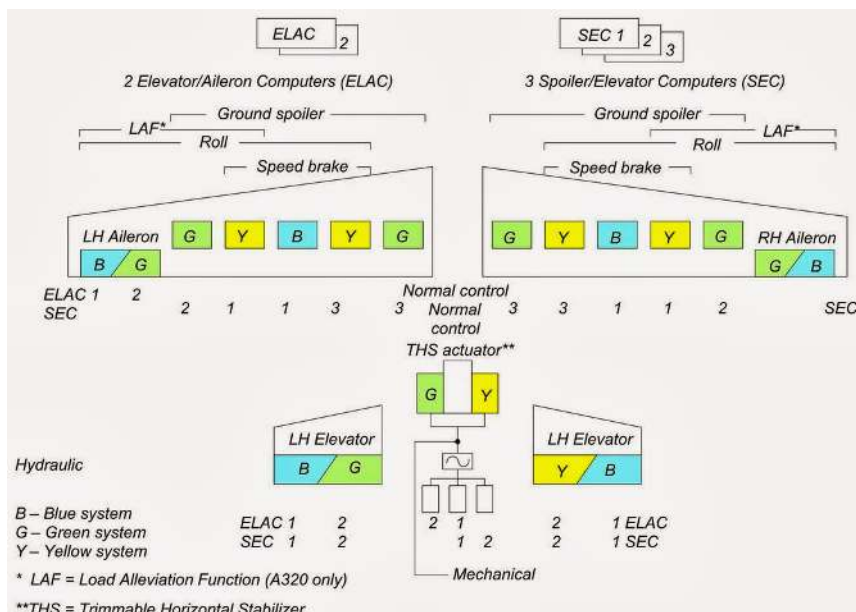
- 2 "ELACs" (Elevator Aileron Computer)
- 3 "SECs" (Spoiler Elevator Computer)
- 2 "FAC" (Flight Augmentation Computer)



architecture des commandes de vol sur A320

Ces ordinateurs permettent de commander les surfaces de vol de l'appareil avec facilité. Les lois de commandes de vol programmées sont aussi adaptatives : elles réagissent différemment suivant que l'appareil est en phase de décollage, de croisière ou d'atterrissage.

L'avion peut continuer à voler avec un ou deux calculateurs en panne : C'est ce qu'on appelle chez Airbus l'architecture "monitorée" ou COM/MON ("Command" et "Monitoring"). Avec cette architecture, on trouve à l'intérieur d'un même boîtier deux logiciels différents fonctionnant sur deux cartes électroniques différentes : la partie "Command" est le logiciel proprement dit, qui effectue ses calculs de sortie en fonction des entrées du système, et la partie "Monitoring" surveille que la première fait bien son travail...on place ainsi deux boîtiers en parallèle : si l'un détecte un problème, l'avion cesse de l'utiliser et passe sur le second, avec un avertissement au pilote.

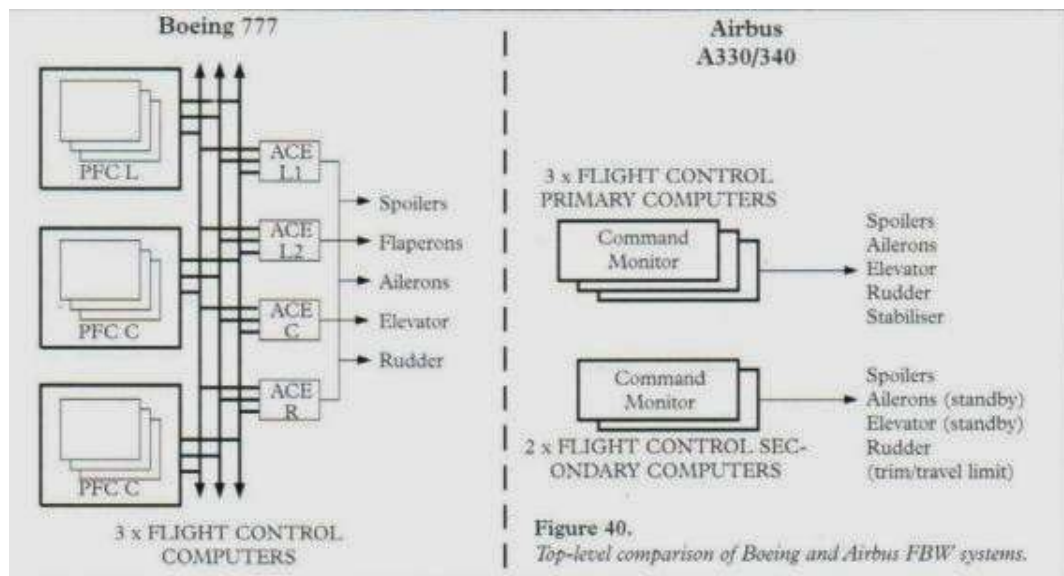


Il y a trois systèmes hydrauliques indépendants sur A320

On notera que Boeing de son côté à choisi une approche différente : les différents calculateurs vont comparer

leurs sorties, et ils vont voter à majorité pour savoir si on peut continuer ou si l'un d'eux commence à donner des résultats bizarres et doit être éliminé de la boucle...il faut donc trois boîtiers au minimum...contre deux pour un Airbus...

L'appareil possède en outre trois "lois", la loi normale, la loi "alternate" et la loi directe. La loi normale est celle qui est utilisée tout le temps, lorsque tout va bien. Elle possède toutes les caractéristiques de protection d'enveloppe de vol sur les trois axes, et limitation du facteur de charge pour ne pas abîmer l'appareil en cas de manœuvre sévère.



Boeing à choisi une architecture plus complexe avec des calculateurs plus simples...

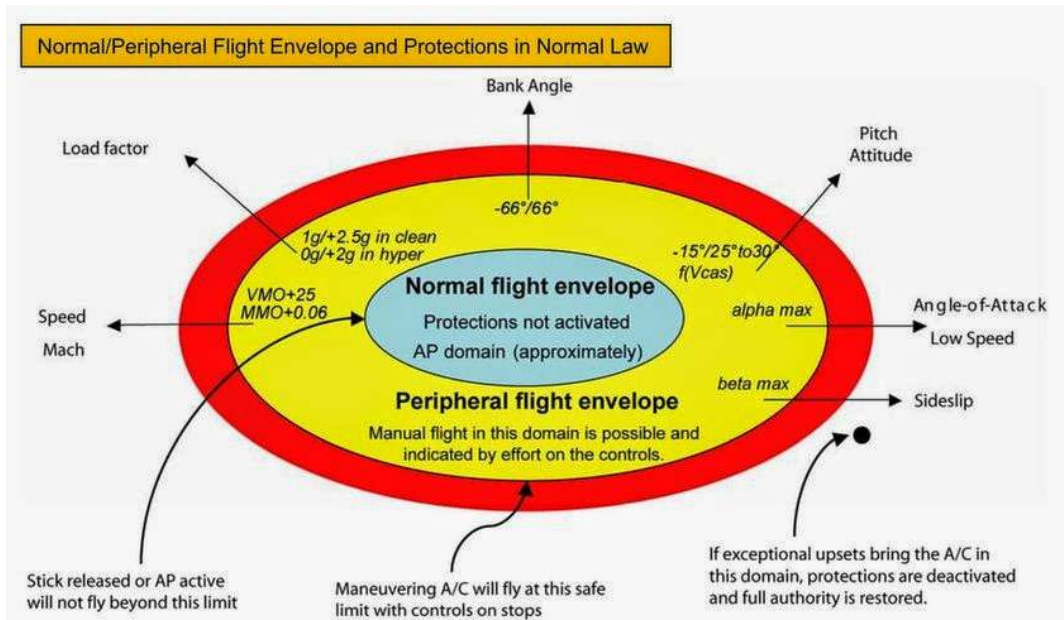
Si un ou plusieurs équipements tombent en panne, on passe alors en loi "alternate". Dans ce mode, on perd les protections d'enveloppe de vol, même si on garde les protections en décrochage et facteur de charge. Cette loi est un mode dégradé mais qui permet encore de voler tout en offrant une certaine protection à l'équipage...pour info ça correspond à ce qui est utilisé comme loi de vol chez Boeing où il n'y a pas de protection de domaine de vol, juste une limite dissuasive !

En cas de gros pépin (panne de plusieurs calculateurs, par exemple), on passe en loi "directe". Dans ce cas, on perd toutes les protections d'enveloppe de vol, et on obtient un déplacement des commandes proportionnel au mouvement du side stick. Le trim doit être assuré manuellement. Pour info, ce mode très dégradé correspond à ce qui était utilisé en vol normal sur Concorde...

Donc en résumé très schématique : soit tout va bien , on pilote un Airbus, soit ça va moins bien, et c'est comme piloter un Boeing, soit tout va mal, et on pilote Concorde ! Le cas "catastrophe" de tout plante n'est encore jamais arrivé malgré des millions d'heure de vol avec ce système...

Arrivé le moment de présenter leur trouvailles à des pilotes..les pauvres ingénieurs d'Airbus ont bien failli y laisser des plumes : les pilotes sont unanimes "quoi des "protections' ? Qui nous empêchent de faire ce que l'on veut ?" (et encore j'ai édulcoré le discours, beaucoup plus "imagé" de l'époque...qui perdure encore aujourd'hui...

Airbus va donc introduire des protections du domaine de vol : protection contre les basses et haute vitesse, contre les fortes inclinaisons et le facteur de charge, à +2,5G maximum.



L'enveloppe de vol et ses protections associées (schéma valable sur A330)

Les pilotes restent pourtant convaincu qu'il faut maintenir l'autorité totale du pilote, qui peut ainsi "choisir sa propre mort" selon une expression un peu malheureuse...l'idée étant que le pilote préfère avoir autorité totale pour être sûr d'éviter tout obstacle...quitte à tordre les ailes. Pourtant Airbus a épluché les statistiques de plus de 10 millions d'heures de vol pour fixer ces limites. Sur toutes ces statistiques, la manœuvre d'évitement réussie la plus violente a été de "seulement" 1,7G ! Malgré cela, la méfiance des pilotes persiste.

Un autre incident qui a lieu à cette époque relance le débat des CDVE : un "Tornado" de la Luftwaffe s'écrase après avoir survolé une puissante station radio...on pense tout de suite que ses commandes de vol ont été brouillées par les émissions...pourtant ce n'est pas le cas. L'A320 fera des essais électromagnétiques après cela : un A320 avec moteurs en marche au sol sera bombardé par des rayonnements électromagnétiques particulièrement violents...et l'avion ne bronchera pas !



Panavia "Tornado"...l'accident n'était pas lié aux commandes de vol

L'A320 sera un succès sans précédent, malgré des accidents, dont aucun n'a pu être lié directement à une mauvaise conception ou une panne des commandes de vol. On entre ainsi dans la deuxième génération des

commandes de vol électriques : l'ère du numérique.

On notera cependant que l'A320 n'est pas le premier appareil à posséder des calculateurs numériques : c'est en effet l'A310 qui avait été le premier à posséder des calculateurs numériques.

Boeing, pris de court, se doit de réagir : [c'est l'acte de naissance du Boeing 777...](#)

Suite à la [naissance de l'A320](#), Boeing se retrouve pris de court...il lui faut innover, et son nouvel appareil sera donc conçu par ordinateur et piloté par ordinateur : ainsi va naître le Boeing 777. Le "triple seven" n'est pas une simple copie d'Airbus : les ingénieurs de Boeing vont suivre une philosophie toute différente de celle de l'Aérospatiale.



Le Boeing 777, la revanche de Boeing sur l'A320 (au moins en terme d'avionique)

La première chose qui choque lorsque vous êtes un "airbusien" qui entre dans un cockpit de Boeing, c'est le manche : il y a toujours deux grandes colonnes de direction comme dans l'ancien temps. Ce n'est qu'une illusion, il n'y a plus de timonerie classique, le pilotage est bien "fly by wire", sauf que pour ne pas dépayser les pilotes, les ingénieurs de Boeing ont placé un manche avec retour de force au lieu du joystick d'Airbus, qui permet aux pilotes de "sentir" l'avion

L'autre différence fondamentale, quoique invisible au premier abord, c'est les protections du domaine de vol : là où Airbus à installé des limites que l'appareil ne franchira jamais, Boeing n'a pas installé de protection mais des limites dissuasives : plus on s'approche d'une zone dangereuse pour l'avion, plus le manche devient résistant. Si le pilote a suffisamment de force cependant, il pourra aller au-delà. Concrètement, à moins d'avoir David Douillet dans le cockpit, il y a des limites qu'aucun pilote ne pourrait surmonter...mais psychologiquement, le pilote se sent rassuré.

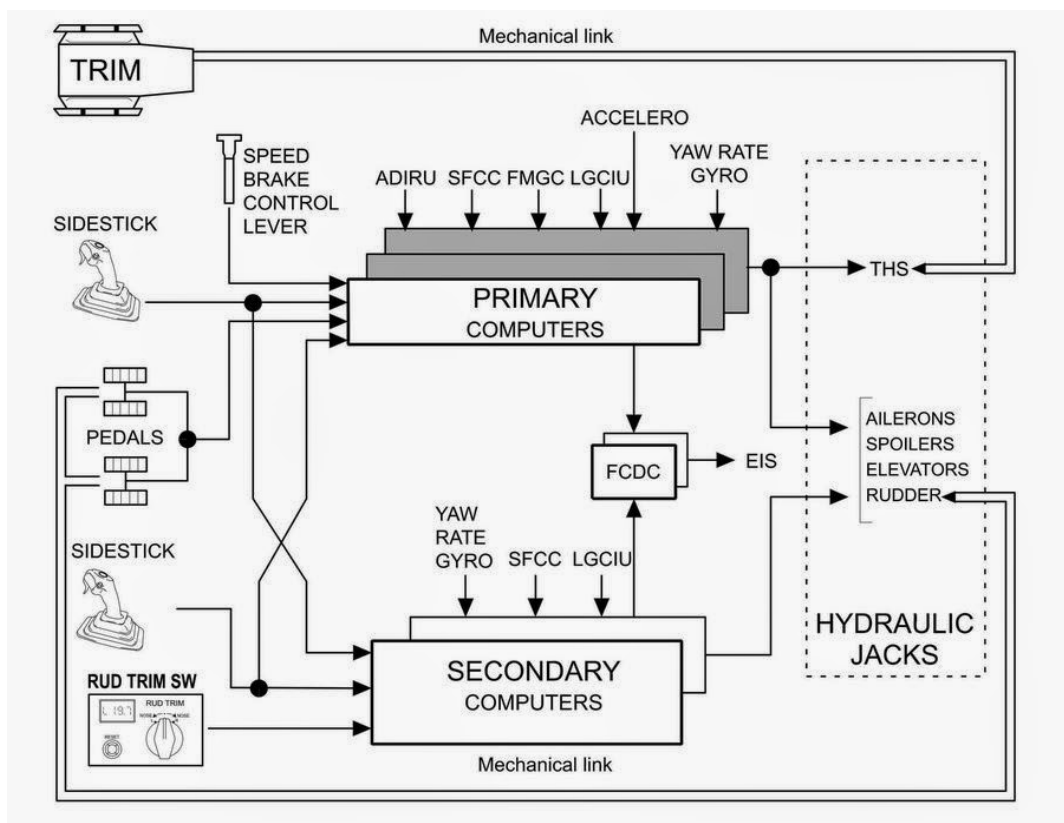


Similitudes et différences : à gauche le cockpit du Boeing 777 avec son manche classique, et à droite l'A330 et son mini-manche. Les deux constructeurs ont choisi des voies très différentes, mais les deux utilisent des CDVE.

Une autre différence majeure, mais plus subtile, dont j'ai déjà parlé dans l'article précédent : il n'y a pas d'architecture COM/MON, mais un vote majoritaire entre les équipements, ce qui demande plus de calculateurs, mais de conception plus simple...

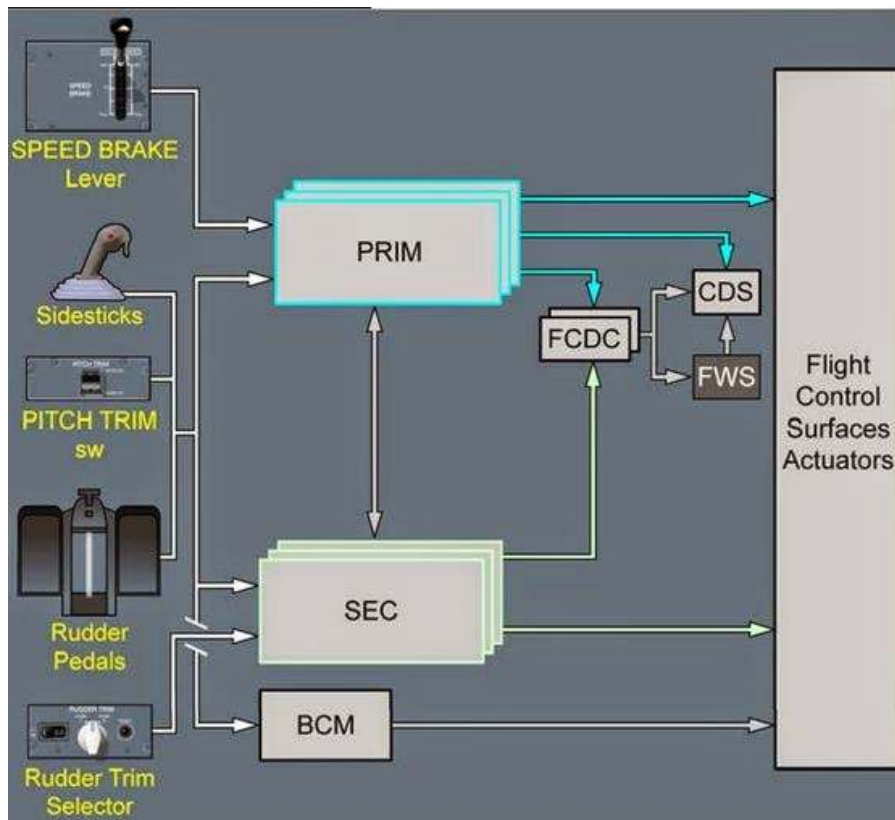
Quelle est la meilleure philosophie ? Airbus ou Boeing ? Vaste question : depuis la sortie du 777 il y a 20 ans, on cherche toujours la réponse : je pense qu'il n'y a pas de conception qui soit "meilleure", juste des inconvénients différents...statistiquement en tout cas, il n'y a pas plus d'accident d'un côté ou de l'autre !

Revenons au principe de fail-safe : il faut que si l'un des calculateurs tombe en panne, un autre prenne le relais...mais voilà, que se passe-t-il si on tombe face à un "bug" informatique ? La réponse est simple : on aura beau avoir 5 calculateurs différents, si ils sont identiques, ils auront tous le même problème : du coup il n'y a plus de redondance : c'est ce que l'on appelle une "cause commune". Pour éviter de tomber dans cette situation, il faut donc installer plusieurs calculateurs, mais qu'ils soient également de deux modèles différents (marque et matériel). C'est ainsi que sur l'A320, les 2 ELAC ont une architecture centrée autour d'un processeur, et les 3 SEC ont une architecture différente et un processeur différent : la probabilité est donc quasi nulle que les deux ordinateurs souffrent du même bug en même temps.



Sur A330/340, il n'y a plus d'ELAC et de SEC, mais des ordinateurs PRIM et SEC

Tous les Airbus et Boeing conçus depuis respectivement l'A320 et le 777 sont équipés de CDVE, avec quelques évolutions, mais les principes fondamentaux n'ont pas changés. On notera chez Airbus que la répartition des commandes de vol ont été intégrés au sein de deux types de calculateurs : les "PRIM" ou "Primary" et "SEC" ou "Secondary", il y a 3 PRIM et deux SEC, un seul suffisant à piloter l'appareil si besoin. Plus récemment, sur A380 et A350, il y a eu suppression totale du dernier lien mécanique, remplacé par un ordinateur de secours en plus.



L'architecture PRIM/SEC est quasiment inchangée sur A380

La "guerre" Airbus/boeing se joue aussi sur le terrain de l'ergonomie et de la philosophie des commandes de vol : on fustige toujours ce "joystick de rien du tout sans retour de force" d'un côté et on ne manque pas de critiquer "cet énorme manche peu pratique, héritage d'un temps révolu"...et chaque camp à ses partisans parmi les ingénieurs comme parmi les navigants qui préfèrent l'un ou l'autre...Pourtant comme je vous le rappelais, aucune étude indépendante et objective n'a pu mettre en avant une architecture comme étant mieux que l'autre !

Les CDVE ont permis un allègement considérable de la charge de travail des pilotes, en permettant le pilotage à deux, tout en augmentant le suivi de l'appareil : les défaillances de systèmes sont suivies en temps réel, et souvent un correctif est appliqué avant même que le pilote ne s'en rende compte...mais il y a encore d'autres avantages : on peut réduire la vitesse d'approche de l'appareil, sans danger de perte de contrôle, et en cas d'approche vers un obstacle, le système d'évitement ordonne au pilote de grimper.



Le cockpit de l'A350 s'inscrit dans la même ligne que celui de l'A330 et l'A380...avec cependant des nouveautés, mais la "base Airbus" reste la même.

Les CDVE sont donc devenues en l'espace de quelques années un élément indispensable des avions modernes, apportant une simplification du travail du pilote tout en augmentant la sécurité à bord de l'avion. De même, on réduit la formation des pilotes : prenez un pilote qu'il faut former sur A320 qui n'a jamais vu d'Airbus : il faudra 25 jours de formation, mais si il possède une qualification sur A20, il ne lui faudra que 7 jours de formation pour

être déclaré apte sur A330 ! La similarité des systèmes entre différents Airbus permet des économies lors de la formation des navigants.

On observe progressivement l'arrivée de nouvelles innovations, les actionneurs électriques en tête qui permettent de supprimer ou de réduire les installations hydrauliques : il n'y a sur A380 plus que deux systèmes hydrauliques...mais les actionneurs sont désormais combinés, pouvant être alimentés par le système avion ou par leur propre système intégré, réduisant ainsi les risques de panne et permettant la suppression du troisième circuit hydraulique. D'autres recherches se focalisent sur le "fly by optics", à savoir la transmission des commandes par fibre optique. On pourrait ainsi avoir des commandes plus robustes et insensibles aux agressions électromagnétiques.



Et le Boeing 787 dispose toujours de sa colonne de commande "oldschool" ! Là aussi en héritage direct du Boeing 777 !

Les CDVE ont profondément changé le rapport à l'avion, en remplaçant des fondamentaux du métier de pilote qui n'avaient pas changé depuis les débuts de l'aviation, et ce faisant, nous avons changé le rapport à l'avion : la sécurité aérienne a fait un bond en avant remarquable, mais dans le même temps, les rapports d'enquête n'ont jamais autant mis en avant le fait que les pilotes doivent être vigilants à "ne pas perdre les fondamentaux". Piloter un avion n'est pas pareil que de piloter un ordinateur, et l'enjeu du siècle à venir sera sans doute d'améliorer davantage la sécurité du vol...la grande question étant de savoir quelle sera la place du pilote : vrai opérateur ou simple singe savant ? La réponse à cette question n'est pas simple et agite déjà Airbus et Boeing depuis plusieurs années...

Publié par Koucs' à 17:00 1 commentaire:

[Envoyer par e-mail](#)[BlogThis!](#)[Partager sur Twitter](#)[Partager sur Facebook](#)[Partager sur Pinterest](#)

Libellés : [Histoire](#), [Liners](#), [Technique](#)