

HORS
SÉRIE
Collection
Avion
Moderne

Le Fana de l'AVIATION

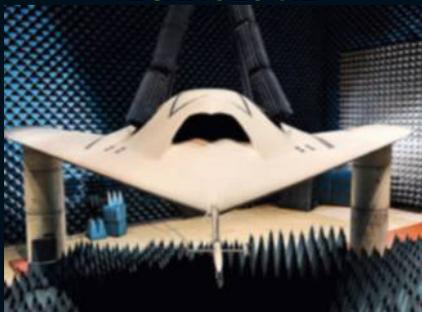
HORS SÉRIE n°11 Collection Avion Moderne

Le Fana de
l'AVIATION



Les grandes innovations aéronautiques

TECHNOLOGIE



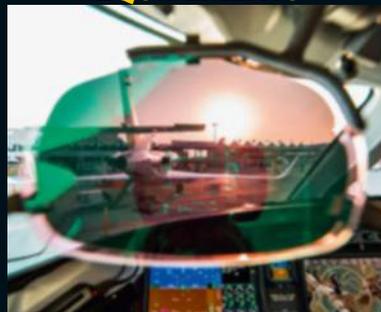
Furtivité, guerre électronique, drones

SÉCURITÉ



Sièges éjectables, boîtes noires

ÉQUIPEMENTS



Navigation, viseur, pneus, câbles

Bel/Lux: 9,9€ - Suisse: 13,6 FS - Esp/It/Port/Grèce: 9,8€ -
DOM: 9,5€ - Canada: 14,5\$ CAD - Cal/s: 1 310ctp - Pol/s: 1 440 xpf

L 19049 - 11 H - F - 8,50 € - RD



Editions Larivière

NOUVEAU, découvrez la version numérique enrichie pour tablette



Des diaporamas d'images inédits



WWW

Des liens actifs pour naviguer



Des vidéos à découvrir d'un simple clic

Fana Aviation

Votre mensuel, encore plus complet



OFFRE DECOUVERTE

Téléchargez **gratuitement**
Le Fana de l'Aviation numéro 586
et achetez les suivants pour 5,49 €



Disponible sur
App Store



amazonkindle



DISPONIBLE SUR
Google play

Les grandes innovations aéronautiques



Le Rafale, concentré de hautes technologies.
(Dassault Aviation - V. Almansa)

Par Michel Bénichou, Frédéric Lert, Frédéric Marsaly,
Alexis Rocher, Philippe Wodka-Gallien

Le Fana de l'Aviation

9, allée Jean-Prouvé, 92587 CLICHY CEDEX
E-mail : redac_fana@editions-lariviere.com

PRÉSIDENT DU CONSEIL DE SURVEILLANCE

Patrick Casanovas

PRÉSIDENTE DU DIRECTOIRE

Stéphanie Casanovas

DIRECTEUR GÉNÉRAL

Frédéric de Watrigant

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION

ET RESPONSABLE DE LA RÉDACTION :

Patrick Casanovas

ÉDITEUR : Karim Khaldi

RÉDACTION : Tél. : 01 41 40 34 22

Rédacteur en chef : Alexis Rocher

Rédacteur en chef adjoint : Xavier Méal

Rédactrice graphiste : Brigitte Laplana

Secrétaire de rédaction : François Foulon

Secrétariat : Nadine Gayraud

PROMOTION

Carole Ridereau. Tél. : 01 41 40 33 48

SERVICE DES VENTES

(réservé aux diffuseurs et dépositaires)

Chef de produit : Camille Savolle

Tél. : 01 41 40 56 95



IMPRESSION :
Imprimerie Compiègne
3, rue Nicéphore Niepce,
ZAC de Mercières
BP 60 524, 60205
Compiègne.

Papier issu de forêts gérées durablement. Origine du papier : Italie. Taux de fibres recyclées : 0%. Certification : PEFC / EU ECO LABEL. Eutrophisation : 0,018 kg/tonne



DIFFUSION : MLP

Printed in France/Imprimé en France

SERVICE PUBLICITÉ

Directeur de publicité : Christophe Martin

Assistante de publicité et annonces classées :

Nadine Gayraud - Tél. : 01 41 40 34 22

E-mail : pubfana@editions-lariviere.fr

ABONNEMENTS

ET VENTE PAR CORRESPONDANCE

(Anciens numéros/DOCAVIA/MINIDOCVIA)

Tél. : 03 44 62 43 79

boutiquelariviere.fr

E-mail : abo.lariviere@ediis.fr

Service abonnement : Editions Larivière

45 du Gal Leclerc - 60643 Chantilly Cedex

TARIFS ABONNEMENT :

France Métropolitaine:

1 an soit 12 n° + 2 HS : 89,50 €

Autres pays et par avion : nous consulter

Le Fana de l'Aviation est une publication

des EDITIONS LARIVIERE ; S.A.S. au capital de

3 200 000 € ; dépôt légal, 4^e trimestre 2018

Commission paritaire : n° 0722 K 82003

ISSN : 0757-4169

N° de TVA intracommunautaire : FR 96572071884

RCS Nanterre B572 071 884

12, rue Mozart 92587 CLICHY CEDEX

Tél. : 01 41 40 32 32 - editions-lariviere.fr

Toute reproduction, même partielle, des textes et illustrations publiés dans Le Fana de l'Aviation, est interdite sans accord préalable de l'éditeur. La rédaction n'est pas responsable des textes et illustrations qui lui sont envoyés sous la seule initiative de leurs expéditeurs.



SOMMAIRE

Chapitre 1 Aéronautique militaire

6 LE CANARD
DU DELTA

12 LE TRAIN D'ATERRISSAGE
DU RAFALE

18 DRONES DE COMBAT : S'ARMER POUR
LES GUERRES FUTURES

28 GUERRE ÉLECTRONIQUE : L'ATOUT
DE LA TECHNOLOGIE AU XX^e SIÈCLE

38 EJECTION...
ÉJECTION !

46 AVIONS FURTIFS.
PLUS EFFICACES ET PLUS DISCRETS



Chapitre 2 Avion, quel prix ?

50 UN AVION, COMBIEN
ÇA COÛTE ?



Chapitre 3 Technologies et techniques

62 QUAND LES YEUX
DIRIGENT L'ACTION...

70 COMMENT NAVIGUE-T-ON
AUJOURD'HUI ?

78 C'EST GONFLÉ ! PNEUS ET AVIONS,
LE GÉANT MICHELIN

84 DES AVIONS HYPER
CÂBLÉS

86 BOÎTES NOIRES,
POUR PLUS DE SÉCURITÉ

90 CABINES, HISTOIRE
DE TAILLES





Sur les routes du ciel

Le *Fana* vous propose une plongée au cœur du monde de l'aviation. Nous vous emmenons dans un long voyage pour vous dépayser, vous étonner encore plus.

Le voyage en avion est pour vous synonyme d'un siège étriqué, sans pouvoir étendre les jambes pendant des heures ? Imaginez-vous ce que c'était il y a 80 ans. On vous emmène dans les premières cabines pour vous faire frémir ! Vous trouverez probablement le plus spartiate des low cost actuels délicieusement confortable ! Pourtant paradoxalement le confort du passager est une idée aussi ancienne que le transport aérien. Voyez les installations somptueuses des grands hydravions de la fin des années 1930. Des palais du ciel ! Il fallait concurrencer les imposants paquebots. Luxe et économie sont

deux visages inséparables du transport aérien.

Ce hors-série est constitué de grands voyages dans l'aviation qui passent par des articles sur les techniques et technologies qui ne font pas forcément les unes des journaux. Savez-vous que votre avion de ligne, qui soulève à peine un de vos sourcils lorsque vous embarquez à bord tant tous semblent identiques, contient des centaines de kilomètres de câbles ? Décollage et atterrissage ne sont que de simples formalités ? Penchez-vous sur l'article consacré aux pneus pour comprendre les contraintes auxquelles doivent faire face les avions. Je gage que vous applaudirez au prochain atterrissage en ayant conscience un peu plus des techniques qui entrent ici en jeu. À propos combien coûte ce même avion ? Nous avons ouvert un peu plus loin,

dans ce *Fana*, le marché de l'aviation. Vous en trouverez pour toutes les bourses. De quelques milliers d'euros à plusieurs centaines de millions.

Les routes du ciel passent par une sécurité maximale. Interviennent dans cette perspective les boîtes noires. Elles sont souvent citées dans les accidents mais on vous propose de vous pencher dessus pour en comprendre les techniques et la finalité.

Une grande aventure technologique

Question sécurité, nous voulons évoquer celle des pilotes de chasse avec le fameux siège éjectable. Voyez combien de systèmes entrent en scène ici pour que le pilote puisse compter sur son siège. Martin Baker annonce, fin octobre 2018, 7586 vies sauvées. Pour rester dans le domaine militaire,



ce hors-série vous propose un panorama des drones de combat. Terminator est déjà en action dans le ciel. La grande question est désormais très simple : le pilote d'avion de combat fait-il désormais partie du passé ? Va-t-il rejoindre définitivement le musée de l'Aviation ? La guerre dans les airs passe par l'invisible comme on peut le découvrir un peu plus loin. Invisible aux yeux, aux radars, le tout dans une ambiance de guerre des ondes. L'avion de combat se doit d'être un concentré de technologie. Démonstration avec le Rafale, dont nous présentons ici quelques-unes des merveilles techniques. En parcourant les pages de ce hors-série, vous aurez compris combien l'aviation est toujours et pour longtemps une belle aventure technique et humaine.

Embarquez sur nos lignes, nous partons sur les routes du ciel ! ■

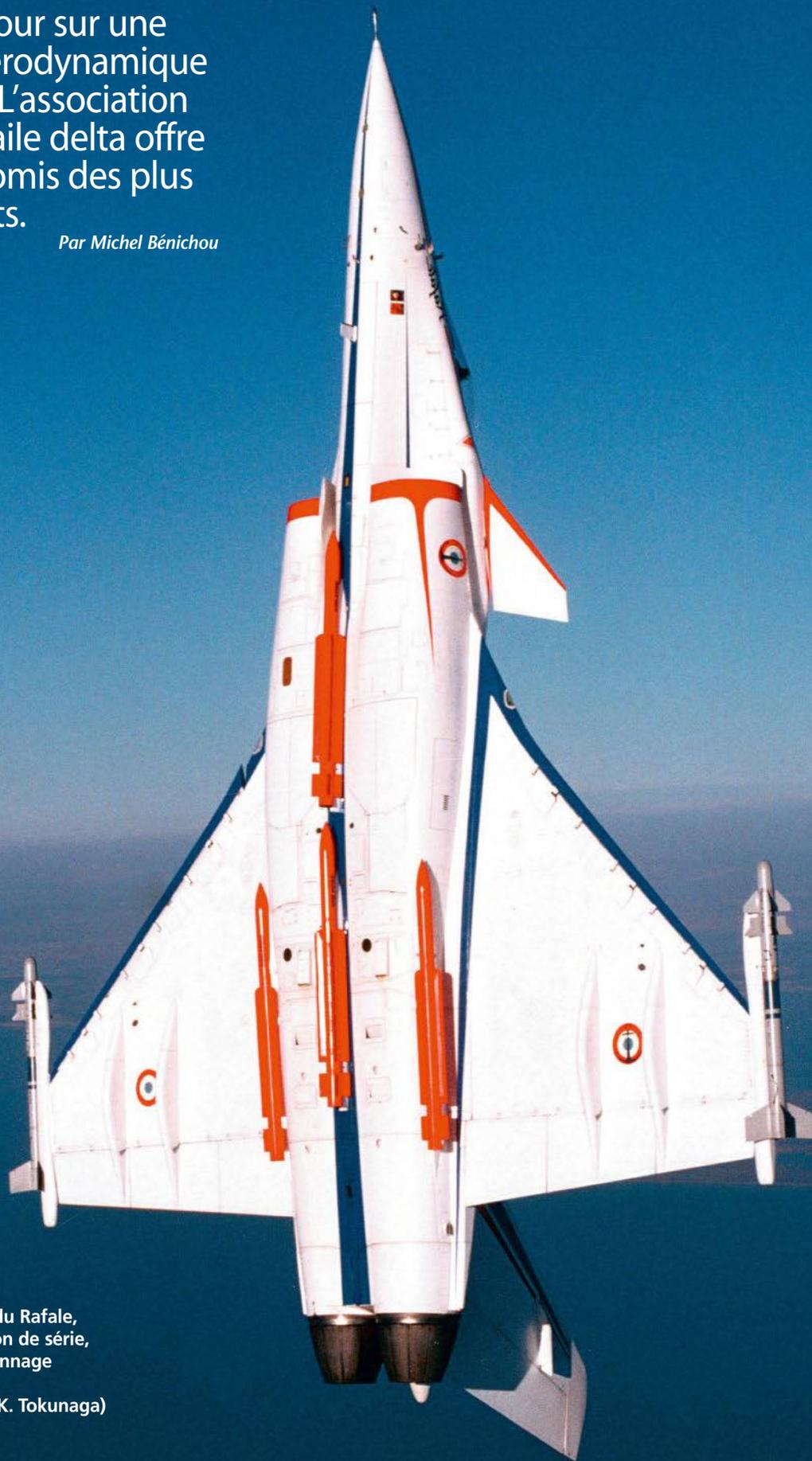


En haut à gauche : Trio Dassault avec Falcon 8X, Rafale Air et drone Neurone.
En haut à droite, l'Airbus A350. Ci-dessus, le drone Boeing MQ-25 Stingray.

Le canard du delta

Rafale : retour sur une formule aérodynamique gagnante. L'association canard et aile delta offre un compromis des plus intéressants.

Par Michel Bénichou



Le démonstrateur du Rafale, plus gros que l'avion de série, mais avec un empennage canard plus petit.
(Dassault Aviation K. Tokunaga)

Par son allure, le Rafale est apparu comme une grande nouveauté. Si cela avait été tout à fait le cas, cela aurait signifié qu'avant de disparaître en 1986, Marcel Dassault aurait fait une bien étonnante révolution, lui qui, depuis 1948, développait pas à pas une même formule d'avion de combat avec autant de prudence que de soin. Nous aurions bien des raisons à ne pas croire à un tel bouleversement. En réalité, le Rafale est en parfaite continuité avec les avions de combat Dassault, alliant formules éprouvées et audace technique.

265 esquisses furent analysées par le bureau d'étude entre 1978 et 1983 avant que l'architecture générale de l'ACX (avion de combat du futur) soit figée. Presque toutes présentaient une voilure en delta assistée par un empennage canard. Comme on sait, les canards, oies et cygnes ne ressemblent qu'à eux-mêmes lorsqu'ils volent avec les ailes loin derrière un long cou, comme aurait dit M. de La Fontaine. Le plan canard est à l'origine, en 1912, un empennage positionné à l'extrémité du « bec », une formule inaugurée (sans le savoir) par les frères Wright en 1902 !

Les imperfections de l'aile en flèche

Marcel Dassault l'a souvent répété : s'il avait arrêté son choix sur l'aile en delta en 1952 – sans être le seul, loin de là –, c'est parce qu'elle offrait sur l'aile en flèche de précieux avantages dont celui de la légèreté.

Sans entrer le moins du monde dans les détails, rappelons que, quand un mobile atteint la vitesse du son, il génère devant lui une onde de choc. Ceci fut établi en 1871, peu après la guerre franco-prussienne, et mis en évidence en 1887 par Ernst Mach grâce à la strioscopie. Depuis l'avant du mobile, cette onde forme un cône. Épaisse de quelques microns, elle est créée par le changement d'état de l'écoulement de l'air qui, de supersonique, redevient subsonique avec (donc et entre autres) une sensible augmentation de pression (transformée en boum par nos tympans). De manière différente, l'Allemand Adolf Busemann, peu avant 1935, puis le Russe Vladimir V. Strouminsky, et enfin, l'Américain Robert Thomas Jones en 1945, étudiant ce phénomène dit alors de la « compressibilité » (1), avaient défini l'aile en flèche et à faible épaisseur relative pour faciliter le vol supersonique. En schématisant, considérons qu'une voilure en flèche reste à l'intérieur du cône d'onde de choc, dans un écoulement subsonique ; plus la vitesse de l'avion est élevée, plus le cône est étroit, plus la flèche doit être accentuée, et plus ses inconvénients s'accumulent. Difficile à fabriquer, lourde, l'aile en forte flèche possède de fâcheuses caractéristiques à basse vitesse en décrochant à ses extrémités ce qui provoque un moment cabreur (autocabrage) et le décrochage de l'avion. Le tout est plus ou moins combattu par divers moyens plus ou moins lourds compliquant la fabrication. En outre, sur un bord de fuite en forte flèche, les volets d'atterrissage

sont bien moins efficaces que sur un bord de fuite droit, apportant à l'amélioration des performances, à basse vitesse, un maigre progrès.

Les avantages de la voilure delta

La si importante épaisseur relative est l'épaisseur maximale de l'aile, exprimée en pourcentage de la longueur de la corde moyenne (distance du bord d'attaque au bord de fuite mesurée parallèlement à l'axe de l'avion). Sur une aile en delta présentant une très forte flèche, la corde étant très longue, une aile d'assez forte épaisseur possède une faible épaisseur relative (3% sur Concorde !) ; elle offre un volume utile important pour les roues et le carburant. Une charge alaire plus faible, favorable à la maniabilité, est plus facile à construire, ; elle est légère et plus robuste puisque son emplanture est

.....

(1) En vol lent (jusque vers 650 km/h.) l'air s'écoule autour d'un mobile comme s'il n'était pas compressible. Lorsque sa vitesse atteint la vitesse du son ou Mach 1, se produit l'onde de choc, comme si l'air devenait soudain compressible. La compressibilité est accompagnée notamment par une brutale augmentation de la traînée aérodynamique et un recul du centre de poussée sur la voilure.

(2) En 1928, l'aérodynamicien suisse Jakob Ackeret désigna « nombre de Mach », en hommage à Ernst Mach, le rapport entre la vitesse d'un mobile et la vitesse du son (laquelle varie selon la température et la densité du milieu). Mach 1 = vitesse du son. Mach 0,8 = 80 % de la vitesse du son. Mach 1,2 = 1,2 fois la vitesse du son.



Le Dassault Milan, Mirage à moustaches. (Dassault Aviation)



Le premier Mirage III S modernisé avec des empennages canard, empruntés au Kfir C2 israélien. (Dassault Aviation)

longue. Grâce à la voilure en delta et malgré un moteur jugé trop peu puissant, le Mirage III A fut, en octobre 1958, le premier avion européen à dépasser Mach 2,2 (2), soit plus de deux fois la vitesse du son.

Les inconvénients de la voilure delta

Malheureusement, la voilure en delta a aussi un sérieux inconvénient. Sans se comporter aussi dangereusement à basse vitesse qu'une aile en forte flèche, elle ne permet pas le vol lent, parce qu'elle offre des capacités manœuvrières réduites à forte inci-

dence, quand l'avion est très cabré sur sa trajectoire. Elle impose donc, entre autres, une distance de décollage longue et une vitesse d'atterrissage élevée. Le Mirage III C, avec une voilure de III A améliorée, atterrissait à 180 nœuds (334 km/h) ; il avait en conséquence besoin de longues pistes. Or, dès les années 1950, rien qu'en France, de nombreux projets d'avions de combat supersoniques avaient comporté une voilure principale en delta, avec, sous l'avant du fuselage, une voilure secondaire, elle aussi en delta. Telle était l'architecture du Nord 1500 Griffon qui atteignit M 2 quelques jours après le Mirage III. A

partir de la fin de 1967, pour réduire les distances de décollage et d'atterrissage et améliorer la maniabilité des Mirage III S de la Troupe d'Aviation suisse, des « moustaches » rétractables de 0,59 m² possédant bec et volet furent essayées par Dassault sous le nez d'un Mirage III R de série, surnommé Milan. En 1970, le prototype d'un futur Milan de série fut présenté aux Suisses qui, finalement, renoncèrent à acquérir un avion nouveau. A la même époque, les Suédois faisaient voler le Saab 37 Viggen, intercepteur supersonique conçu pour pouvoir atterrir et décoller en moins de 500 m avec une voilure principale



en delta couplée à un grand empennage canard fixe muni de gouvernes au bord de fuite.

En 1976, les Israéliens présentèrent le Kfir C2 (développement du Mirage 5) doté de petites surfaces triangulaires en arrière de l'habitacle. Il est difficile d'imaginer que la société Dassault resta en dehors de cette modification importante qui améliorerait sensiblement les performances de l'avion. Les Mirage 2000 et 4000 firent l'actualité des années suivantes. Le premier, en vol à partir de 1978, possédait de petites surfaces rectangulaires fixes en arrière des entrées d'air, sur le second, en 1979, revinrent

des plans en forte flèche, placés un peu plus haut, dont l'angle de calage pouvait être modifié manuellement et par incréments en vol. En 1982, Dassault fit voler son ultime amélioration du Mirage III, le Mirage III NG (nouvelle génération), muni de commandes électriques et de plans canards en delta, assez importants (1 m² au total), mais fixes, en arrière des entrées d'air, associé à un apex (prolongement) du bord d'attaque des ailes à l'emplanture. En 1983, les Suisses modernisèrent leur Mirage III S avec des empennages canard copiés en plus petit sur ceux du Kfir C2. La distance de décollage était réduite

de 300 m, et c'est surtout la maniabilité qui s'en trouva grandement améliorée, car l'augmentation de l'angle d'incidence limite de l'avion réduisait de 500 m le diamètre du virage.

Même s'il n'est pas exhaustif, ce rappel suffit à montrer que, si les empennages canard étaient utiles aux avions à voilures en delta, ils n'étaient pas encore satisfaisants car leur étaient substitués plus souvent sur bien d'autres avions des surfaces d'apex fixes. Pour être très efficace, l'empennage canard des avions à ailes delta devait être pilotable, ce qui s'avérait très compliqué avec des commandes de vol classiques. L'avènement des commandes électriques, c'est-à-dire du pilotage par ordinateur, permit de les manœuvrer automatiquement pendant le vol sans accroître la charge de travail du pilote ; le calculateur détermine instantanément, selon les évolutions demandées, la vitesse et la charge, la position des empennages canard comme des autres gouvernes. Néanmoins, ce type d'empennage apportait une solution légère et peu coûteuse au problème posé par les militaires qui voulaient des avions très agiles, supersoniques, emportant des charges très lourdes avec d'excellentes qualités de vol à basse vitesse. Ce qui avait été essayé jusque-là ou était alors expérimenté (ailes à géométrie variable, tuyères orientables) avait plus d'inconvénients que d'avantages.

La multiplication des canards

C'est ainsi qu'apparurent en Europe, coup sur coup, les Saab Gripen, EFA/Typhoon, et Rafale avec des empennages canard mobiles pour améliorer la maniabilité, augmenter la capacité d'emport, et abaisser la vitesse minimale de vol, donc pour décoller et atterrir sur des distances plus courtes. Sur certaines versions du Sukhoï 30 russe, des gouvernes canard furent même ajoutées aux apex existants.

Forts de l'expérience acquise avec les Mirage 4000 et III NG, les ingénieurs de Dassault furent d'emblée convaincus que, pour l'ACX, le « delta + canard » était le plus prometteur, à condition que ces empennages fussent pilotables et de grandes dimensions (5% de la surface alaire). D'ores et déjà, leur position avait été déterminée par de longs essais, proches de la voilure principale pour interagir avec celle-ci en accroissant la portance aux basses vitesses ; l'empennage canard agit comme une sorte de bec de bord d'attaque. Cet empen-



Vue du Mirage III NG, où apparaissent magnifiquement l'empennage canard, les apex du bord d'attaque, mais aussi les bords d'attaque vrillés propres aux Mirage III pour ralentir la vitesse de décrochage aux grands angles d'incidence. (Dassault Aviation)



Le Mirage 4000 en vol. Ses petits empennages canard sont bien visibles. (Dassault Aviation)



La fumée met en évidence les tourbillons sur la voilure du Rafale, qui dynamisent la couche limite en favorisant la portance aux grands angles d'attaque. (Dassault Aviation/Sébastien Mousty)

nage était placé en arrière de l'habitacle pour ne pas gêner la visibilité du pilote, nécessairement bonne sur un avion embarqué comme sur un avion polyvalent destiné autant à des missions air-air qu'air-sol. L'empennage canard peut faire office d'aérofrein.

L'ACX devait réaliser les souhaits exprimés par l'armée de l'Air depuis presque ses origines, avec une polyvalence exceptionnelle. Les essais du Rafale A démonstrateur le confirmèrent en tout point, indiquant aussi l'utilité d'agrandir les empennages canard sur les plus petits Rafale de série. Comparaison fut alors facilement et fréquemment faite avec l'architecture moins avantageuse de l'EFA/Typhoon, il est vrai conçu au départ pour l'interception avec des moteurs superbes, mais moins adapté à d'autres missions à cause de sa configuration.

La preuve par l'évolution

L'efficacité notable de la formule du Rafale se traduit de manière évidente lorsque l'on a l'occasion d'assister aux démonstrations en vol de ces avions à la maniabilité époustouflante, le Rafale semblant d'ailleurs de loin le plus agile. Elle est traduite de manière moins visible par la ca-

pacité du Rafale d'emporter 9 500 kg de charges externes (presque la masse totale d'un Mirage III C), d'atteindre M 1,8 et approcher à l'atterrissage à 120 nœuds (220 km/h, 100 km/h de moins que le plus petit et plus léger Mirage III) pour, grâce à de puissants freins au carbone, s'arrêter normalement en 450 m sans avoir à utiliser de parachute-frein. Lors des essais, avec

des avions légers, la vitesse d'approche a été abaissée jusqu'à 90 nœuds (167 km/h), en deçà des limites imposées en exploitation normale.

Les ingénieurs, qui conçoivent le Rafale, n'ont cessé d'affirmer qu'il doit une grande partie de ses qualités à sa formule aérodynamique : « *Δ canard + entrées d'air semi-ventrales.* » ■



Les canards et les entrées d'air semi-ventrales du Rafale : une recette aérodynamique raffinée. (Safran/Anthony Pecchi)

Le train d'atterrissage

Quelles sont les différences entre le Rafale Air et le Rafale Marine ? Le train d'atterrissage et les cocardes. Tour d'horizon.

Par Michel Bénichou



du Rafale

Un Rafale Marine sur le pont du *Charles de Gaulle*. L'atterrisseur avant est particulièrement polyvalent lui aussi. (Dassault Aviation/K. Tonokunaga)



Sur la catapulte, l'avion est retenu par un brin à casser (en vert), le « hold-back », qui casse lorsque les moteurs exercent sa traction. Dès lors, l'avion va atteindre 140 à 170 nœuds en 75 m, la rupture du « hold-back » provoquant la détente du « train sauteur ».

(Dassault Aviation/S. Fort)

Le Rafale Air et le Rafale Marine sont les mêmes avions à une différence principale près : leur train d'atterrissage. Celui du Rafale Marine est plus lourd puisqu'il doit pouvoir absorber, à l'appontage et au catapultage, des efforts beaucoup plus importants, et, puisqu'il apporte aussi une assistance à l'action des gouvernes au décollage. Cet excédent de masse a été jugé superflu sur le Rafale Air.

Les Rafale se posent comme tous les avions, selon la même technique, en arrondissant la trajectoire de leur approche à proximité du sol pour prendre contact en douceur avec celui-ci. Mais, sur un porte-avions, ils appontent sans arrondi – une technique propre à tous les avions embarqués donnant plus de précision au toucher des roues afin d'accrocher les brins d'arrêts avec la crosse. C'est pourquoi le train d'atterrissage des avions embarqués est dimensionné pour absorber beaucoup plus d'énergie.

Les Rafale Air disposent eux aussi d'une crosse d'arrêt en secours, pour être immobilisé sur les pistes où la barrière d'arrêt, qui est levée pour stopper un avion arrivant trop vite, a été remplacée par des câbles disposés près du sol comme les brins d'arrêt sur un pont de porte-avions. Cependant, la crosse du Rafale Marine est plus robuste parce qu'elle est conçue pour absorber, une fois de plus, une énergie sensiblement supérieure.

Un atterrisseur multifonction

L'atterrisseur avant du Rafale Marine est facile à reconnaître. Il est plus long, ce qui donne au sol une assiette plus cabrée à l'avion, favorable à l'envol sur courte distance, et, pour la première fois sur un avion français, il porte, devant les roues, la barre de lancement qui s'accroche au sabot de la catapulte. Et, comme cette dernière peut tirer jusqu'à 80 tonnes comme le rappelle Yves Kerhervé, un des pilotes d'essais du Rafale chez Dassault, l'atterrisseur doit être renforcé par une grosse barre de contreventement qui apparaît derrière lui. Enfin, une innovation de Dassault : le « train sauteur », ce que la NASA a appelé « Jump Strut » en expérimentant son utilité sur un avion à décollage et atterrissages courts (STOL) au début des années 1990. Au catapultage, l'atterrisseur avant du Rafale Marine avant tend à s'écraser, mais lorsque la barre de lancement se décroche du sabot, il se détend comme un ressort en aidant la rotation (l'instant où

l'avion cabre pour s'envoler). Sur le Rafale, celle-ci peut atteindre 19° par seconde. Un tel dispositif permet, à masse égale, de décoller à une vitesse plus basse, ou, à vitesse égale, d'emporter plus de charge, la distance du catapultage (75 m) restant constante. L'atterrisseur avant braque aussi beaucoup plus sur le Rafale Marine, pour faciliter le roulage sur le pont ; une fois l'avion posé, il peut encore être déverrouillé pour pivoter de 70° par rapport à l'axe de l'avion quand celui-ci est tracté ou poussé. Enfin,

les trois atterrisseurs et la crosse du Rafale Marine sont liés par une barre, absente du Rafale Air.

Voici donc pourquoi la masse du train d'atterrissage du Rafale Marine est environ quatre fois supérieure à celle du Rafale Air. Mais cela ne constitue, en vol, aucun handicap, car, comme le dit Yves Kerhervé : « *En vol, on ne peut pas distinguer le Rafale Air du Rafale Marine, sinon par les cocardes.* » Ainsi les pilotes des deux versions du Rafale peuvent-ils suivre la même formation. ■



Pour le jeu des Sept différences ! L'atterrisseur avant du Rafale Air, ci-dessus (Dassault Aviation/A. Bonfort), et du Rafale Marine, ci-dessous (Dassault Aviation/S. Randé), une fois la barre de traction abaissée sur la catapulte (le hold-back n'appartient pas à l'avion). La barre de contreventement est bien visible.



Fana de **l'Aviation** Abonnez-vous



OFFRE "PASSION"

1 an soit 12 numéros	85.20€
+ 2 hors-série	20,00€
+ le hors-série F-105 "Thunderchief"	Offert
	117.70€

85€ SEULEMENT
soit 27% de réduction

AVIONS DE LÉGENDE : F-105 TONNERRE SUR HANOI

Le F-105 "Thunderchief" tient l'alerte nucléaire en pleine guerre froide, prêt à déclencher l'apocalypse. Envoyé dans l'enfer du Viêt Nam comme pilier de la campagne de bombardement, il traque les radars et se montre redoutable contre les MiG.

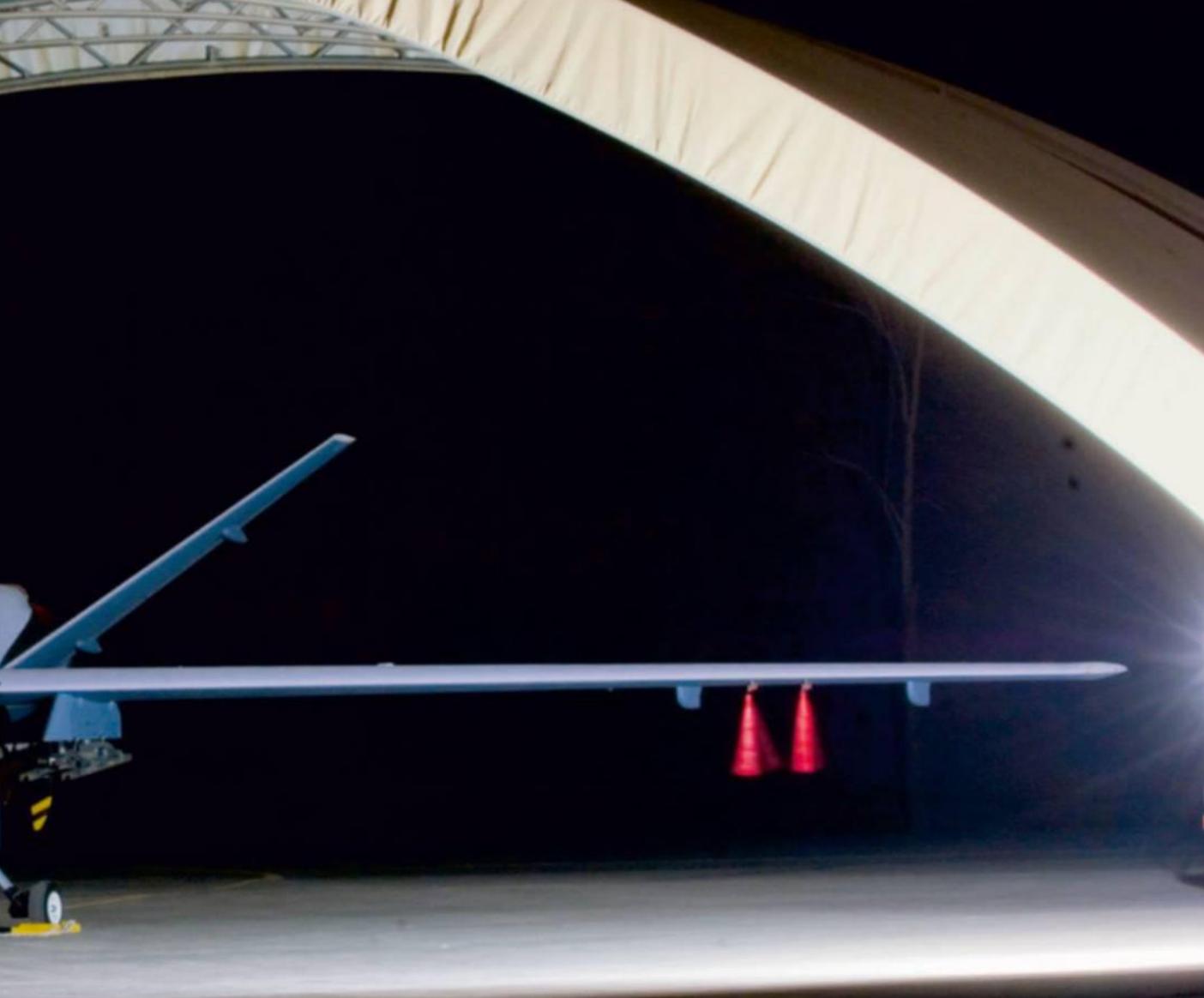


Drones de combat : les guerres futures

Le 6 novembre 2002, au Yémen, un drone Predator de l'US Air Force tire un missile Hellfire sur une voiture ayant à son bord six terroristes d'Al Qaïda. Le raid vient en riposte à l'attentat contre le destroyer USS Cole, un an plus tôt. Ce jour-là, les États-Unis procèdent à la première frappe par drone de leur histoire. Ce n'est que le premier acte d'une nouvelle révolution dans la conduite de la guerre aérienne.

Par Philippe Wodka-Gallien

Une décennie plus tard, l'US Air Force inscrit le 22 octobre 2013 deux millions d'heures de vol aux manifes-tes de mission de ses Predator et de ses Reaper, sa version plus puissante. Elle sait mettre en ligne 150 Reaper. Le 12 octobre dernier, l'US Air Force annonçait un raid en Somalie de drones armés Reaper avec l'élimination de soixante Djihadistes. Le drone est entré durablement dans notre culture stratégique, et tout autant dans notre culture populaire. En atteste, à ce titre, sa présence au cinéma et dans les jeux vidéo, sans parler des rayons des librairies. Dans le sillage de la révolution de l'infor-



s'armer pour

Le drone RQ-9 Reaper en intervention extérieure, une bombe guidée laser Paveway fixée sous l'aile droite. Apparu en 2001, il peut atteindre 480 km/h et voler 30 heures, une liaison satellite (sous le radôme avant) lui donnant une allonge stratégique. (Usaf)

mation des années 1990, sa maturité technologique et opérationnelles s'est affirmée. Plus récemment, le drone de combat, avion d'arme sans pilote, est en plein développement. Dans un univers inédit de violence mondialisée, ces deux systèmes répondent à un besoin de sécurité nouveau, étendu à l'échelle planétaire. L'aviation pilotée, seule, ne peut y répondre.

Drones armés et drones de combat : pourquoi et comment ?

Pourtant, le concept de drone armé est ancien. Il remonte aux premiers

temps de l'aviation militaire. La chute du mur de Berlin en novembre 1989 annonce une révolution globale.

Géopolitique, économique, elle est aussi technologique. C'est celle de l'information et du numérique. Soutenus par une expansion économique inédite, les drones armés s'inscrivent dans l'univers militaire antiguérilla consécutif aux attaques du 11-Septembre 2001. Les années 2010 restaurent les oppositions interétatiques. Revendications régionales – Ukraine, Crimée, mer de Chine, ambitions indiennes, prolifération nucléaire, conflits persistants du Moyen-Orient – et terrorisme territorialisé : l'expression violente de rapports de

force est devenue la nouvelle grille de lecture de la géopolitique contemporaine. La défense redevient prioritaire.

Les premiers drones armés sont issus des nouveaux drones de renseignement à grande autonomie. Fixé à leurs frêles voilures, l'armement ne peut être composé que de munitions légères : des engins antichars ou des roquettes à guidage laser. La formule répond au besoin de neutralisation des groupes terroristes qui trouvent refuge dans les zones reculées du monde, à l'image d'Al Qaeda qui opère depuis l'Afghanistan. Le drone armé vient appuyer les forces spéciales, les hélicoptères et l'aviation de

Drones BQM-34 Firebee de Teledyne Ryan mis en œuvre par un C-130 Hercules. A partir de cet engin cible, la configuration est perfectionnée durant la guerre du Vietnam pour des missions de reconnaissance et de guerre électronique. (Usaf)



combat sur des zones étendues face à des adversaires bien dissimulés. Telle est la leçon des opérations en Afghanistan déclenchées par l'Otan en soutien des Etats-Unis suite au 11-Septembre. Plus encore, ces engins ont toute liberté dans un ciel dépourvu de défenses sol-air sophistiquées (hors quelques missiles Manpads).

Ces systèmes apportent le nouveau vocable de drone MALE (Moyenne altitude et longue endurance), ou de MALE armés lorsqu'on lui ajoute un armement.

Le drone de combat prend la désignation d'UCAV (Unmanned combat air vehicle). Rapide, furtif, manœuvrant, cet avion de combat

autonome n'est pas contraint par les limites physiques d'un pilote. L'armement est emprunté aux avions de combat. Le tout doit garantir le succès d'une action offensive face à un adversaire étatique apte à protéger son espace aérien au moyen de défenses sol-air perfectionnées. Ils auront aussi à opérer avec les avions



Drone BQM-34 Firebee de l'US Air Force en configuration de renseignement électronique, le capteur étant placé dans la pointe avant. Ce système a également été déployé par l'armée de l'Air israélienne au début des années 1970. (Usaf)

Vol du premier RQ-1 Predator armé de deux missiles anti-char Hellfire. Les premières expérimentations de Predator armés sont conduites en 2001. (Usaf)



de combat pilotés, éventuellement en formations combinées. A ce jour, dans les deux cas, l'homme est toujours dans la boucle de décision d'ouverture du feu.

Le centenaire du drone armé

Victorieux, en 1918, des empires centraux, Etats-Unis, France et Royaume Uni se présentent déjà comme des pionniers. La Marine nationale veut exploiter la télémechanique, une innovation qui permet le pilotage à distance de plans aérodynamiques. Elle est utilisée pour mettre au point un biplan téléguidé armé d'une torpille. Testé au large de Toulon en 1920, c'est l'ancêtre tout à la fois du missile Exocet et du drone armé. Il n'est pas donné suite à ce système, mais il permet de très nets progrès en matière d'instruments de bord, notamment le pilote automatique.

En 1936, l'US Navy lance le projet N2C-2, un biplan Curtiss télécommandé porteur de bombes. Direction la guerre du Pacifique. La marine américaine met sur pied le Special task air group-1, une unité qui met en œuvre des bimoteurs Factory TRD-1, des bombardiers télépilotes.

Quatre de ces bimoteurs décollent des îles Salomon en juillet 1944 pour frapper des navires japonais. Ils font but sur les cargos Yamazuki et Maru, et 46 de ces engins interviendront en 1944 à Guadalcanal. Il faut lire le *Fana* n°286 (septembre 1993) pour découvrir cet épisode. Au sortir de la Seconde Guerre mondiale, les nouveaux

engins télé-pilotés sont cantonnés à un rôle très secondaire de ciblerie pour l'artillerie sol-air. On citera, sur ces années 1950, les engins français CT10 dérivés du V1 ou le Turana en Australie. Ils sont les premiers pas timides d'une nouvelle révolution. Ils servent aussi au recueil de particules radioactives lors des tests nucléaires



Drones BQM-34 Firebee modifiés au début des années 1970 pour l'emport d'armes air-sol de précision. On distingue, sur le chariot de gauche, la bombe planante téléguidée Studdy Hobo. (Usaf)

Le 6 juillet 2016, un Rafale Marine vole en patrouille avec le démonstrateur Neuron de drone de combat à proximité du porte-avions *Charles-de Gaulle*. Pour Dassault Aviation, l'ensemble préfigure l'avenir de l'aviation embarquée française. Il est ainsi prévu de dimensionner le(s) futur(s) porte-avions français du siècle pour la mise en œuvre de drones de combat. (Dassault Aviation / A. Pecchi)





Reaper armé de bombes Paveway et de missiles Hellfire. Cette configuration développée en vue de limiter les engagements de troupes au sol répond aux nouveaux impératifs opérationnels imposés par les guerres asymétriques consécutives aux attaques terroristes du 11-Septembre 2001. (Usaf)

atmosphériques, à partir d'avions pilotes B-17 ou T-33 dronisés. La guerre électronique leur donne aussi l'impulsion. Les B-47 puis B-52 du Strategic Air Command font appel à de petits missiles pour leurrer les radars soviétiques, les ADM-2C Quail. Ils restent en service jusqu'en 1972.

Les premiers drones de combat : un héritage de la guerre du Vietnam

De cette déroute, le Pentagone se relève en intégrant trois innovations majeures : les armements guidés, la guerre électronique, mais aussi les drones. L'expert attiré de l'US Air Force est Teledyne Ryan. Basée à San Diego, la firme signe un contrat por-

tant sur la transformation de l'engin de reconnaissance BQM-34 A Firebee en un drone armé. Lancé par un C-130 Hercules, opérant comme un missile récupérable, l'engin était dédié à la recherche de sites sol-air. Il embarquait à cette fin une caméra ou un capteur Elint (Electronic Intelligence). Le premier essai du Firebee armé se tient le 14 décembre 1971 auprès du 6514th Test Squadron de l'US Air Force. L'expérimentation prévoyait le tir d'un missile téléguidé Maverick qui parvient à frapper directement une cible au sol. En février 1972, l'exploit est renouvelé avec un Studdy Hobo, un engin guidé à auto-directeur optronique. Les expérimentations se succèdent avec les premières armes guidées laser Paveway, mais aussi des bombes lisses Mk-81

et Mk-82. Chaque Firebee emportait deux munitions, une sous chaque aile. Cet engin est bien l'ancêtre de l'UCAV d'aujourd'hui. Il aurait eu mission de détruire les sites sol-air adverses dans un scénario de conflit en centre-Europe. Le projet trouve appui dans les leçons du Vietnam et de la guerre du Kippour en 1973. C'est aussi l'année du choc pétrolier. Malgré la menace du Pacte de Varsovie, les dépenses militaires sont regardées de près. Il devient impossible d'empiler plus encore les lignes budgétaires. Déjà, s'agissant de l'arme aérienne, les ambitions sont revues à la baisse : l'Elysée repousse le Mirage 4000 et Londres ne remplace plus ses bombardiers lourds, tout en renonçant aux grands porte-avions. Dans le pire des scénarios, la dissuasion



Le démonstrateur de drone de combat X-47 de Northrop Grumman prêt au catapultage. (Northrop Grumman)

nucléaire reste encore la meilleure défense. Très en avance sur son temps, ce système, malgré des résultats prometteurs, est écarté. La mission de Suppression of Enemy Air Defense restera donc dévolue aux Phantom Wild Weasel avec missiles Shrike. Le 2 août 1990, Saddam Hussein envahit le Koweït. Alors que le mur de Berlin est tombé, cette guerre inattendue va servir de catalyseur à une nouvelle révolution militaire, celle du champ de bataille du numérique. Les ingrédients sont là : informatique de commandement, transmissions, électronique bien sûr, espace, GPS, et armes de précision. Les armées de Saddam Hussein en font les frais. L'US Air Force déploie des dizaines de BQM-74C Chukar, des drones de leurrage pour couvrir les premières vagues de F-117.

MALE armés : révolution dans la reconnaissance et l'attaque

Le répit est de courte durée. Les Balkans deviennent le théâtre d'une guerre de sécession sanglante entre les Etats de la fédération yougoslave. Les Européens en appellent aux Etats-Unis. Si tous refusent une nouvelle guerre sur le continent, Washington veut mesurer son engagement, et surtout ne subir aucune perte dans une guerre lointaine. Un industriel de Californie a peut-être la solution. Il s'appelle General Atomics. Son produit, le Gnat 750, déjà testé par la CIA, s'illustre dès 1992 au-dessus de la Bosnie. L'engin est perfectionné. Il sait recevoir une liaison satellite. Le RQ-1 Predator est né. Il va s'imposer dans les conflits régionaux pour un quart de siècle. L'heure est encore aux expérimentations : les premiers Predator dans deux, puis trois escadrons sur une base très discrète du Nevada, le terrain auxiliaire d'Indian Springs. A 65 kilomètres au nord de Las Vegas, le site devient le laboratoire d'un nouvel art opérationnel. L'Histoire retient que le terrain avait été utilisé dans les années 1950 par des formations de QF-80, une version télé-pilotée du T-33 pour les mesures des radioéléments générés par les essais nucléaires du Nevada Test Site. Durant la guerre du Kosovo de 1999, les Predator se sont avérés particulièrement précieux dans la recherche de cibles pour les avions de l'Otan. Là encore, l'US Air Force écrit une nouvelle page de l'histoire de la guerre aérienne. Le 16 février 2001 reste une date oubliée. Et pourtant ! Ce jour-là, dans le ciel de Nellis, un Predator



Le démonstrateur Neuron, développé sous la maîtrise d'œuvre de Dassault Aviation, est aussi un exemple de réussite de coopération européenne, dès lors que la conception est placée sous la maîtrise d'œuvre unique d'un bureau d'études apte à fédérer les compétences. (Dassault Aviation / G. Gosset)

réussit le premier tir expérimental d'un missile Hellfire. General Atomics peut faire évoluer le Predator. Extension homothétique en taille et en performances du Predator, le nouvel aéronef, dévoilé en 2001, prend le nom de RQ-9 Reaper. Turbopropulsé, il est cinq fois plus imposant. Jaugeant cinq tonnes, il est suffisamment puissant pour deux bombes Paveway de 125 kg. Le 20 juin 2005, autre changement d'échelle, Indian Springs délaisse son statut de terrain auxiliaire de Nellis pour devenir Creech Air Force Base. Dans la foulée, les bases d'Holloman, d'Eglin et de Cannon accueilleront leurs escadrons de Predator et de Reaper. Etrangement, de ce côté de l'Atlantique, par choix politique, les Européens refusent de rejoindre cette nouvelle course aux armements. Il leur faut un quart de siècle

pour réagir, s'agissant d'un drone MALE. Plus encore (35 ans), si l'on prend comme point de départ les premiers vols de Gnat-750 dans les Balkans, puis ceux conduits dans le cadre de l'opération Allied Force de l'Otan. Le drone MALE armé européen est à ce jour prévu pour 2025. En Chine, on a observé tout cela de très près, jusqu'à proposer le drone MALE Wing Loon. Développé par AVIC, l'engin, vu au Bourget en 2017, présente étrangement la même silhouette que le Reaper et peut emporter une large gamme d'armement air-sol. Son succès à l'export est confirmé, au Moyen-Orient notamment.

L'UCAV : l'autre avenir de l'aviation de combat

Le choc remonte à novembre



1994. En cette fin d'automne, les centres de doctrine, les attachés de défense et les journalistes spécialisés reçoivent un surprenant document. Son titre : *New World Vista*. Il est signé du Scientific Advisory Board, le think tank de l'US Air Force. Ce document prospectif imagine la guerre à l'horizon 2030. Le ciel sera dominé par des engins offensifs, avatars de F-117 sans équipage, conçus pour traverser ou détruire des dispositifs anti-aériens sophistiqués en territoires hostiles. Bref, les dividendes de la paix sont remis à plus tard, et l'avenir pourrait bien voir le retour d'affrontements interétatiques. Leur armement est composé de munitions de précision ou d'armes à énergie dirigée. Ce travail d'anticipation exploite intensément le « digital battlefield », la furtivité, et les armes de précision. L'idée

semble s'inspirer de l'HIMAT de Rockwell et de la Nasa, un avion expérimental à haute manœuvrabilité testé dans le ciel d'Edwards entre 1979 et 1983. *New World Vista* déclenche d'importants budgets qui irriguent les bureaux d'études chez Lockheed, Boeing et Northrop Grumman.

Ce dernier emporte une première manche avec le X-47 Pegasus. L'engin est testé sur le porte-avions *USS George Bush* en 2013. Le 10 avril 2014, il effectue un vol de nuit. Son autonomie est importante : 4 000 km. Northrop Grumman a trois atouts. Fournisseur historique de l'aviation embarquée de la Navy, la firme a racheté Teledyne et a reçu la maîtrise d'œuvre du *Global Hawk*, le drone de reconnaissance intercontinental.

Dassault réagit. En 2004, dans un contexte budgétaire contraint, sa di-

rection est à l'initiative du projet Neuron. Les travaux s'appuient sur le *Petit Duc*, un démonstrateur de taille modeste qui souligne le potentiel de son bureau d'études dans ce domaine nouveau. La DGA confie à la firme de Saint-Cloud la maîtrise d'œuvre du projet en février 2006 et lui accorde 400 millions d'euros. Dassault est architecte d'ensemble, fédérant le Suédois Saab qui participe à la conception, Alénia qui s'investit sur le système d'armes, et, en Suisse, Ruag qui intervient pour la soufflerie et les supports d'armement. La France fournit aussi un moteur Snecma et le train Messier et une liaison de données Thales. En Espagne, Airbus construit la station sol et les ailes. Le Neuron effectue un premier vol le 1^{er} décembre 2012. Le 12 avril 2014, dans le ciel de Méditerranée, le Neuron



Vue d'artiste du projet Airbus Zephyr S, un drone géant. Sa propulsion solaire lui permettra de rester plusieurs mois dans la stratosphère pour des missions de renseignements ou de télécommunications. Un démonstrateur a réussi à tenir en l'air 25 jours entre juillet et août 2018. (Airbus)

vole en formation entre un Falcon 7X et un Rafale. La parité technologique est démontrée et préfigure le futur SCAF (Système de combat aérien futur) inscrit dans la loi de programmation militaire française 2019-2025.

Dans son livre « Histoire de drones », Oceane Zubeldia dresse un bilan contrasté. Selon la New American Foundation citée dans son ouvrage, les frappes de drones auraient causé la perte de 1667 à 2614 personnes, dont 20% de civils. A l'inverse,

d'autres études montrent que les drones auraient permis de réduire les dommages collatéraux de moitié.

MALE armés et UCAV : l'univers en expansion des robots de combat

Les Reaper armés ont été employés en Libye en 2011, notamment pour frapper des missiles sol-air SA-8. En 2014, ils représentent déjà

aux Etats-Unis une force de plus de 250 appareils, 300 Reaper étant commandés ! L'avenir de l'UCAV est lui aussi fixé. Il apportera un surcroît de puissance de feu dans un scénario d'ouverture d'itinéraires, par un usage d'armes de précision air-sol tirés en appui des avions pilotés. Si le MALE armé opère en contexte de guérilla, l'UCAV est l'arme nouvelle conçue pour les conflits symétriques inter-étatiques. On peut l'imaginer comme l'instrument d'une entrée en premier



Salon du Bourget 2015 : l'industriel chinois AVIC s'est très largement inspiré des drones américains Predator et Reaper pour développer le drone armé Wing Loon. (P. Wodka-Gallien)



Vue d'artiste du futur drone de ravitaillement Stingray destiné aux porte-avions de l'US Navy. Le Pentagone a accordé à Boeing une première enveloppe de 805 millions de dollars pour le développement de quatre prototypes. (Boeing)

sur un théâtre dès lors que la supériorité aérienne n'est pas assurée. L'éventail des missions est étendu au ravitaillement en vol, orientation confirmée le 30 août 2018 par le choix du MQ-25 Stingray de Boeing comme futur drone de ravitaillement en vol de l'aviation sur porte-avions. Catapulté comme un chasseur embarqué, il emporte une perche de ravitaillement en vol et des bidons sous voilure, son avionique reposant largement sur l'intelligence artificielle pour toutes les opérations de ravitaillement. Un contrat de développement de 805 millions de dollars a été signé. Quatre prototypes du Stingray sont attendus pour août 2024. Anticipant sur un combat entre robots aériens, la DARPA, l'agence de recherche du Pentagone, vient de financer un projet de système à énergie dirigée pour drones. Dans la foulée, les Russes, les Chinois, les Britanniques et les Français (dans l'espoir d'entraîner les Européens) sont mobilisés sur des projets UCAV. Au salon MAKS de Moscou de 2007, MiG dévoile le Skat (raie en russe). Shenyang Aircraft Design Institute, du groupe d'Etat chinois AVIC, s'affiche avec le Sharp Sword 601-S qui effectue son premier vol le 20 novembre 2013. BAE Systems est présent avec le démonstrateur Taranis.

Percer le brouillard des guerres futures

Que dire en 2019 ? MALE armés et UCAV se distinguent bien du missile au sens où ils ne font pas impact sur une cible. La synthèse entre les deux objets a pris la forme de drones rôdeurs, ou « Loitering amunitions ».

Dans une configuration très tactique, ce sont des engins lents et persistants sur une zone d'action. Ces engins létaux sont dotés d'une télémétrie plaçant l'homme dans la boucle de décision d'engagement, d'une optronique évoluée et d'une charge explosive. Dès la détection de la cible, sur ordre de l'opérateur, ils se transforment en missile par impact direct. Les Israéliens, pionniers des drones de surveillance depuis les années 1970, ont beaucoup investi sur ces systèmes. Cette troisième arme trouvera sa place dans un combat lacunaire en milieu urbain comme en terrain libre. L'US Army, pour sa part, imagine des drones rôdeurs légers pour en équiper des véhicules blindés d'infanterie, pour l'éclairage rapproché et l'ouverture d'itinéraires. Le drone de combat futur ne se résumera pas, dans les décennies prochaines, à des géants du ciel télépilotés, armés de missiles tactiques. Les innovations sont tous azimuts et les combinatoires sont infinies. L'exercice d'anticipation nous invite donc à imaginer une guerre future faite aussi de nano et de mini-drones. Exploitant le potentiel de l'intelligence artificielle, ils seront aptes à se regrouper en essaims pour frapper leurs cibles, véhicules ou personnels. Du très petit aux géants du ciel : des drones à propulsion solaire resteront plusieurs semaines, voire des années, en vol évoluant à très haute altitude (au-delà de 20 000 m) comme de pseudo-satellites. Ce futur se prépare dès aujourd'hui chez Airbus, à la NASA et à la DARPA. Développé par Airbus, le démonstrateur Zephyr S a déjà volé cette année en tenant 25 jours en l'air. Les drones sont désormais un univers en expan-

sion dans tous les champs des possibles et des configurations. Vecteurs de supériorité technologique, les drones, en leur qualité de robot aérien, toutes catégories confondues, portent une forte charge psychologique, ce qui n'est pas le moindre de leurs atouts. ■

Pour en savoir plus

- Smart Weapons

Top secret history of remote controlled airborne weapons. Hugh Mc Daid and David Oliver. Barns & Noble books. 1997.

- La Guerre à ciel ouvert

Valéry Rousset. Edition Addim. 1995 (à consulter notamment pour l'emploi des drones de leurrage durant la première guerre du Golfe).

- Les Interstate TRD

Alain Pelletier. Le Fanatique de l'aviation. N° 286. Septembre 1993.

- Dans le nid des Predator

Philippe Wodka-Gallien. Air Zone Magazine n°32. Mars-avril 2001.

- Drones

Acteur incontournable de notre avenir ? Jean-Christophe Damaisin d'Arès. Collection Stratégie & Défense. Editions L'esprit du livre.

- Drones de combat

L'Europe cherche sa voie. Guillaume Steuer. Air & Cosmos N° 2329. 5 octobre 2012.

- Histoire de drones

Oceane Zubeldia. Editions Perrin. 2012.

- Le Neuron, une coopération européenne fructueuse

Le Journal de l'aviation. 20 décembre 2012.

- Drones

L'aviation de demain ? Michel Polacco. Editions Privat. 2016.

Guerre électronique l'atout de la technologie



Qui sera « maître des ondes » sera maître du monde ! Espionnage, préparation des conflits, protection des avions en opération, la guerre électronique est partout dans l'aéronautique aérienne moderne.

Par Philippe Wodka-Gallien

au XXI^e siècle



Le EA-18G Growler de l'US Navy est armé d'une panoplie complète de guerre électronique offensive comprenant des brouilleurs en nacelles AN/ALQ-99 et des missiles antiradar AGM-88 Harm sous les ailes. (Us Navy)



Le CR-135 Rivet Joint est l'instrument majeur de collecte de renseignements d'origine électromagnétique de l'US Air Force. La flotte comprend une douzaine d'appareils Sigint de ce type ; elle est basée à Offutt Air Force Base dans le Nebraska. (Usaf)

En 1914, la tour Eiffel écoute le trafic radio allemand. Début septembre, elle repère, avec l'aviation, l'évolution de la manœuvre ennemie. La contre-attaque de la Marne peut être lancée. Le 7 janvier 1987, l'armée de l'Air française monte un raid complexe pour neutraliser le radar Flat Face de la base de Ouadi-Doum tenue par les forces libyennes de Khadafi (déjà) au nord du Tchad. La mission,

confiée aux Jaguar du 3/3 Ardennes, se conclut par le tir réussi d'un missile antiradar AS-37 Martel. Dans la nuit du 17 au 18 septembre 2018, un Iliouchine Il-20 de renseignement russe est frappé par un missile au large de la Syrie. Entre ces trois événements, un point commun : la guerre électronique, ou « GE ». Elle se définit comme la conquête, puis la maîtrise du spectre électromagnétique en vue de l'obtention

d'un avantage militaire sur l'adversaire, tout en lui interdisant son usage. Surfant sur les ondes qui traversent l'atmosphère, la GE se distingue donc de la guerre informatique, en termes d'objectifs comme de technologie. Apparu au début du siècle dernier, ce nouvel espace de lutte accompagne l'émergence des technologies radioélectriques : la Télégraphie Sans Fil en 1896, puis le radar dès 1935. Elle s'étend plus encore dans

B-17 de brouillage de la Royal Air Force. Durant la Seconde Guerre mondiale, il appuyait les raids de bombardement alliés en brouillant les radars de la DCA allemande. (Royal Air Force)





Douglas EA-3B de l'US Navy. Destiné aux missions de renseignements au profit de l'aviation embarquée, il intervenait en particulier dans la surveillance de l'activité radio-électronique au large de la Chine ou de l'Europe du Sud. (Us Navy)

les années 1960 dans le spectre infrarouge et ultraviolet. Au XXI^e siècle, ce schéma reste toujours valable. Le renseignement électronique est orienté sur les groupes armés terroristes, mais aussi sur les forces armées d'Etats constitués. Le retour des tensions inter-étatiques observées au cours de l'actuelle décennie donne désormais plus de légitimité encore à ces dispositifs. Pour l'Otan, la crise ukrainienne, ou la guerre persistante

en Syrie encouragent les programmes de guerre électronique. Dans le cas français, la motivation en matière de GE est stimulée par la guerre dans la bande sahélo-saharienne. En recherche constante de supériorité technologique, la GE profite des derniers perfectionnements, pas tant du côté des plates-formes que du côté des instruments électroniques, les processeurs gagnant en puissance.

La guerre électronique : une guerre de l'information

La GE comprend trois champs d'intervention : le renseignement à partir de l'écoute des émissions radio et radar adverses, l'autoprotection électronique des plates-formes de combat face aux menaces, pour l'essentiel les missiles guidés. On y ajoute des actions offensives : le brouillage et la destruction physique des défenses anti-aériennes adverses. Chacun de ces champs nécessite des systèmes d'armes spécifiques.

Le premier champ est celui des aéronefs de renseignement. Les experts distinguent l'Élint (Electronique Intelligence), qui vise les émissions radars, et le Comint (Communication Intelligence), qui s'oriente sur les télécommunications.

Les deux assemblés forment le « Sigint », ou Signal Intelligence, que les Français traduisent par ROEM, pour Renseignement d'origine élec-

tromagnétique. Aux côtés de l'Allemagne, des États-Unis, du Royaume-Uni et de la Russie, la France est un pays pionnier de cette discipline nouvelle. On se plaira à rappeler que, peu avant la Seconde Guerre mondiale, Maurice Deloraine et Henri Busignies conçoivent un radiogoniomètre révolutionnaire qui permet une localisation instantanée des U-Boots trahis par l'usage de leur radio. Suite à la défaite de 1940, ils se réfugient aux États-Unis avec les plans de leur invention.

Adopté par l'US Navy, l'équipement est embarqué sur les navires alliés, notamment les porte-avions d'escorte. Il aura un rôle déterminant dans la chasse aux sous-marins de l'amiral Dönitz durant la bataille de l'Atlantique. La RAF britannique est pionnière en la matière. Elle met en place une unité spécialisée : le Bomber support group 100. Avec mission d'escorter les raids de bombardiers sur l'Allemagne.

Ses Handley Page Halifax ou B-17 embarquent des brouilleurs afin de rendre inopérants les radars Freya et Würzburg. Il y eut aussi des Mosquitos dotés de détecteurs, dont la mission était de neutraliser la chasse de nuit allemande. Le groupe comptera jusqu'à 260 appareils.

Cet épisode souligne que les champs d'action de la GE évoluent peu. Simplement, les missiles ont suppléé les Messerschmitt, alors que déjà le radar est en passe de remplacer les yeux du pilote.



EP-3 Aries d'écoute électronique de l'US Navy. En septembre 2000, l'un de ces appareils fut intercepté par la chasse chinoise alors qu'il évoluait dans l'espace aérien international, l'obligeant à atterrir sur l'île de Hainan. (Us Navy)



L'Iliouchine 20 est l'équivalent russe de l'EP-3 Aries. (DR)



Pod de brouillage d'autoprotection Barax NG sous l'aile du Mirage IV. C'est dans cette configuration que le Mirage IVP fut utilisé au-dessus de l'Irak en 2003 en appui des inspections de l'ONU. (P. Wodka-Gallien)

Une guerre du renseignement

La culture guerre électronique est l'apanage des grandes nations technologiques qui ont bâti une politique de défense souveraine. Outre les membres permanents du conseil de sécurité de l'ONU, on s'accorde à ajouter Israël qui se forge une spécialité en la matière suite à la guerre du Kippour. Quant à l'Allemagne, elle entretient une longue tradition dans le monde électronique et celui des télécoms. La France dispose pour sa part d'une forte culture guerre électronique, la discipline ayant accompagné la constitution de la force de frappe. Fondant une activité nouvelle, derrière des sociétés comme Thomson ou Electronique Serge Dassault, la France revendique son excellence dans cette nouvelle course à la technologie, où les Etats-Unis font office de superpuissance. Pour les aviateurs et les marins, la guerre électronique est à même d'assurer la crédibilité des vecteurs porteurs d'armes nucléaires. Cette discipline permet ainsi à un vecteur qui en est doté de déjouer les défenses adverses et de délivrer son arme sur la cible à coup sûr. Cet espace de bataille est un enjeu tel – la survie d'un vecteur nucléaire en zone hostile – qu'il inspire son titre au livre du général Jean-Paul Siffre paru en 2003. Celui qui sera « *Maître des ondes* » sera le « *maître du monde* ». Le renseignement d'origine électromagnétique reçoit alors une double

Un bombardier russe Tu-95 intercepté par un F-4D Phantom II de l'Otan au temps de la guerre froide. La recherche de renseignement électronique est étroitement associée aux mesures de protection et de dissuasions. (Usaf)



mission : anticiper une agression et connaître les performances des systèmes de défense adverses de manière à élaborer les solutions de protection.

La GE est à cet égard un héritage de la guerre froide qui a traversé les débris du mur de Berlin. Les forces aériennes se sont dotées d'importantes flottes d'appareils spécialisés. L'US Air Force domine le ciel avec les RC-135 Rivet Joint, la Navy mettant en ligne des EP-3 Aries basés à terre. L'US Army dispose de sa propre flotte, les RC-12 Guardrail. Ces flottes sont renouvelées et modernisées : cette année, les forces spéciales américaines ont pris en main un nouvel appareil, un Havilland Canada Dash 8 intégrant en soute une charge de renseignements. Opérant en mode automatique, ces systèmes de recueil sont également intégrés à des drones, en particulier les Global Hawk. En France, l'armée de l'Air tient à conserver des moyens à la mesure des objectifs de défense. Elle reçoit dans les années 1970 l'avion DC-8 Sarigue qui vient compléter les avions Gabriel (sur Noratlas, puis Transall) de la Force aérienne tactique. L'aviation française introduit une originalité avec la nacelle ASTAC (Analyseur de signaux tactiques) qui est montée sous les Mirage F1CR de Reims, leur électronique étant dérivée directement des systèmes intégrés aux Gabriel. La mission est assurée aussi par des satellites : ce sera la vocation de Xerxes, offrant de la sorte une couverture mondiale. La Marine met en

œuvre le bâtiment Dupuy-De-Lôme. Ce renseignement remplit deux objectifs : suivre l'activité militaire adverse et connaître les performances électroniques des systèmes d'armes à affronter, ceci en vue de développer les contre-mesures adaptées. Le champ de bataille électronique opère donc dès le temps de paix. Visant les signaux électroniques, il est enrichi par du renseignement sur les signatures infrarouges et sur les télémétries (liaison entre missiles et stations de contrôle). Le recueil fait donc l'objet d'un traitement en temps réel ou au retour des missions. Il implique une coopération étroite avec les indus-

triels spécialisés. la mission d'organisation et de coordination de cet effort ayant été confiée à la DGA au ministère de la Défense. La DGA s'appuie notamment sur le Centre d'Électronique de l'Armement à Rennes, désormais « DGA Maîtrise de l'Information ». Pour l'avenir, en opérations, l'action des forces de GE s'inscrit dans un cycle « observation, orientation, décision, action » à un rythme soutenu. Le processus, piloté par des états-majors interarmées ou interalliés, pourra profiter d'une connectivité accrue entre les différents pions déployés sur un théâtre d'opérations. C'est tout le sens de



Mirage F1CR de l'armée de l'Air porteur d'une nacelle Elint ASTAC (Analyseur de signaux tactiques). (P. Wodka-Gallien)



Le C160 Transall Gabriel (deux ont été produits à la fin des années 1980 sur la base du Transall NG) constitue l'ossature des moyens SIGINT aéroportés de l'armée de l'Air française.



Tir d'un missile antiradar AS-37 Martel à partir d'un Jaguar. (CEV)



L'US Navy avait déployé des EA-6B Prowler durant Red Flag 4-08, une session qui a également impliqué des Rafale de l'escadron 1/7 Provence. Leur présence souligne l'importance de l'entraînement des équipages au combat électronique. (P. Wodka-Gallien)

la fonction relais que l'on retrouve sur les avions de commandement.

L'autre vocation de la GE : l'autoprotection face aux missiles

Les conflits modernes ont servi de catalyseur à une technologie qui s'est installée dans les forces armées modernes, sur tous ses champs d'action. La vitesse ou l'altitude ne sont pas suffisantes face aux missiles. La destruction de l'avion U-2 en 1959, au-dessus de l'URSS, et les pertes subies au Vietnam et durant la guerre du Kippour par missiles sol-air (SA-2, SA-3, SA-6) imposent une solution. En centre-Europe, les Soviétiques ont ajouté des missiles SA-4 et SA-5. L'aviation militaire se tourne donc vers la GE pour restaurer sa crédibilité. Sur un avion d'arme, il faut quatre éléments : un détecteur de menace (électromagnétique, infrarouge, laser), des contre-mesures sous forme de leurres et de brouilleurs, une fonction de calcul pour faire le tri entre les signaux détectés et, enfin, une information de l'équipage. Les dernières générations d'avions américains et russes (F-22, F-35, Sukhoï-57) ont de ce point de vue rejoint le concept français de systèmes intégrés entièrement à la cellule, délaissant les nacelles. L'électronique vient ainsi compléter l'apport des architectures furtives des cellules. Cette solution élégante prend le relais des pods de brouillage historiques que furent les AN/ALQ-131 et autres AN/ALQ-184.

L'intégration poussée fut le choix fixé pour le Mirage 2000, puis le Rafale, ou encore l'Eurofighter. Le Mirage 2000 intègre un détecteur d'alerte Serval, un détecteur de départ de missiles, un brouilleur Sabre ou Caméléon, des lance-leurres (sur les Mirage 2000D, on les remarque de part et d'autre du moteur et sur le fuselage). Le Rafale reçoit Spectra, le « Système de protection et d'évitement des conduites de tir pour avion Rafale ». Les lance-leurres électromagnétiques plaqués sur les fuselages peuvent être enrichis de leurres tractés (comme sur le B-1 et le F-16), voire de leurres actifs largués. Les solutions ont été complétées de brouilleurs directs : des tourelles orientant un brouillage infra-rouge ou laser en direction du missile assaillant. Désignés Dircm (Direct infrared counter measures), ces systèmes ont trouvé leur place sur les avions de transport, typiquement le C-17. On les retrouve sur les hélicoptères de combat AH-64 Apache. Au sujet des performances de ces équipements, la communication s'arrête là. L'escorte peut faire appel à des brouilleurs offensifs. Ce fut la vocation des nacelles AN/ALQ-99 sous les voilures des EA-6B Prowler, jusqu'à leur remplacement récent par des EA-18G Growler. Le brouillage s'accompagne de missiles dédiés, les engins AGM-45 Shrike développés pendant la guerre du Vietnam, laissant la place aux AGM-88 Harm et AARGM (advanced Anti-radiation Guided Missiles). En France, l'AS-37 Martel des Jaguar n'a pas eu de successeur direct, l'aviation de combat



Un ATL2 de la Marine Nationale. On distingue en bout d'aile les pods de soutien électronique. En enrichissant la connaissance de la situation tactique, la GE permet d'orienter la conduite de la mission. (Marine Nationale)



L'hélicoptère de combat Tigre de l'ALAT dispose d'un ensemble d'autoprotection très complet et totalement intégré. On distingue, sur la pointe avant, les antennes du détecteur de radar et les capteurs infrarouges destinés à repérer le tir d'un missile. (P. Wodka-Gallien)





Le nouvel appareil de renseignement multi-capteur américain RO-6A. Sa conception répond aux derniers besoins de lutte anti-terroriste dans les scénarios de combat lacunaire. (DR)



Le EA-18G Growler est un élément essentiel de crédibilité de la puissance militaire des Etats-Unis. (US Navy)

recourant maintenant au missile modulaire Hammer lancé sur coordonnées, guidage infrarouge ou laser.

Au regard de l'impératif de crédibilité de la force de frappe, des équipements d'autoprotection sont développés pour le Mirage IV. La France s'était aussi lancée, au cours des années 1970, dans les nacelles de GE offensive en produisant Chipiron montées sur Vautour. Ce savoir-faire fut ensuite repris pour le développement des brouilleurs CT51 sur Mirage IV, puis des nacelles de brouillage d'autoprotection Barax et Barracuda montées sur Jaguar, Mirage F1 et Super-Etendard. Ses performances séduisent les FAS qui les adaptent aux Mirage IVP. Les Forces Aériennes Stratégiques, laboratoire de la GE française, ont en effet essaimé leur métier très pointu au profit de l'ensemble des forces, y compris les escadrilles d'hélicoptères : les Caracal des Forces spéciales, les Tigre et NH90 de l'Avion légère de l'armée de Terre (ALAT). Toutes ces machines sont dotées d'un dispositif intégré d'autoprotection avec détecteurs de menace et lance-leurres bâtis sur le modèle de celui des avions d'armes. L'esprit interarmées est celui qui prédomine au sein de l'EPIGE, l'Escadron de

programmation et d'instruction guerre électronique de Mont-de-Marsan. Le savoir-faire français en GE, développé en toute souveraineté, est clairement un atout dans un marché de l'armement très concurrentiel. Du point de vue de la stratégie aérienne, l'autoprotection guerre électronique des avions d'armes permet au final de restaurer la notion de puissance aérienne mise à mal, un temps, par les missiles sol-air.

Le rapport coût-efficacité en faveur de la guerre électronique

La guerre des Malouines de 1982 nous apporte un enseignement : faute de moyens d'autoprotection, l'aviation argentine n'a pas pu repousser la Royal Navy qui parvient à stopper par missiles les assauts de Skyhawk et de Dagger. Les aviateurs argentins subissent des pertes considérables, même s'ils obtiennent quelques succès. A ce titre, la destruction de l'HMS Sheffield par un missile Exocet tiré d'un Super Etendard génère une réaction vigoureuse de la Royal Navy qui investit massivement dans l'autoprotection de ses bâtiments de com-

bat. La Marine nationale française prend conscience de la menace missiles. Détecteurs d'alerte électromagnétique et infra-rouge couplés à des brouilleurs et des lance-leurres se multiplient. L'investissement peut sembler lourd, mais il est un élément critique de cohérence opérationnelle et de liberté d'action. On prête aux systèmes d'autoprotection de représenter 10% du prix d'un avion d'armes. Aujourd'hui, comme demain, il est inconcevable d'imaginer d'ordonner une opération militaire à une force dépourvue de systèmes de protection électronique performant. Fortement politique, la guerre électronique est aussi une arme de guerre médiatique. Le critère de performance de cette discipline se mesure aussi au regard de l'univers ultra-médiatisé d'aujourd'hui. Dès lors que les intérêts vitaux ne sont pas engagés, la moindre perte d'un avion de combat prendrait d'importantes proportions politiques face à des opinions publiques ultra-sensibles. Il n'est pas question de voir à la télévision un équipage abattu pris en otage après avoir essuyé un tir de missile. Plus encore, le sauvetage d'un équipage imposerait des missions de Combat SAR (Search & Rescue) particulièrement lourdes à monter, avec hélicoptères spécialisés et tout un réseau dense de capteurs et d'avions d'appui pour soutenir l'opération. On le voit, dans la conduite d'un engagement militaire, l'autoprotection est critique. Dans cette course technologique, le Rafale a acquis toute sa crédibilité en affrontant les défenses sol-air de la Libye en 2011. Il en est de même pour les autres appareils de l'Otan. En ce domaine, on ne peut se reposer sur ses lauriers et, comme disait Saint-Exupéry, il faut chaque jour remettre son ouvrage sur la table.

XXI^e siècle : la guerre électronique a commencé

Le contexte de sécurité actuel invite à un durcissement des systèmes de guerre électronique. Les défis sont multiples sur les prochaines années. Le premier, très immédiat, est lancé par le déploiement de dispositifs de missiles sol-air à longue portée et objet de modernisations successives, à l'exemple des S-300 et S-400 conçus en Russie. En second lieu, la GE future doit évoluer dans un spectre électromagnétique de plus en plus encombré, en particulier depuis l'ouverture des fréquences jusque-là réservées aux usages gouvernementaux au monde civil. La GE devra tout aussi bien travailler en zone urbaine qu'en



Le programme Falcon Epicure porte la guerre électronique française au XXI^e siècle. Dotés du meilleur de l'électronique française, trois Falcon Epicure sont prévus par la nouvelle Loi de programmation militaire. (Dassault Aviation)

terrain ouvert, en plaine comme en montagne. Deux évolutions émergent. La première touche au besoin de neutralisation des nouveaux drones agressifs mis en œuvre par des adversaires asymétriques, scénario typique des situations de guérillas anti-terroristes. L'innovation fait appel à des brouilleurs en configuration portable ou véhicule. Dans une optique de neutralisation, des lasers de puissance viendront à court terme se substituer aux mitrailleuses ou aux canons de petit calibre. Un développement est d'ailleurs actuellement financé par QinetiQ, l'agence de recherche du ministère de la Défense britannique. L'autre évolution nous vient de la guerre en Syrie, particulièrement l'opération Hamilton conduite en avril 2018 par les États-Unis, le Royaume-Uni et la France. Elle tient à la grande complexité électromagnétique des zones d'intervention, où forces amies, ennemies et neutres s'entremêlent. Une telle jungle électronique impose en l'espace une identification précise de chacun en vue d'éviter les incidents ami-ami ou ami-neutres, d'autant que les systèmes d'armes gagnent tous en performances... On songe à ce stade au drame de l'Illiouchine II-20 en sep-

tembre 2018 au-dessus de la Méditerranée. L'entraînement donc est plus que jamais sur l'agenda des unités. Il s'appuie sur des centres d'expertise éprouvés : le range de Nellis dans le Nevada pour les exercices Red Flag, ou, plus près de nous, le Polygone de guerre électronique entre Epinal et Ramstein où sont déployés des simulateurs de systèmes sol-air. Le perfectionnement de l'autoprotection profite depuis plus de 30 ans des essais de l'Otan : Mace pour les menaces électromagnétiques et Embow, s'agissant des missiles infrarouges. L'édition Mace XIX, qui s'est tenue en Slovaquie en juillet 2018, a été l'occasion de confronter le Rafale au missile du SA10, le très redouté S300, peut-on lire dans *Air Actualités* d'octobre, le magazine de l'armée de l'Air. L'avenir du renseignement tricolore repose, en partie, sur l'opération CUGE (charge universelle de guerre électronique), qui a pour objet de remplacer les capacités de ROEM à l'arrêt des Transall Gabriel.

Prévu par la Loi de programmation militaire 2018-2025, ce programme, désigné Epicure, reposera sur trois Falcon de Dassault Aviation. Ceux-ci intégreront à leur bord un système de mission électronique

Thales. Suite à une décision du ministre des Armées du 1^{er} mars 2018, ces avions sont prévus pour 2023.

A dessein, la GE conserve une part de secret. Il en va de la survie des équipages et de la réussite des missions confiées aux armées. La culture guerre électronique est bien ancrée dans les forces françaises, armée de l'Air, Marine Nationale, et armée de Terre. Elle pénètre même notre culture populaire. Dans son volet Comint, elle est bien illustrée dans la série télévisée « *Le Bureau des légendes* ». Ce métier est aussi représenté par l'association *Guerrelec*, chapitre français *La Fayette* de l'Association of Old Crows, le réseau international de la GE. La guerre électronique trouvera aussi un territoire de partage plus affirmé peut-être avec la guerre informatique. S'ajoutant à la maîtrise du spectre, celle des réseaux est un des enjeux pris très au sérieux pour la menace que le cyber fait porter à l'intégrité d'un pays. Reflet d'une situation géopolitique tout à la fois trouble et violente, la GE ouvre un domaine en plein essor qui s'inscrit dans une dynamique nouvelle de course à la performance technologique, avec un objectif final : la réussite des opérations et la liberté d'action. ■



Ejection éjection !

L'éjection est un exercice « viril » et indispensable pour qui veut évacuer un avion de combat. Mais, en dépit des progrès considérables réalisés par les fabricants de sièges, ce n'est pas toujours une science exacte. Car le pilote, avec ses forces et ses faiblesses humaines, tient toujours une place centrale dans le processus d'éjection... *Par Frédéric Lert*

« **D**euxième tentative de ral-lumage du moteur... Rien... La vitesse chute doucement, je perds de l'altitude. Je vais entrer dans la couche nuageuse. Dessous, c'est la montagne. Mon ailier crie dans la radio " éjection éjection ! " Plus le temps de réfléchir, de tenter quoi que ce soit. Je tire la poignée. Tout explose autour de moi et je suis instantanément projeté vers le haut et vers l'avant. Pendant une fraction de seconde, je perds

Le Gloster Meteor T3 immatriculé WA638, propriété de Martin Baker et toujours utilisé pour les tests en vol de sièges éjectables. L'avion compte plus de 500 éjections à son actif ! (Martin Baker)



tous mes repères. Ni haut ni bas, ni gauche ni droite. Et puis aussi soudainement qu'elle est arrivée, la tempête se calme. Je n'ai pas eu le temps de réaliser ce qui m'arrivait, je suis déjà sous le parachute, enveloppé par le silence... » Tous les témoignages récents de pilotes éjectés concordent sur un point : le plus dur est de prendre la décision de tirer la poignée. Après, l'espace d'une fraction de seconde, c'est une affaire de violence absolue et d'enchaînement de divers auto-

matismes. Tout allant trop vite pour l'esprit humain, il faut simplement laisser faire la machine en ayant une confiance aveugle dans ses réglages.

L'idée de sauver le pilote d'un avion en perdition n'allait pas de soi dans les premières années de l'aviation militaire. En donnant une bouée de sauvetage aérienne à l'intrépide pilote, n'allait-on pas l'inciter à révéler sa nature profonde : un être humain plus préoccupé par le sauvetage de sa pauvre vie plutôt que par la sau-

vegarde de son avion ? Pendant la Première Guerre mondiale, quand les morts se comptent chaque jour en milliers, qui pourrait s'émouvoir de la perte d'un pilote ? Il faut attendre 1924 pour que l'armée américaine rende le port du parachute obligatoire. Les autres pays emboîtent le pas. A charge pour le pilote de se débrouiller tout seul pour quitter son avion. Mais bientôt, la vitesse augmentant, la force des bras et de la volonté ne suffisent plus. Les ingénieurs se mettent alors en chasse d'un mécanisme permettant l'évacuation rapide d'un avion en perdition.

Un complément indispensable au réacteur

Les premières études portant sur un siège éjectable sont réalisées dès 1939 par la société Heinkel. En 1944, des sièges équipent en série le He162. Les premiers sièges testent différentes méthodes : air comprimé, cartouche de poudre. C'est finalement cette dernière solution, plus puissante, qui l'emporte. Le Dornier Do 335 et le Heinkel He219 seront également équipés de ces premiers sièges rudimentaires. Une soixantaine de pilotes allemands en auraient fait usage pendant la guerre, sans que l'on sache précisément combien survécurent... Avec l'arrivée des premiers avions à réaction, les Britanniques s'intéressent également à la question : Sir James Martin, le « Martin » de « Martin Baker », expérimente un premier siège en janvier 1945. Une première éjection humaine est réalisée le 24 juillet 1946 à partir d'un Meteor 3 volant à 2700 m et 590 km/h. Les Américains se rapprochent des travaux britanniques et réalisent une première éjection aux Etats-Unis quelques semaines plus tard. Terminons ce tour d'horizon rapide avec la France : à l'image de sa recherche sur les avions à réaction, elle part de loin après la Seconde Guerre mondiale ! Et comme tant bien d'autres domaines, elle commence par s'appuyer sur les équipements capturés à l'issue du conflit. La SNCASO crée un département chargé de travailler sur le sujet, en prenant comme base de départ le siège du He162. La première éjection expérimentale a lieu le 3 janvier 1951 : le parachutiste d'essai s'appelle André Allemand et il est éjecté d'un Bloch MB175 modifié. Mais, à la fin des années cinquante, les sièges SNCASO sont abandonnés au profit des créations de la société SEMMB, une co-entreprise fondée en mars 1959 entre Hispano Suiza et Martin Baker (voir encadré).



Doddy Hay, un autre employé de Martin Baker, réalisa les premières éjections 0/0 (vitesse/altitude nulle) sur un siège de la compagnie. (Martin Baker)



Quelques instants avant le tir, Doddy Hay est sanglé sur son siège par ses collègues de Martin Baker. (Martin Baker)

La première génération de sièges est d'un fonctionnement assez... viril. Une seule cartouche est utilisée pour extraire le siège et le pilote et les éloigner de l'avion. Sa puissance est énorme, l'accélération de départ colossale. Les blessures et traumatismes ne sont pas exceptionnels.

« *À l'époque, la rumeur disait qu'il y avait un blessé grave ou un décès sur trois éjections, se souvient Denis Turina (voir encadré). Malgré tout, on nous conseillait toujours avec les avions à aile en flèche de nous éjecter plutôt que d'essayer de nous crasher... À part le Mystère II et son siège SN-CASO qui avait une sale réputation, il n'y avait aucune défiance envers l'utilisation du siège. S'il fallait le faire, eh bien on y allait, sans arrière-pensée. Si on en venait à tirer sur le rideau, c'est que de toutes façons nous n'avions plus le choix... »*

Mettre l'avion en léger cabré...

Les sièges de cette époque fonctionnent en deux temps : sur le Mystère IV, la poignée haute déroule un rideau devant le visage du pilote et déclenche la mise à feu des bouillons explosifs qui libèrent la verrière. En continuant à tirer comme un sourd, le pilote fait partir le siège. « *A ma première éjection, je n'avais pas tiré à fond. J'ai volé quelques instants sans la verrière, en décapotable, avant de me reprendre et de terminer la séquence d'éjection* », raconte Denis Turina. Avec le siège du F-100, deux manœuvres sont nécessaires : dans un premier temps le pilote remonte les accoudoirs pour éjecter la verrière. Ce faisant, il dégage des détentes qu'il doit alors serrer pour faire partir son siège. En basse altitude, la consigne est de mettre l'avion en léger cabré pour grappiller quelques mètres à l'ouverture du parachute. Sur la poignée du parachute, un bouton poussoir actionné par le pilote permet de sélectionner un retard à l'ouverture. Placé sur « 0 seconde » au-dessous de 2000 pieds, le parachute s'ouvre dès la séparation avec le siège, immédiatement après l'éjection. Tout va plus vite mais le risque existe que le siège parte s'emmêler dans les suspentes du parachute. Ce bouton est placé sur « 2 secondes » au-dessus de 2000 pieds, et ce retard automatique à l'ouverture permet d'assurer une séparation franche du pilote et de son siège.

Une deuxième génération de siège introduit un peu de progressivité et réduit d'autant le choc du départ : une première charge pyrotechnique fait sortir le siège, une seconde prend



Le 24 juillet 1946, Bernard Lynch, employé de Martin Baker, se porte volontaire pour un essai en conditions réelles à partir d'un Gloster Meteor 3. Il totalisera à la fin de sa carrière une trentaine d'éjections ! (Martin Baker)

le relais pour l'éloigner de l'avion. Avec cette deuxième génération arrive la capacité 0-120, puis 0-90 et enfin zéro-zéro : il devient possible de s'éjecter à vitesse et/ou hauteur nulle, la puissance du siège autorisant un bon déploiement du parachute. Avec la troisième génération, utilisée dans les avions aujourd'hui en service, les capteurs fleurissent sur le siège tandis que le traitement de l'information débouche sur une séquence raccourcie pour le pilote et le déploiement de son parachute. La sortie de l'avion est moins violente et le domaine d'éjections s'élargit considérablement. Mais d'une génération à l'autre de siège, le pilote reste toujours le même, avec ses doutes et ses certitudes. Et c'est toujours sur lui que repose la prise de décision. S'éjecter ou ne pas s'éjecter, là est la question...

L'éjection, la seule solution

« Le problème de l'éjection se concentre sur les secondes qui précèdent l'action sur la poignée, raconte Denis Turina. L'éventualité d'une éjection est vécue comme une obligation et non comme une solution. C'est une action irréversible qui est ressentie comme un échec : je dois m'éjecter parce que je n'ai pas été capable de résoudre le problème qui m'était posé... Et une fois qu'il tire la poignée, le pilote sait qu'il a perdu. Pour ma deuxième éjection, sur F-100, j'étais très bas. J'avais relevé les accoudoirs et éjecté la verrière et j'avais gardé les mains crispées sur le siège. J'ai dû faire un gros effort de volonté pour les

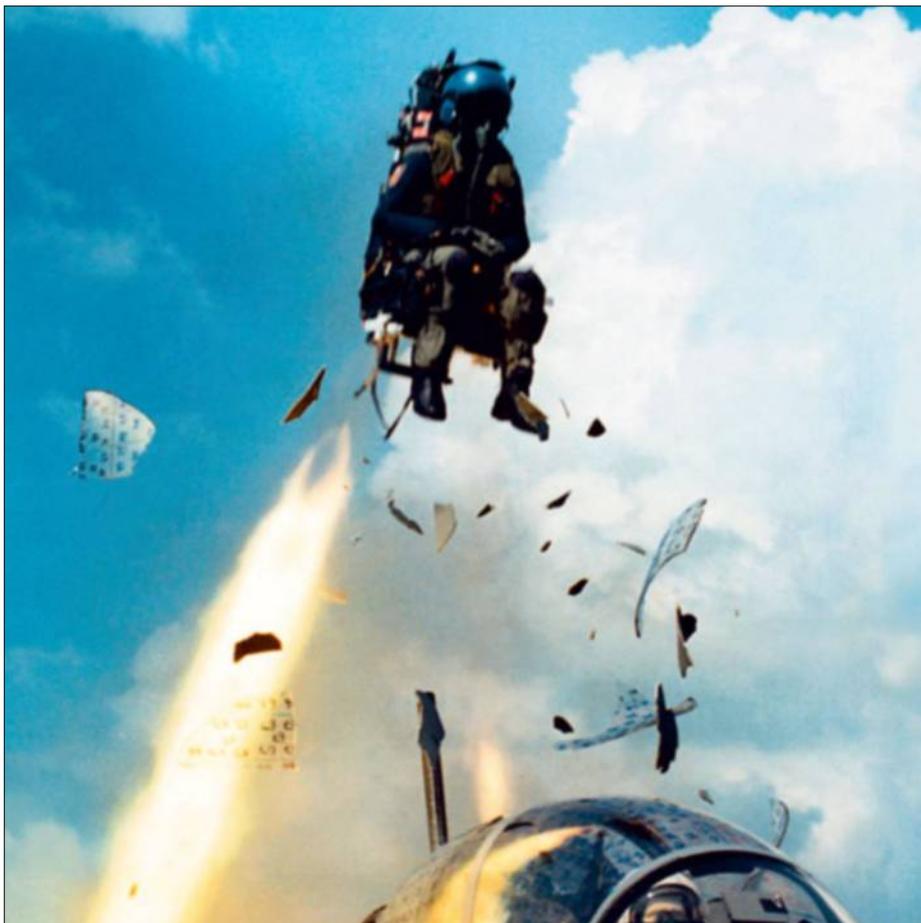
Trois éjections pour un seul homme

Denis Turina est (a priori) l'un des deux seuls pilotes français à s'être éjecté... trois fois ! Une fois sur Mystère IV, deux fois sur F-100. Il a raconté son expérience dans un livre passionnant qui offre un éclairage bien particulier sur l'aviation de chasse de la fin des années soixante. « Un grand choc, un grand bruit, une douleur aiguë dans la colonne... » : la première éjection, sur panne sèche, le 27 mai 1966, se fait dans le calme et sans précipitation. L'auteur remonte en selle très vite. On le retrouve le 5 septembre 1967 sur F-100, dans la région de Cahors. Cette fois-ci c'est le moteur qui lâche. « Le plateau sur lequel j'avais prévu d'écraser mon avion monte dans mon viseur. Je suis trop bas ». La sortie de l'avion se fait en catastrophe, très bas. Mais Denis Turinat a la baraka, il s'en sort une fois de plus indemne. « Le surlendemain, reprise des vols sans état d'âme. » 26 mai 1975, nouvelle explosion du moteur de son F-100. Ejection sur la Forêt-Noire, en Allemagne. Douleur très forte à l'atterrissage, multiples fractures et cette fois-ci, fin de l'aptitude siège et de la vie de chasseur. Un témoignage fort de la part d'un pilote à l'expérience exceptionnelle.





Essai d'éjection d'un mannequin depuis un traîneau reproduisant la pointe avant du fuselage d'un McDonnell Douglas F-4B. (DR)



Une des difficultés dans l'éjection est de franchir l'obstacle de la verrière. Quand celle-ci n'est pas larguée, il faut passer à travers... (DR)

ouvrir et aller chercher les détentes. J'en ai déduit plus tard que deux actions pour s'éjecter, c'était une de trop ! Et c'était beaucoup demander à quelqu'un qui a priori avait déjà été bien chahuté dans les secondes ou les minutes qui précédaient... On s'éjecte comme on se jette à l'eau : il faut que ce soit vite fait. »

Sans perdre une seconde

« Mourez, nous ferons le reste » était le slogan innovant d'une entreprise de pompes funèbres. « *Tirez la poignée et nous ferons le reste* » disent aujourd'hui les fabricants de sièges éjectables. Deux secondes s'écoulent entre le moment où le pilote tire la poignée et celui où il se retrouve sous le parachute, hors de danger. Un tel niveau de performance n'est possible que par une succession d'automatismes. Le temps est également trop court pour éjecter la verrière avant le départ du siège. Il faut donc la fragiliser ou la découper pour libérer le passage.

C'est la tâche confiée à un cordeau d'hexogène (un explosif dont la vitesse de propagation atteint 7 000 m/s) directement collé contre la verrière. Un vrai travail d'orfèvre : il s'agit bien sûr de dégager un passage pour le pilote, mais en évitant de le blesser au



cours de la séquence avec les nombreux éclats. Dans le même temps, le harnais est serré, bloque le buste, et les jambes – et les bras sur les sièges les plus modernes – sont ramenés et plaqués automatiquement contre le siège à l'aide de sangles intégrées dans le siège.

C'est la raison pour laquelle les combinaisons de vol évoluent. Les rappels de jambe sont courants depuis quelques décennies : ils évitent que le pilote soit écartelé ou vienne heurter le tableau de bord pendant l'éjection. Sur des avions les plus modernes, les sièges disposent également de rappels de bras actifs. C'est par exemple le cas du Rafale et du siège Martin Baker MkF16F : le gilet de combat du pilote ou du navigateur est spécifique au Rafale et comporte des accroches pour ces sangles.

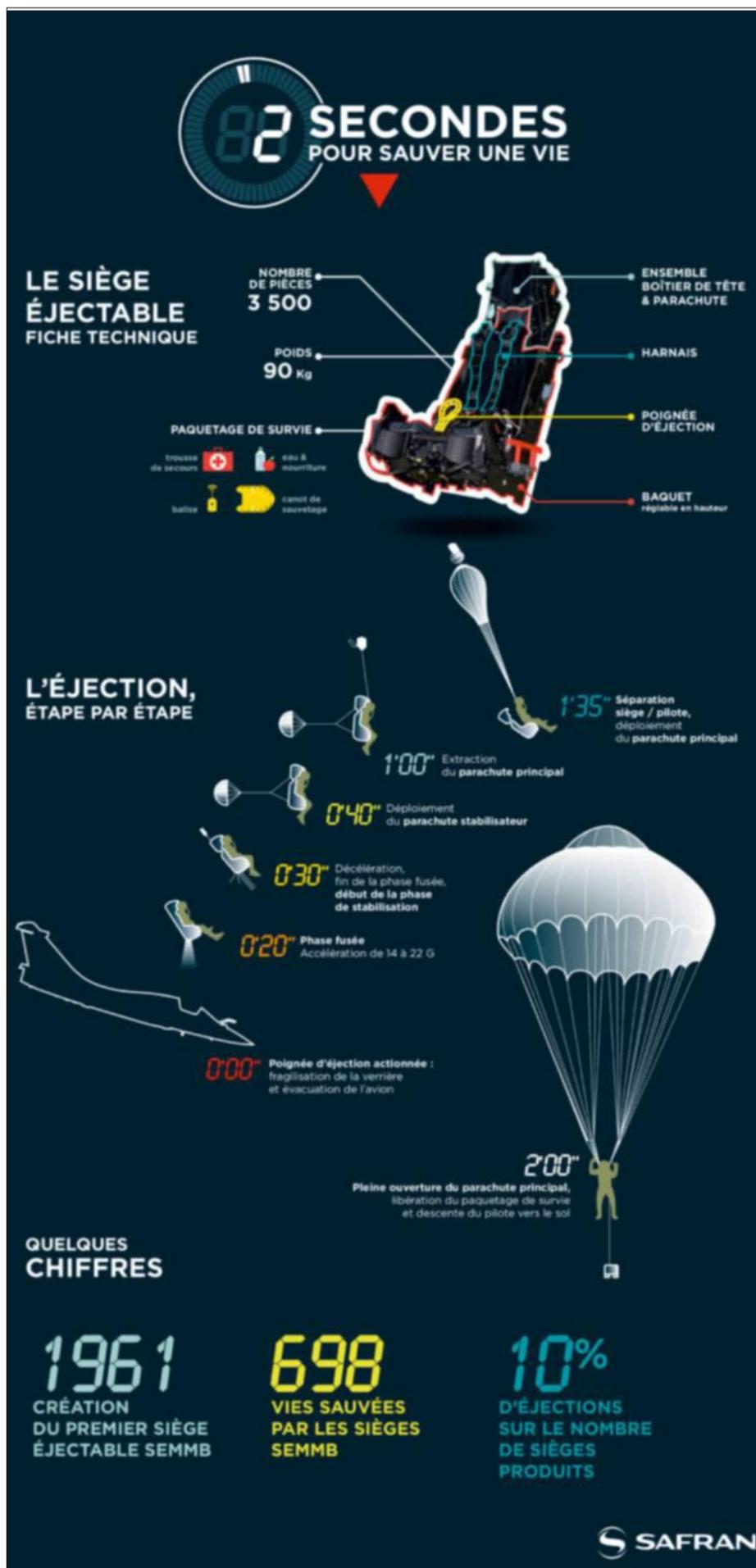
Un dixième de seconde après avoir tiré la poignée, la verrière est partie, le pilote est correctement saucissonné sur son siège qui est poussé le long d'un rail jusqu'à totalement sortir de l'avion. L'accélération pendant ces 0,2 seconde est de 14 à 16 G suivant la masse du pilote. La puissance du moteur fusée étant la même sur tous les sièges et non réglable, plus le navigant sera lourd, moins l'accélération sera forte. Immédiatement après, une fusée de sustentation prend le relais. Sa combustion dure également



L'accident du MiG-29 au salon du Bourget, en 1989, a prouvé toute la valeur des sièges éjectables russes... (Jacques Guillem)



Le siège éjectable MkF16F du Rafale, dont la forte inclinaison permet au pilote de mieux supporter les accélérations. (Frédéric Lert)



0,2 seconde et sa poussée de 2,2 tonnes doit donner assez de temps pour permettre un bon déroulement de l'ensemble de la séquence. Comme sur les avions, deux (pour la redondance) tubes pitot mesurent la pression aérodynamique pour déterminer la vitesse de l'avion ; un barostat donne la pression atmosphérique tandis qu'un capteur d'accélération prépare la suite des événements. Des surfaces aérodynamiques se déploient automatiquement pour stabiliser le siège et si possible le maintenir droit.

Le siège s'adapte seul aux différents cas de figure avec, exemple du Mk16F installé sur le Rafale, une vitesse d'éjection comprise entre 0 et 625 kt et jusqu'à une altitude de 50 000 ft. Pour les éjections en haute altitude, le siège est équipé d'une bouteille fournissant de l'oxygène au pilote.

Sur le Mk16F, cette bouteille sert également d'oxygène secours en cas de panne de l'OBOGS, qui fabrique en temps normal le gaz pour l'équipage. Toujours en haute altitude, les automatismes font également que le pilote reste attaché sur son siège pendant la chute libre. La séparation avec le siège ne se fait qu'à 5 000 ou 6 000 m d'altitude, quand la respiration peut se faire sans bouteille. Et c'est en se séparant que le siège commande l'ouverture du parachute.

Une fiabilité exceptionnelle

Les sièges Zvezda montés sur les avions russes les plus modernes sont plus complexes, avec sans doute un domaine d'éjection plus large. Ils disposent par exemple d'un gyroscope déterminant sa position dans l'espace, et d'un moteur fusée orientable capable de replacer le siège sur une trajectoire ascendante quelle que soit l'attitude de l'avion au moment de l'éjection. Plus complexes, ces sièges sont aussi plus lourds : si un Mk16F de Rafale pèse environ 90 kg, un siège Zvezda équivalent dépasse largement les 100 kg.

Quoi qu'il en soit, les statistiques récentes en matière de vies sauvées sont éloquentes : UTAS revendique par exemple 91,4% d'éjections réussies et 654 vies sauvées avec les sièges ACES II qui équipent la plupart des avions de combat américains. Pour Martin Baker, les chiffres sont encore plus spectaculaires avec 7 580 vies sauvées en près de 70 ans.

On pourrait croire alors la bataille de l'éjection définitivement gagnée, mais il n'en est rien. Les difficultés du développement du F-35 américain ont

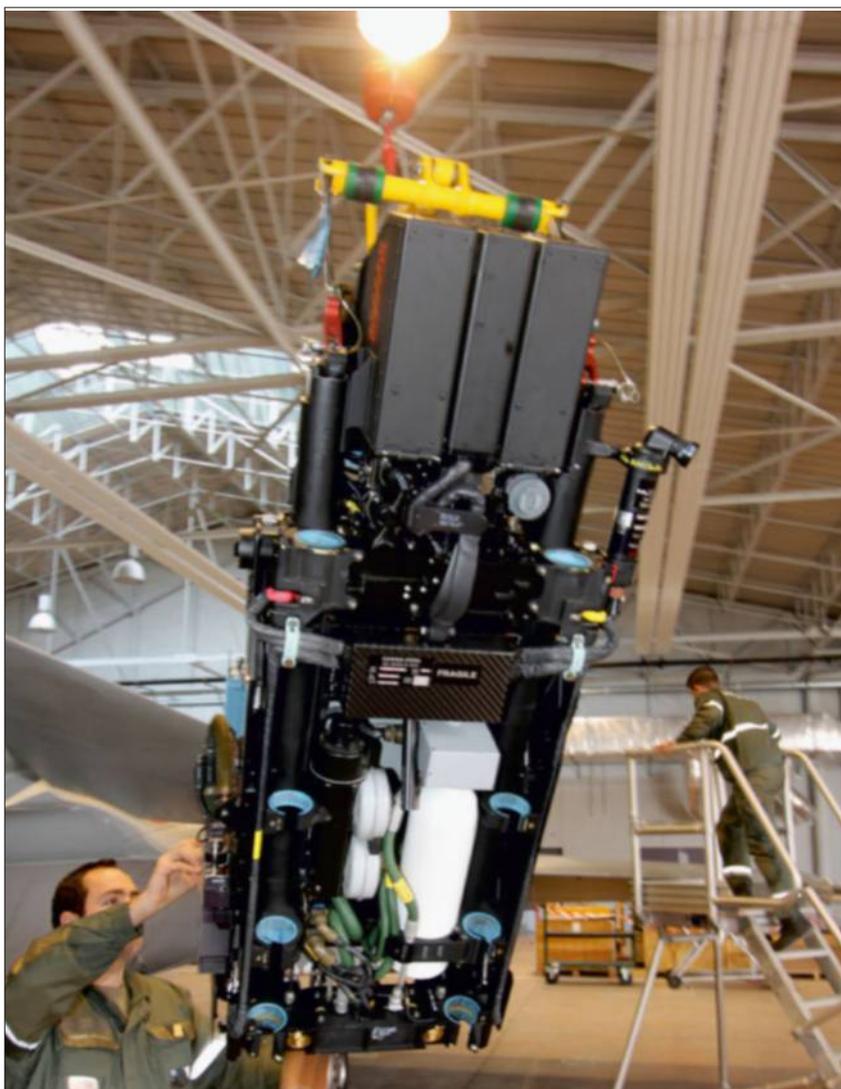
Depuis 1959, la co-entreprise créée par Hispano Suiza et Martin Baker a fourni les sièges de la plupart des avions de combat français, du Mirage III au Rafale. (Safran)

placé sous le projecteur la contrainte posée par la masse et la carrure insuffisantes de certains pilotes (particulièrement des femmes), le tout étant aggravé par l'augmentation de la masse des équipements montés sur les casques : JVN, viseurs de casques et autres dispositifs d'affichage sur la visière. L'augmentation du poids au niveau du casque se traduit par des risques croissants sur les cervicales au moment de l'éjection.

La minceur tue !

Des études menées en 2015 sur le F-35 montrèrent que les pilotes de moins de 74 kg couraient un sérieux danger en cas d'éjection suivant l'altitude de l'avion. Le risque était tel d'ailleurs que, pendant plusieurs mois, les pilotes de moins de 61 kg furent tout simplement interdits de F-35.

Dans les faits, une seule femme fut concernée par cette restriction. Selon les chiffres officiels, le risque d'issue fatale à une éjection en basse altitude était tout simplement de... 98% ! Jusqu'à 74 kg, le risque d'issue fatale restait excessivement élevé, à près de 25%. Après cette alerte, les sièges Martin Baker US16 reçurent de nouvelles protections offrant un meilleur maintien du cou et de la nuque pendant l'éjection, qui résolurent officiellement le problème. ■



Le siège MkF16F du Rafale dévoile ses dessous et toute sa complexité. (Frédéric Lert)

Quand Martin Baker fit équipe avec Hispano Suiza

SMBF (Safran Martin Baker France, anciennement SEM MB pour « Société d'Exploitation des Matériels Martin Baker ») fait aujourd'hui partie de Safran : un groupe de 58 000 personnes, leader dans bien des domaines, du réacteur civil au train d'atterrissage. Mais au sein de ce groupe tentaculaire, SMBF conserve de nombreuses particularités, à commencer par sa création née d'une coopération hors norme avec la société anglaise Martin Baker. Tout commence après la Seconde Guerre mondiale, alors que la tentative de la SNCASO d'adapter un siège allemand aux avions français tourne court. A la même époque, la société Martin Baker cherche un partenaire pour prendre pied sur le sol français. Hispano Suiza, ou plus précisément la Société d'Exploitation des Matériels (SEM) Hispano Suiza, est une recrue de choix puisqu'elle a déjà l'habitude des coopérations franco-britanniques avec les programmes Rolls Royce Tay, Nene et Verdon. Ses moyens industriels sont également adaptés à la production de sièges éjectables. La SEM MB est donc créée en 1959.

La société, qui reste aujourd'hui une filiale à 50/50 entre Safran et Martin Baker Aircraft, a plusieurs fers au feu : elle commercialise les sièges complets, leurs rechanges et les fournitures associées pour la France, elle en assure l'après-vente, le suivi et les expertises techniques, la formation à la maintenance et elle assure également l'assistance aux essais. Last but not the least, la SEM MB participe également au développement de nouveaux produits et à l'amélioration des sièges actuels. La société revendique aujourd'hui la fabrication de plus de 5 750 sièges, des premiers Mk4 du Mirage III au MkF16F du Rafale, avec à la clef plus de 700 vies sauvées.



« L'alliance passée entre Hispano Suiza et Martin Baker il y a soixante ans est toujours solide ». (Ayush Ranka/CAPA pictures/Safran)

Avions furtifs. Plus efficaces et plus discrets



Rendre un avion furtif... C'est un impératif dans la guerre aérienne moderne. Retour sur la recherche de la discrétion.

Par Michel Bénichou

« **L**a mort qui chuchote. » Tel était, selon la Royal Air Force, le surnom donné par les Allemands, pendant la Seconde Guerre mondiale, au Bristol Beaufighter parce que ses moteurs étant peu bruyants. On ne l'entendait pas venir...

Rendre les avions aussi discrets que possible a toujours été la préoccupation des militaires. De nos jours, on parle beaucoup de furtivité. Au début du XX^e siècle, on parlait de camouflage pour dire la même chose.

Néanmoins, avec le perfectionnement des systèmes de détection à grande portée, il est apparu nécessaire d'adopter des méthodes de camouflage radicalement nouvelles.

Avant d'aller plus loin, pinaillons un peu sur les mots : furtif, pas plus que camouflé, n'a jamais signifié invisible. La furtivité au sens où elle est entendue de nos jours est un moyen de se rendre moins visible par les systèmes de détection en usage. Le principal est le radar auquel, dès son apparition, l'adversaire aérien a

cherché à échapper en évoluant sous ses lobes d'émission, ou en brouillant cette émission.

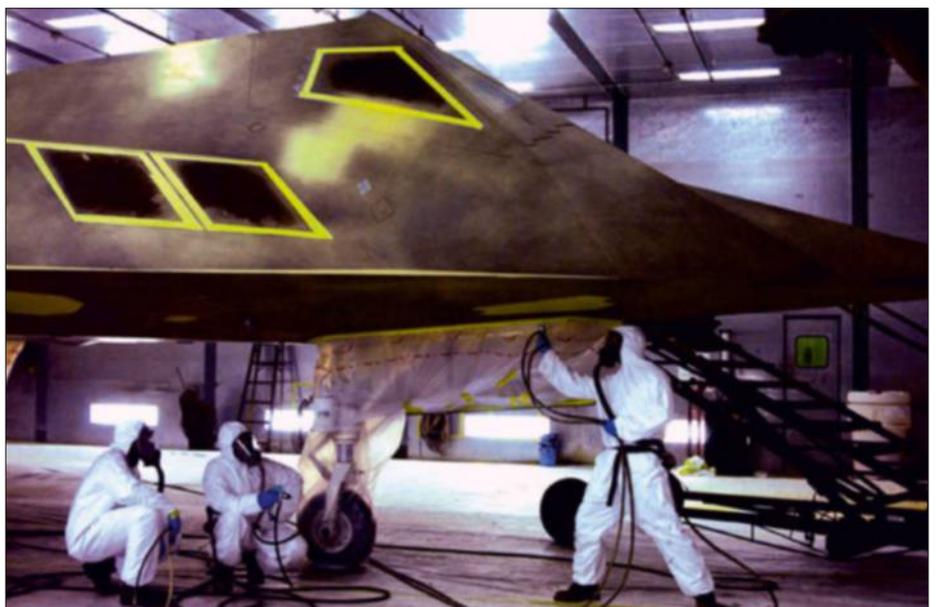
Pour qu'un radar détecte quelque chose, il faut que cette chose renvoie dans sa direction les ondes qu'il émet en écoutant celles qui lui sont retournées ; dans la pratique une petite partie des ondes émises sont renvoyées. L'idée, née, semble-t-il, aux États-Unis au cours des années 1970, est de réduire ce retour au maximum. Une première solution consiste à donner à l'objet susceptible d'être détecté par un radar, des formes qui renvoient les ondes dans plusieurs directions, sauf celle du radar. Un exemple, simpliste peut-être mais très compréhensible, est celui de la boule de billard qui rebondit contre une bande ; si celle-ci est bien perpendiculaire au ti-



Le Lockheed F-117, dont les formes furent étudiées pour le rendre discret face aux radars. Sur la photo ci-dessous, les techniciens apposent le revêtement spécial qui concourait à piéger les ondes des radars. (Usaf)

reur, la boule lui est retournée directement. Si la bande est oblique par rapport au tireur, elle est renvoyée dans une direction qui l'éloigne de lui. C'est ainsi que le premier avion furtif, le Lockheed Martin F-117, fut construit « à facettes », comme un assemblage de surfaces planes inclinées dans des directions différentes, sans former d'angle droit. L'avion offrait une SER, surface équivalente radar, très réduite. Il était aussi visible par un radar que l'aurait été une grosse bille métallique, mais, on le comprend bien, sous certains angles tout particulièrement, ce qui lui imposait de suivre une trajectoire précise calculée selon la position des radars.

C'était une solution extrême impossible à généraliser, mais très riche d'enseignements car, dès lors les





Mettre les charges en soute, comme ici avec le F-35, permet d'assurer la discrétion face aux radars. (Lockheed Martin)

concepteurs d'avions de combat se sont efforcés de travailler dans le menu détail la forme des appareils, en adoptant des lignes plus souples, plus arrondies, par ailleurs favorables à la réduction des traînées aérodynamiques. La moindre aspérité fut dentelée pour éparpiller les ondes ; les manches d'entrée d'air de réacteurs furent dessinées pour que les ondes ne puissent pas pénétrer jusqu'au premier étage du compresseur, etc. Des matériaux et revêtements absorbants furent adoptés, non sans in-

convénient. Par exemple, les composites en matière plastique, moins réfléchissants, peuvent contenir aussi des éléments absorbants.

Les Américains (Lockheed Martin F-22 et F-35) ont choisi d'abandonner les charges externes, en particulier les munitions qui sont désormais contenues dans des soutes ouvertes au moment du tir et aussitôt refermées. Cela suppose des avions plus gros, donc plus lourds et nécessitant plus de puissance. Les Européens ont opté pour des avions plus

légers, « semi-furtifs », plus polyvalents, moins complexes, mais moins visibles au radar que leurs prédécesseurs souvent encore plus petits.

La furtivité a d'autres contraintes. Depuis les origines de la radio, il est assez facile de localiser un émetteur. De même, un avion peut être repéré par ses émissions électromagnétiques. C'est pourquoi ont été créés divers systèmes (dont la Liaison 16 de l'OTAN) permettant la transmission rapide d'informations chiffrées. Les avions de combat peuvent être équi-



Les formes du chasseur F-22 permettent de réduire sa signature radar. (Lockheed Martin)



Le Northrop B-2 est le premier bombardier furtif. (Usaf)

pés de récepteurs pour recevoir les informations tactiques relevées par les systèmes de détection aéroportés comme le Boeing E-3 Sentinelle, sans avoir eux-mêmes à révéler leur présence en utilisant leur radar.

Mais il existe un autre moyen de détection très difficile à contrer : le capteur infrarouge. Nous n'en sommes plus au temps où les missiles air-air à infrarouge confondaient généralement le soleil avec une tuyère, aussi faut-il s'efforcer de limiter la SIR, signature infrarouge, par divers moyens : la dilution de la chaleur d'une tuyère dans de l'air frais ; le masquage de la tuyère, au moins sous certains angles, comme sur le Northrop B-2 dont les tuyères ne sont visibles que par le dessus ; l'usage de tuyères orientables, contestées parce que compliquées et lourdes ; la supercroisière, ou possibilité d'évoluer à vitesse supersonique sans utiliser la réchauffe (post-combustion). Un avion supersonique est bien visible en altitude parce que l'échauffement cinétique du revêtement peut porter certains points de son revêtement à plus de 100°C (plus de 300 pour le SR-71 à M 3) ; c'est une des raisons pour lesquelles on ne cherche plus les hautes vitesses supersoniques. Rendre un avion furtif n'est pas a priori très compliqué de nos jours à la condition que le contribuable soit généreux ; rendre furtif un avion vraiment polyvalent plus convenable aux budgets limités est un exercice plus délicat qui impose des choix. La furtivité aussi est une affaire de compromis. ■



Illustration de l'importance des formes dans la furtivité avec la maquette de chasseur du futur, présentée en octobre 2018 par Dassault. (Fernando Dosreis)

Un avion, combien ça coûte ?





Le prix des avions est une donnée essentielle pour comprendre l'aéronautique aujourd'hui. Lors des grands salons, des sommes faramineuses sont souvent annoncées mais sont peu compréhensibles pour le grand public. Les constructeurs néanmoins communiquent désormais plus facilement leurs prix « catalogue ». En voici quelques exemples indicatifs.

Par Frédéric Marsaly

445,6 millions de dollars.
L'Airbus A380, disponible sur le marché civil, est l'avion le plus cher actuellement. (Airbus)

Avions de ligne

Ce sont des prix catalogue. Il est très rare que les compagnies aériennes achètent leurs appareils à l'unité. En général, lorsqu'il s'agit du développement d'une flotte ou de la succession d'avions d'une génération précédente, les contrats se signent pour des lots significatifs et peuvent comporter d'innombrables options et amendements. Les compagnies et les constructeurs procèdent donc à de complexes négociations. Plus la quantité d'appareils est élevée et plus les prix fondent.

Ces avions neufs ont une carrière, au sein des grandes compagnies, qui tourne autour de 25 ans. Ensuite, le démantèlement les attend ou bien le marché de l'occasion afin d'équiper des compagnies moins puissantes ou d'être convertis à de nouvelles missions comme pour le transport de fret. ■



23 millions de dollars. Proposé à environ 20 millions de dollars, l'ATR-42 est un avion économique et rentable, ce qui explique son succès commercial. (ATR)

MODÈLE

COÛT

ATR42-600 :	23 millions \$
Embraer 175-E2 :	46,8 millions \$
Sukhoi Superjet 100 :	50 millions \$
Embraer 195-E2 :	60,4 millions \$
Airbus A220-100 (anciennement Bombardier CSeries CS100) :	79,5 millions \$
Airbus A220-300 (ex-Bombardier CS300) :	89,5 millions \$
Airbus A320 :	101 millions \$
Boeing 737-800 :	102 millions \$
Boeing 737-900ER :	108,4 millions \$
Airbus A320neo :	110,6 millions \$
Boeing 767-300ER :	209,8 millions \$
Airbus A330-800neo :	259,9 millions \$
Airbus A350-800 :	280,6 millions \$
Boeing 787-9 :	281,6 millions \$
Boeing 777-300ER :	361,5 millions \$
Airbus A350-1000 :	366,5 millions \$
Boeing 777-8 :	394,9 millions \$
Boeing 747-8 :	402,9 millions \$
Airbus A380 :	445,6 millions \$

102 millions de dollars. Le prix d'un avion est fonction du nombre d'appareils commandés. Les grandes compagnies, comme Southwest, qui présente ici le 10 000^e 737 réceptionné par une compagnie aérienne, bénéficient de réductions substantielles. (Boeing)





50 millions de dollars. Le Superjet 100 de Sukhoi, vendu aux alentours de 50 millions de dollars, souffre de la concurrence directe des avions Embraer notamment. (Jacques Guillem)



79 millions de dollars. Pour remplacer ses MD88, Delta a acheté 75 Bombardier CSeries, devenus des Airbus A220 après la reprise du programme par les Européens. (Airbus)

361 millions de dollars. Le Boeing 777, proposé dans sa nouvelle version à 394,5 millions de dollars, devrait dépasser les 2000 exemplaires produits. Un succès ? Non, un triomphe ! (Boeing)





366 millions de dollars. Client de lancement du A350-1000, Qatar Airways a placé une commande de 37 appareils de cette version proposée au prix catalogue de 366,5 millions de dollars. (Airbus)

281 millions de dollars. Après des débuts difficiles, la carrière du 787, ici en version tirt 9, se déroule conformément aux prévisions avec déjà plus de 700 avions livrés. (Boeing)





En raison d'un prix élevé et d'un marché vampirisé par les biréacteurs, la carrière commerciale de l'A380 reste décevante, mais un retournement de situation est toujours possible. (Airbus)

402 millions de dollars. Dernière version en date de l'exceptionnel Boeing 747, le -8, disponible en version passagers ou fret, devrait être produit jusqu'en 2022 à moins que de nouvelles commandes ne soient signées d'ici-là. (Boeing)



Avions militaires



175 millions de dollars. Le premier des 6 MRTT, commandés par Singapour, a été livré au début du mois de septembre 2018, quelques jours avant la livraison du premier exemplaire à l'armée de l'Air. (Airbus)



Ces prix s'entendent « Fly Away », c'est-à-dire un appareil en condition de vol avec son système d'armes fonctionnel mais sans armement, hors coût de développement. Les contrats militaires s'entendent souvent avec une importante part consacrée aux contrats de maintenance. Pour un C-130J, celui-ci peut approcher les 10 millions de dollars par avion et par an. ■

MODÈLE COÛT

Rafale C :	environ 70 millions €
F-35 :	94,3 millions \$ (USAF 2018)
Gripen :	environ 50 millions \$
A400M :	152,4 millions € (2013)
C-130J :	75 millions \$ (Fly Away)
KC-46 Pegasus :	env. 150 millions \$ (USAF)
A330MRTT :	175 millions \$ (Armée de l'Air)

94 millions de dollars. Successeur désigné du F-16, le F-35 est célèbre pour les coûts de développement exorbitants du programme. À 100 millions de dollars « Fly Away » l'exemplaire, il s'agit d'un avion de combat fort onéreux également. (Lockheed Martin)



150 millions de dollars. Dérivé du Boeing 767, le KC-46 est proposé à un prix légèrement inférieur à celui du MRTT. (Boeing)



59 millions de dollars.
Fer de lance commercial
des avions d'affaires
Dassault, le Falcon 8X.
(Dassault Aviation)

Avions d'affaires

L'aviation d'affaires est un marché cyclique, extrêmement sensible à la santé économique générale. Les machines sont à la fois extraordinaires mais souvent d'une praticité exemplaire. Si les avions sont souvent assimilés à des signes extérieurs de richesse, ils sont aussi, et surtout, des outils au service des entreprises et participent à la réactivité des grands groupes. Ils sont, principalement, des outils de travail, des salles de réunion volantes et un mode de transport souple et performant.

En dehors de quelques contrats de compagnies spécialisées, les ventes en aviation d'affaires se font à l'unité. Il peut s'agir de négociations avec un particulier mais en général ces acquisitions se font avec des entreprises organisées pour assurer l'exploitation de ces appareils. Le prix catalogue est rarement celui payé car les options peuvent très nettement alourdir le bilan. Pour ces gammes d'appareils, elles sont sans limites. Souvent, le coût de la formation des équipages chez le constructeur ou un sous-traitant officiel est compris dans le contrat. À noter que les avions de ligne, Airbus, Boeing et autres, font de très beaux avions d'affaires avec les gammes ACJ pour le constructeur européen et BBJ pour les avions construits à Seattle. ■

MODÈLE	COÛT
Dassault Falcon 6X :	47 millions \$
Dassault Falcon 8X :	59 millions \$
Gulfstream G650ER :	70,15 millions \$
Bombardier Global	
Express 6500 :	56 millions \$
Beechcraft	
King Air 250 :	6,5 millions \$
TBM 930 :	4,19 millions \$
Pilatus PC-24 :	8,9 millions \$



55 millions de dollars. Gulfstream possède également une gamme d'avions d'affaires cohérente et performante. Ici, le G500. (Gulfstream)

Les options d'aménagement des avions d'affaires sont sans limites et parfois exubérantes, mais faire dans le fonctionnel, le sobre et le bon goût est toujours possible. (Boeing)



480 500 dollars. Cousin musclé du Cessna 172, le Cessna 182 Skylane est proposé au prix sorti d'usine à moins de 500 000 dollars. Plus de 23 000 exemplaires ont été produits depuis 1956. (Cessna)

Avions légers et ultralégers

Le Cessna 172, l'avion le plus produit de l'Histoire, et de loin, est toujours en production et cela semble ne pas vouloir s'arrêter de sitôt. Un aéro-club ou un particulier peut en acquérir un pour le prix d'un petit appartement parisien. C'est un rêve pour beaucoup ! Le Bonanza est d'une catégorie supérieure qui frôle l'aviation d'affaires, mais reste une légende dans l'histoire de l'aviation tout court.

Le WT9 biplace performant, immatriculable comme ULM ou avion en fonction de la masse maximale autorisée, existe en train rentrant ou fixe. ■

MODÈLE	COÛT
Cessna Skylane :	480 500 \$
Beechcraft	
G36 Bonanza :	815 000 \$
Dynamic WT9 :	160 000 €
ULM pendulaire Nuvix	
- Skypper 912S	
(100 ch) :	40 490 €



40 490 euros. Le prix moyen pour un ULM pendulaire comme ici le Skypper 912S. (Nuvix)



Hélicoptères

Le marché de l'occasion :

Les avions et les hélicoptères de toutes catégories peuvent avoir des carrières fort longues et changer de mains à de nombreuses reprises. Le marché des avions d'occasion est extrêmement actif et permet de faire parfois d'excellentes affaires. Aujourd'hui, un Boeing 747SP aménagé VIP est en vente pour 8 millions USD, un 747-400 de 66 000 heures de vol ne vaut plus que 13 millions, un Cessna 177 de 4000 heures de vol coûte 75 000 USD, mais le top du top, c'est quand même ce Grumman Mallard de 1947 (J-18), actuellement en vente au Canada (12 000 heures de vol tout de même), qui est affiché à 1 500 000 USD. Il faut écrire beaucoup d'articles dans le *Fana* pour pouvoir se l'offrir, mais nous ne désespérons pas ! ■

3,2 millions de dollars. Sauvetage, lutte contre les feux de forêt, missions de combat, transport, les hélicoptères savent tout faire.

C'est ce qui explique la diversité des machines et donc des prix. Ici l'EC-135. (Airbus Helicopters)

MODÈLE

COÛT

EC-135 :	3,2 millions €
EC-225 :	28 millions \$
Bell 407 :	3,1 millions \$
Robinson R22 :	288 000 \$



3,1 millions de dollars pour le Bell 407. Des hélicoptères plus petits comme les Robinson passent en dessous du million de dollars. (Bell)

Le monde vu à travers l'affichage tête haute d'un Falcon. Le HUD est avant tout au service de la sécurité. (Dassault Aviation - A. Daste)

Quand les yeux dirigent

Du viseur tête haute aux projections sur la visière des casques, la présentation des informations aux pilotes est en évolution permanente.

Par Frédéric Lert

Le HUD ou, en français, la VTH, permet aujourd'hui la projection sur une surface semi-réfléchissante d'informations essentielles devant les yeux du pilote. Celui-ci n'a plus à regarder son tableau de bord : les informations capitales, pour le pilotage à court terme, lui sont présentées sur une surface transparente superposée à sa vision normale de l'environnement extérieur. Les informations sont collimatées à l'infini et ne nécessitent pas d'accommoder la vue. A condition de savoir faire le tri et de se li-

miter intelligemment au seul affichage de données utiles, le HUD est un formidable progrès ainsi qu'un facteur de sécurité essentiel. Et, paradoxalement, c'est une sorte de retour aux sources...

Regarder dedans ou dehors ?

Les premiers pilotes ne pouvaient que regarder dehors pour apprécier les conditions de vol. Ils n'étaient alors guidés que par la seule perception de leur environnement, l'œil jouant un



L'action...

rôle essentiel. « Les yeux dirigent l'action », dit l'adage. La sophistication croissante des appareils a ensuite ramené leur regard dans le poste de pilotage : ils s'agissait de surveiller des instruments toujours plus nombreux et complexes. Le vol aux instruments permit de franchir une étape importante, rendue possible par le gyroscope capable de donner une référence fixe dans l'espace. Les pilotes se fiaient alors pour leur vol à des instruments leur donnant une représentation de la réalité. Ça marchait plutôt bien, à condition toutefois de

savoir interpréter et synthétiser les informations données. Mais la médaille avait un revers considérable : le pilote ne regardait plus son environnement, focalisant son attention sur ses instruments. La charge de travail, déjà énorme, ne fit qu'augmenter au fur et à mesure que l'on voulait gagner en précision. L'arrivée des écrans multifonctions à cristaux liquides ne changea rien sur le fond finalement : certes ils permettaient de fusionner l'information et de la présenter de façon synthétique, mais ils exigeaient toujours que le pilote fo-

calise son attention sur le tableau de bord, en interprétant des chiffres et des flèches. De temps en temps, il était tout de même autorisé à risquer un œil à l'extérieur pour essayer de voir une piste ou bien assurer la veille autour de son avion.... En s'affranchissant des limites naturelles, les ingénieurs avaient d'une certaine manière multiplié la complexité des situations et les sources d'erreurs potentielles.

Avec le HUD, le mouvement s'est donc inversé. Sans rien renier de la sophistication des avions et de leurs instrumentations, le pilote retrouve la vision directe du monde extérieur, enrichie des informations nécessaires au pilotage. De jour comme de nuit, par tous les temps, le HUD devient l'instrument de vol principal permettant de gérer toutes les phases du vol : depuis le décollage jusqu'à l'atterrissage, en passant par la navigation et le combat... Sans surprise, les premiers utilisateurs sont les pilotes de chasse dont le besoin est multiple : piloter l'avion, gérer le système d'arme, surveiller le ciel et suivre du regard la cible. Disposer des paramètres de pilotage essentiels, gérer son système d'arme du bout des doigts sans jamais quitter la cible des yeux devient alors possible. Avec le HUD, le pilote gagne en outre une représentation imagée et simple du bilan d'énergie de son avion : dans les situations extrêmes d'un combat aérien, il visualise d'un coup d'œil le comportement de son appareil et ses possibilités.

C'est un progrès essentiel par rapport au collimateur qui équipait auparavant les appareils. Certes l'outil pouvait être très sophistiqué, avec l'apparition, au cours de la Seconde Guerre mondiale, de réticules adossés à un calculateur mécanique prenant en compte la vitesse de l'avion et la distance estimée de la cible. Mais le collimateur ne servait qu'à viser et tirer.

Accroître la sécurité à proximité du sol

Une fois n'est pas coutume, les choses ont été moins claires dans le domaine commercial. L'urgence d'abattre son prochain ne faisant pas partie des préoccupations de l'équipage, le débat a été plus passionné sur l'emploi du HUD. Bien évidemment, l'idée de base n'était plus de viser une cible mais bien d'accroître la sécurité, particulièrement à proximité du sol, et même de réduire les minima à l'atterrissage. Mais en affichant quelles informations ? Fallait-il faire du HUD



Une pilote de F-35 enfle son casque à 600 000 dollars. Un casque endommagé est synonyme de pilote cloué au sol... (US Air Force)

un simple répéteur de la planche de bord, sans valeur ajoutée sur la gestion de la trajectoire et du niveau d'énergie ? Ou bien profiter de l'affichage synthétique pour offrir aux pilotes un véritable collimateur de pilotage pour en quelque sorte reproduire les conditions du vol à vue et laisser libre l'esprit du pilote dans

sa prise de décision ? Les limitations initiales de la technologie firent de la première solution la plus simple à mettre en œuvre.

Le développement des approches aux instruments automatisés porta également de rudes coups à l'idée d'un collimateur de pilotage. Le pilote n'ayant plus à voir la piste, pourquoi

aurait-il fallu lui fournir un équipement lui permettant de le faire ? Le grand André Turcat avait beau expliquer que « *pour voir dehors, il faut commencer par bien nettoyer le pare-brise* », l'avenir passait selon lui par l'atterrissage automatique. Et, dans cette logique, l'installation d'un affichage devant le pilote n'aurait eu d'autre effet que de gêner sa vision extérieure... Sauf qu'en projetant les informations en surimpression du paysage extérieur, le HUD évite les mouvements de tête entre la planche de bord et le pare-brise. C'est un confort doublé de plus de sécurité.

Le temps a passé et le HUD s'est progressivement invité dans la plupart des cockpits. Air France reçut ses premiers équipements lors de la fusion avec Air Inter en 1997, lorsque les A320 de la compagnie intérieure équipés de HUD Sextant furent intégrés à sa flotte. Les A380 de la compagnie nationale sont aujourd'hui équipés de deux HUD, systématiquement utilisés au décollage et à l'atterrissage. Les Boeing 787 et les Airbus A350 reçoivent également l'affichage tête haute. Les avions sont précâblés mais l'équipement reste optionnel : certaines compagnies ne



Le HUD des chasseurs modernes est de plus en plus large. Le chant du cygne avant le remplacement total par les affichages sur les visières ? (Dassault Aviation - S. Randé)

l'achètent pas, d'autres n'en installent qu'un pour la place gauche, d'autres encore choisissent d'équiper les deux pilotes. Il faut toutefois garder à l'esprit que jusqu'à présent, le HUD n'est vu que comme une aide au pilotage : il ne s'agit pas d'un instrument primaire de pilotage. Mais pour combien de temps encore ? La sécurisation des affichages et la fiabilité de la technique devraient permettre aux affichages tête haute de prendre toute la place qui leur revient.

Le Mercure de Dassault Aviation est resté célèbre pour avoir été construit à seulement une dizaine d'exemplaires au début des années 1970 et pour avoir été équipé d'un HUD pour les atterrissages tout temps. Le savoir-faire de la maison Dassault en matière de chasseur avait compté pour beaucoup dans cette migration, unique et osée pour l'époque. Le Mercure a été le seul avion de ligne conçu par la maison de St-Cloud. Mais l'idée de HUD n'a eu aucun mal à s'imposer par la suite au sein de la famille Falcon et on le retrouve aujourd'hui sur la plupart des avions d'affaires, le Global Express canadien ayant été un pionnier en la matière. Mais les contraintes d'encombrement et surtout de coût font que déjà de nouvelles solutions se préparent, avec le remplacement du HUD par une simple projection des informations de pilotage sur glace monoculaire placée devant l'œil directeur du pilote. Plus simple, plus léger, moins cher...

Bien visibles sous la coque du casque du F-35, les deux projecteurs permettant l'affichage des informations sur la visière. (Frédéric Lert)



Toujours plus d'informations ! Les écrans de l'avion, ici un Rafale, sont complétés par une tablette numérique portée par le pilote. (Dassault Aviation - P. Sagnes)



Changement d'époque avec le poste de pilotage de l'A400M. La technologie civile au service de l'avion de transport militaire... (Frédéric Lert)

il perd de vue son HUD. Au milieu des années 1970, les casques ont d'abord reçu des viseurs mobiles primitifs permettant de désigner des cibles au profit des missiles à guidage infrarouge. Il n'était donc plus nécessaire de pointer l'autodirecteur du missile sur la cible pour l'accrocher. Les Sud-Africains furent parmi les premiers à doter leurs Mirage F1 de ce système. En 1989, une fois le rideau de fer abattu et les deux Allemagne réunies, les MiG-29 hérités de l'Allemagne de l'Est firent également forte impression avec leur viseur de casque couplé à l'utilisation du missile AA-11 « Archer » à guidage infrarouge. L'équipement était redoutable pour l'ennemi, mais aussi pour le pilote utilisateur qui souffrait de sa mauvaise ergonomie. Le casque était lourd, mal équilibré. Par bonheur, les missions n'étaient jamais très longues avec le MiG-29 à l'autonomie limitée...

Quoi qu'il en soit, le casque du MiG-29 déboucha sur une prise de conscience à l'Ouest et les équipementiers mirent les bouchées doubles sur les systèmes d'affichage intégrés au casque. Rockwell Collins (Etats-Unis) et Elbit Systems (Israël) codéveloppèrent le JHMCS (Joint Helmet Mounted Cueing System), qui équipe aujourd'hui un grand nombre d'appareils au sein de l'US Air Force (F-15C et E, F-16 block 40 et au-delà...), de la Navy et des Marines (F/A-18 Super Hornet). Le JHMCS est en fait un viseur monochrome protégé par une visière bombée, qui s'adapte sur le casque standard américain HGU-55. Utilisé en conjonc-

tion avec l'AIM9X, il peut tirer « par-dessus l'épaule ». Il permet également de pointer les nacelles de désignation laser, d'afficher certaines des informations de vol en supplément du HUD et de projeter des images vidéo (notamment du FLIR) sur la visière. Thales propose de son côté un équipement plus simple, le Scorpion. Il s'agit d'un monoculaire en couleurs avec un champ de vision de 26° par 20° et qui permet la visée et l'affichage des données de vol, mais qui est aussi compatible avec l'utilisation de JVN : l'écran très fin vient s'intercaler entre l'œil du pilote et les ju-

melles de vision nocturne. Le Scorpion est utilisé sur les F-16 et les A-10. Outre la question de l'accommodation des deux yeux, une des difficultés techniques posées par les viseurs de casque tient à leur positionnement dans l'espace, afin de savoir précisément où le pilote regarde. Deux techniques sont principalement utilisées : le JHMCS ou le Topowl baignent dans un champ magnétique dont la mesure très fine des perturbations, au gré des mouvements de tête du pilote, permet de déduire les déplacements du casque et donc de savoir où regarde son porteur. La dis-



Le casque Topowl de Thales, ici au service du Tigre, avec la projection des informations sur la visière claire. (Frédéric Lert)



Luxe, calme et... sécurité : le poste de pilotage du Falcon 8X est dominé par des écrans à cristaux liquides et les deux HUD à champ large. (Dassault Aviation)



En approche sur le terrain de Gao (Mali), le pilote contrôle son avion au travers des informations fournies par son HUD. (Frédéric Lert)



cipline est complexe mais bien maîtrisée. Mais on trouve aussi plus simple maintenant : avec le Scorpion, la détection de mouvement est hybride et fait appel à l'optique à l'inertie. Les mems fournissent les références inertielles qui sont recalées optiquement par une micro caméra, fixée sur le casque, qui utilise comme référence des repères posés en cabine.

Avec le F-35, Lockheed Martin a fait un choix radical en décidant d'éliminer le HUD et de le remplacer par une projection sur visière extrêmement innovante. En plus des fonctions traditionnelles de pilotage et de combat ayant migré du HUD, le casque Gen II associé au F-35 utilise le système DAS (Distributed Aperture System). Il s'agit d'un ensemble de six caméras placées à l'extérieur de

l'avion, dont les images sont transmises au casque, permettant ainsi au pilote de « voir » à travers les parois du fuselage quelle que soit la direction vers laquelle il tourne la tête. Le casque du F-35 permet également d'afficher les capteurs de l'EOTS situés sous le nez de l'avion. Ce concept futuriste, qui rassemble sur une même visière un très grand nombre d'informations complexes, a été un défi permanent pour le programme. Le casque a été critiqué pour son coût (de 400 à 600 000 dollars par casque selon les sources !), son poids (2,5 kg), sa fragilité et surtout son manque de maturité technique. On a reproché au casque de surcharger le pilote en informations au point d'être gêné dans sa vision du monde extérieur, de présenter des images de mauvaise qualité ou encore de manquer de précision dans le cas d'un tir au canon. Sans compter qu'une simple panne mettrait de facto son utilisateur sur la touche et incapable de voler le temps de la réparation, le casque étant personnalisé avec une coque intérieure réalisée en moulage 3D sur la tête de chaque utilisateur...

Devant les problèmes qui s'accroissent, l'USAF demande en 2013 à BAE Systems de développer une version traditionnelle, pour le cas où la mise au point du Gen II ne pourrait aller à son terme. En 2016, une coopération entre l'Américain Rockwell Collins et l'Israélien Elbit Systems donne naissance au Gen III. Héritant de nouveaux affichages à cristaux liquides et de nouveaux logiciels pour le système DAS, le Gen III promet de réussir là où le Gen II n'a pas su convaincre.

D'ailleurs, pour Lockheed Martin la messe est dite et le système DAS est une pièce essentielle du futur. L'industriel le propose également sur le V280 Valor, convertible de nouvelle génération proposé à l'US Army. Avec le DAS, l'équipage disposera d'une visibilité sur 360° autour de son appareil grâce à l'implantation de six caméras infrarouges dans le fuselage. Les images « recousues » pour présenter une continuité d'une caméra à l'autre seront affichées sur les écrans en planche de bord ou bien sur les casques de l'équipage.

SVS + EVS = CVS

La suite de l'aventure tient en deux abréviations magiques : SVS (Synthetic Vision System) et EVS (Enhanced Vision System). Le SVS s'appuie sur une base de données pour afficher dans le casque les obstacles

référéncés. L'EVS apporte quant à lui une vision synthétique du monde extérieur en colorant et en renseignant les obstacles qui apparaissent. En croisant les deux systèmes, SVS et EVS, on obtient le CVS, pour Combined Vision System, qui promet d'offrir une vision enrichie du monde extérieur propre à baisser encore les minimas et réduire les risques. Pour les avions d'affaires, qui ont d'abord bénéficié d'un affichage du CVS sur écran, avant que l'installation migre sur HUD, c'est par exemple l'idée de voir de nuit comme en plein jour. Pour les hélicoptères, on évoque la possibilité d'évoluer près du sol dans des conditions de vol dégradées, comme par exemple dans les tourbillons de neige ou de sable soulevés par les rotors.

Toujours plus fort !

Si on pousse le raisonnement un peu plus loin, on comprend que tout le champ de vision du pilote pourrait être prétexte à afficher des informations de façon plus intuitive que sur des écrans : portée d'un missile, zone de létalité d'un site de défense sol-air, présence d'un relief... mais aussi paramètres du vol, images fournies par les capteurs. Comme sur le bureau virtuel d'un ordinateur, le pilote aurait également la possibilité d'organiser les renseignements en fonction de l'importance qu'il voudrait leur donner : les plus utiles au centre, les autres sur les côtés. On pourrait aussi imaginer pouvoir utiliser la gestuelle du pilote pour lui permettre d'interagir dans son cockpit sans avoir à toucher physiquement les commandes. A partir de là, pourquoi ne pas penser non plus à éliminer la verrière, le pilote n'interagissant avec son environnement que par l'intermédiaire de capteurs et d'affichages ? La présence de la verrière oblige à des compromis en termes d'aérodynamique, de résistance, de furtivité.

Attention toutefois : on a vu avec le F-35 que le mieux était toujours le meilleur ennemi du bien. Le volume d'informations pouvant être recueilli est quasi infini, mais il finit toujours à un moment ou à un autre par transiter par le goulet d'étranglement que sont les deux rétines du pilote et sa capacité propre au traitement de l'information. Entre l'ingénieur qui aime résoudre les défis techniques, avec la capacité d'aller toujours plus loin dans l'innovation, et l'opérateur qui doit faire avec les outils placés à sa disposition avec une charge de travail raisonnée, l'équilibre n'est jamais facile à trouver... ■

CHAPITRE 3

Les besoins pour la navigation sont différents entre ce Cap 20 et cet Airbus A321. Néanmoins, ils peuvent utiliser parfois les mêmes outils. (F. Marsaly)



Comment navigue-t-on

« *Inventer un aéroplane n'est rien, le construire est un début, voler c'est tout.* » Ainsi Otto Lilienthal évoquait-il les balbutiements de l'aéronautique. Et si le célèbre vélivole allemand a plané à de nombreuses reprises, il n'a jamais eu à aller d'un point à un autre, par tous les temps et en toutes circonstances. Car, si les pionniers ont vite réussi à s'envoler, d'autres difficultés sont venues se greffer ensuite dès qu'il s'est agi de faire progresser l'aéronautique et de la rendre utile au voyage.

Par Frédéric Marsaly

Les premiers aéroplanes pouvaient suivre des repères au sol, les routes, les voies ferrées, les cours d'eau. Mais, dès les années 1920, avec la naissance de l'aviation commerciale, des moyens de repérages plus précis se sont avérés nécessaires, la navigation au compas ayant ses limites, conduisant à l'apparition des phares aériens, de repères spécifiques situés au sol et, bien sûr, puisque l'aviation doit énormément à la marine, à la navigation astronomique. Puisque les astronomes étaient capables de calculer et d'annoncer les positions des astres, il était possible de déduire une position en fonction de leur observation précise. Un chronographe précis, des éphémérides à jour et un sextant ont longtemps fait partie du lot de bord des avions longs courriers. Son enseignement s'est poursuivi en fonction des écoles et des armes jus-



Les avions légers sont de plus en plus souvent équipés de suites avioniques facilitant la navigation. Ici, de l'avionique du fabricant Dynon embarquée sur un Cruiser PS-28. (F. Marsaly)

aujourd'hui ?

qu'à très récemment, 2005 pour l'aviation française, mais depuis longtemps, c'était devenu un outil de tout dernier recours, à la limite de la tradition initiatrice.

La Seconde Guerre mondiale et ses opérations à très longue distance ont démontré l'intérêt de la radionavigation, d'une précision équivalente à la navigation astronomique mais d'une plus grande simplicité de mise en œuvre.

Les radiophares émettaient un signal capté par les instruments de bord et en indiquaient la direction. Ainsi ces premières balises guidaient les avions vers elles et, de repères radios en repères radios, permettaient de tracer un itinéraire à longue distance et sans avoir besoin de garder le sol en vue ni de garder un œil sur les étoiles.

Ce type de balise existe toujours sous la dénomination NDB, Non Directional Beacon (gamme de fré-

quence de 190 à 535 KHz), dont la réception est assurée par l'Automatic Direction Finder (ADF) à bord de l'avion. L'émission se faisant en grandes ondes, la portée des NDB est très longue. Le signal émis est l'identification de la balise sur deux ou trois lettres, en morse, permettant aux équipages de s'assurer qu'ils sont bien sur la bonne fréquence.

Balises NDB et VOR

Les NDB vont disparaître petit à petit, leur utilisation étant de plus en plus marginale. Néanmoins, elles demeurent intéressantes dans les régions les plus reculées car elles sont peu onéreuses à faire fonctionner.

Les balises VOR, VHF Omnidirectional Range, sont mises en service immédiatement après-guerre aux Etats-Unis. Opérant sur la gamme de

fréquence de 108 à 117,95 MHz elles apportent la possibilité de suivre une route vers ou depuis ces balises. Elles sont souvent également équipées d'un (DME Distance Measuring Equipment) qui permet à l'équipage de connaître la distance qui le sépare de la balise, une information cruciale. Les VOR, plus perfectionnées que les NDB, autorisent des itinéraires plus variés et plus fins. Elles constituent des étapes importantes des routes aériennes. Les fréquences VHF qu'elles utilisent ont une portée dite «optique». En raison de la rotondité de la Terre, plus le récepteur est bas et plus la réception du signal est difficile. Néanmoins, à haute altitude, la portée utile est de plusieurs centaines de km. Elles sont, aujourd'hui encore, les balises de radionavigation les plus couramment utilisées par l'aviation civile, en raison de leur portée et de leur grande précision, surtout lorsqu'on se sert de

deux balises en recouvrement. Une variante des balises VOR est utilisée pour les ILS (Instrument Landing System) qui amènent avec précision les avions jusqu'aux pistes d'atterrissage.

Aujourd'hui, les GPS étant présents dans tous les cockpits, ou presque, les VOR tendent progressivement à laisser la place à d'autres normes de navigation. Néanmoins pour qu'un avion puisse être capable de voler aux instruments, la réglementation exige que deux récepteurs VOR soient à bord et fonctionnels.

Les VOR-DME ont cependant un coût opérationnel certain. Dans de nombreux pays, beaucoup sont donc démantelés pour ne laisser que les plus stratégiques. Avec l'émergence du GPS, de moyen primaire, les VOR ont basculé depuis les années 2000 au statut d'outil de vérification.

Pour pratiques et efficaces qu'elles fussent, les balises n'avaient toutefois pas la portée requise pour les vols transocéaniques les plus longs.

Pour l'Atlantique, la route-nord permettait de suivre les routes aériennes tracées au-dessus du nord du Canada, du Groenland, de l'Islande pour arriver en Ecosse, mais, pour les vols trans-Pacifique, en l'absence de terres où poser une balise entre la côte californienne et Hawaï par exemple, sur cette route alors assez fréquentée, des navires étaient positionnés sur l'itinéraire des avions. Équipés d'une balise NDB ils assuraient aussi, en cas de besoin, les opérations de secours aux appareils en difficulté comme le fit le Pontchartrain le 15 octobre 1956 en récupérant l'équipage et les passagers d'un Boeing de la PanAm victime d'une panne de moteur. Mais ces moyens déployés étaient lourds et coûteux.

Navigation inertielle et satellitaire

Il fallait trouver une technologie permettant aux avions de naviguer de façon autonome. C'est la conquête spatiale qui apporta la solution avec les centrales de navigation inertielles, développées à partir de la Seconde Guerre mondiale et dont les premiers exemplaires utilisables sur les avions apparurent dans les années 1960. Ces centrales font reposer leur principe de fonctionnement sur des gyroscopes, des systèmes en mouvement rotatif constant et permanent d'une extrême stabilité naturelle, et des accéléromètres.

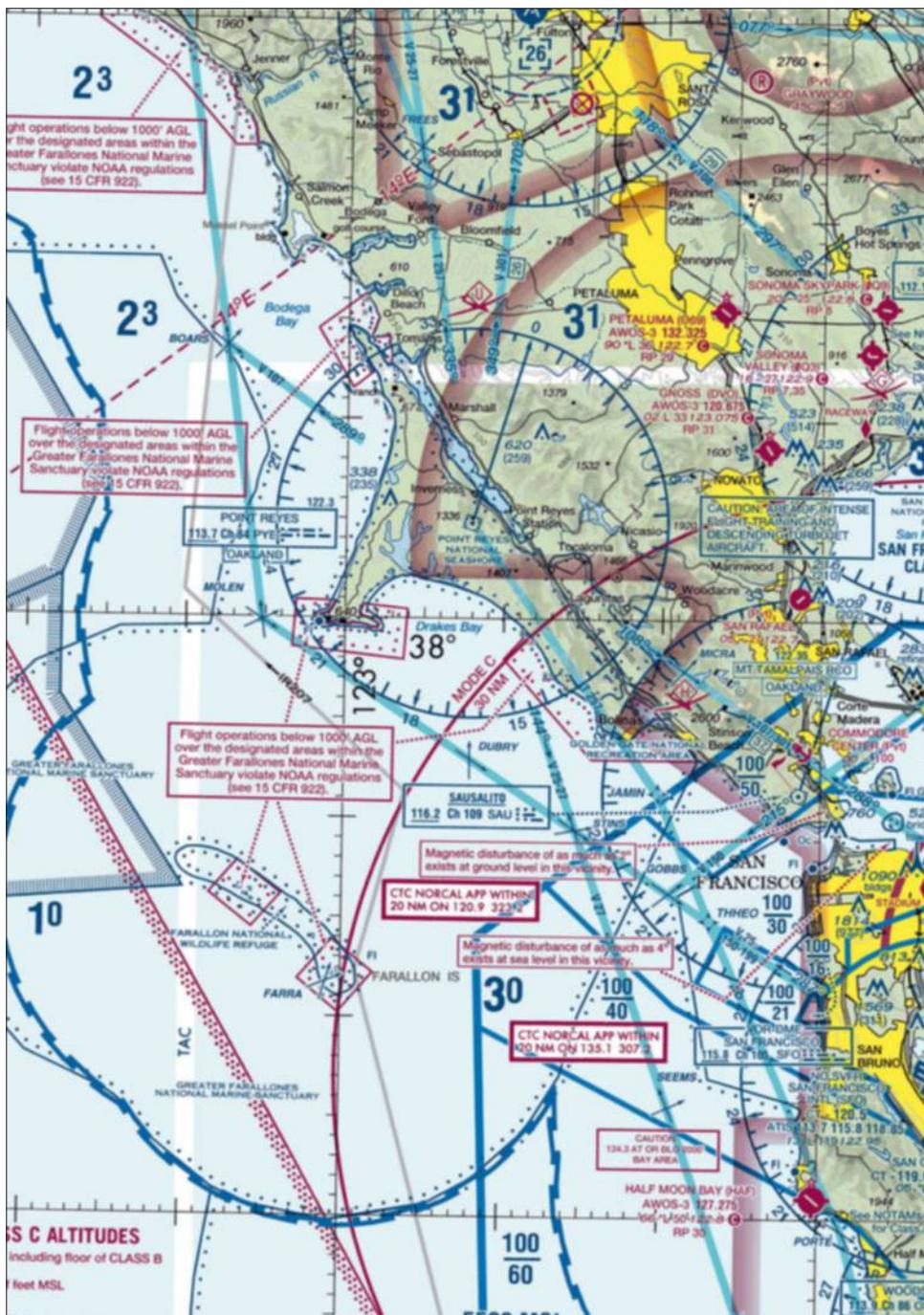
Chaque mouvement de l'aéronef porteur peut donc être calculé et quantifié. En extrapolant les accélérations subies, il devient possible de

connaître la trajectoire de l'aéronef et donc, sa position précise à tout instant, à partir du moment où celle de départ a été entrée avec précision dans le calculateur. Néanmoins, ces instruments ont une dérive naturelle et il est nécessaire de recalibrer les centrales au cours du vol. Cette opération peut se faire en prenant un repère connu comme les balises de navigation classiques.

Sur la première génération de centrales, un clavier permettait à l'équipage d'insérer les coordonnées géographiques d'un certain nombre de «points tournants» vers lesquels le directeur de vol/pilote automatique guidait l'avion; le «Carrousel» de Delco, en service sur les premières versions du 747, permettait d'entrer 9 points

de navigation, obligeant l'équipage à enregistrer les points de navigation suivants au fur et à mesure de la progression du vol. Et une erreur de saisie pouvait s'avérer dramatique. Une des hypothèses les plus sérieuses sur la déviation de trajectoire du KAL007, le 1^{er} septembre 1983, l'ayant entraîné à l'intérieur de l'espace aérien soviétique, et son interception par un Su-15 (269 morts) serait une erreur de frappe lors de la programmation d'un point de navigation.

Les centrales actuelles sont intégrées dans un système encore plus complexe de gestion du vol qui possède en mémoire les coordonnées de toutes les balises et points tournants, la nomenclature de toutes les routes

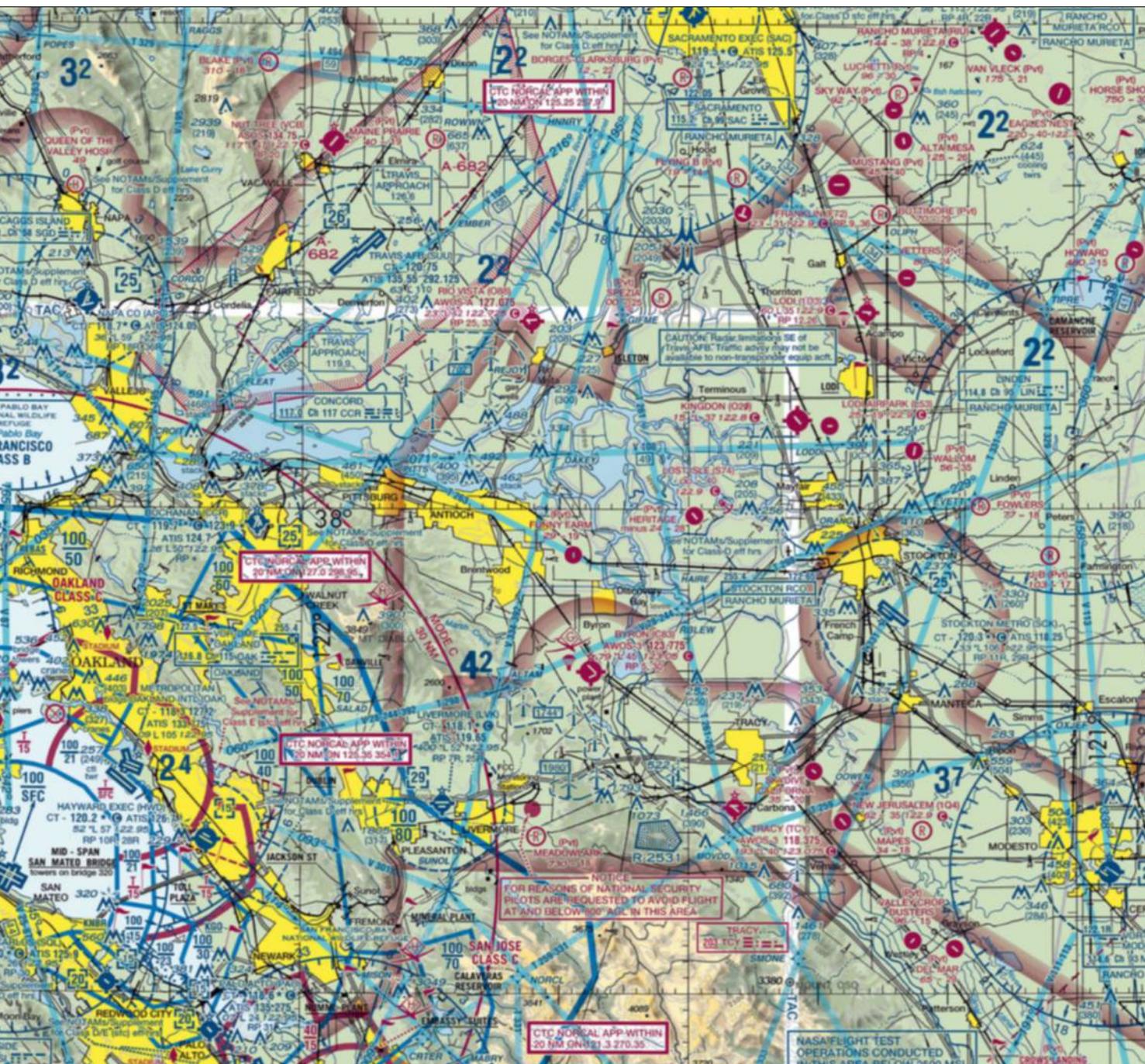


aériennes, permettant à l'équipage de charger à l'avance toute la route, quand elle n'est pas automatiquement téléchargée depuis les services de la compagnie. De plus, en augmentant le nombre de centrales inertielles, trois la plupart du temps, on peut en comparer les dérives et calculer une position moyenne probable.

Les centrales inertielles demeurent le mode de positionnement principal des avions de ligne modernes et des avions de combat et vont sans doute le demeurer très longtemps. L'apparition d'un nouveau dispositif, dans les années 1990, le GPS, leur apportant la précision qui leur manquait en résolvant le problème de la dérive, lorsque les aides radio ne sont pas reçues, grâce à une possi-

bilité de calcul de position corrélé. Programme lancé par les Etats-Unis à des fins militaires pendant les années 1970, le GPS, Global Positioning System, ou système global de positionnement, repose sur une constellation de satellites équipés d'horloges atomiques dont les émissions permettent, schématiquement, par triangulation, de connaître une position avec une précision extrême, de l'ordre de quelques centimètres pour les utilisations militaires américaines, de l'ordre d'une dizaine de mètres pour les applications civiles. La constellation qui comprend un minimum de 24 satellites permet qu'en tout point du globe, il est possible de recevoir les informations de quatre d'entre eux. Désormais très intuitif à

Les cartes VFR américaines sont déroutantes pour les pilotes français habitués à celles de l'IGN ou de la Cartabossy. Sur le secteur Santa-Rosa, Vallejo et San Francisco, on ne compte pas moins de cinq balises omni-directionnelles. (DR)



utiliser sur un écran tactile, sous forme de carte défilante, le GPS est présent dans tous les cockpits.

Néanmoins, la mainmise américaine sur le système fait qu'il existe toujours le risque de voir le service coupé ou dégradé à la demande du gouvernement de Washington, ce qui, pour des raisons d'indépendance technique, amène les autres grandes puissances à mettre en place leurs propres constellations satellitaires de positionnement comme Galileo pour l'Europe, en cours de déploiement et qui sera bientôt totalement opérationnel, mais aussi la Chine, l'Inde ou la Russie.

L'ensemble de ces systèmes permet de naviguer en plein ciel de façon

efficace, mais les objectifs des véhicules aériens et de leurs équipages ne sont pas les mêmes. L'application de ces divers outils est donc différente.

Les aéronefs très légers, autogyres, ULM naviguent réglementairement à vue et ne disposent d'aucun dispositif de navigation autre qu'un GPS qui doit être utilisé comme outil de vérification de. Le principe de navigation est simple : prendre des repères au sol et aller de repères en repères à basse altitude, sans avoir à suivre une route imposée par le contrôle aérien, sauf dans certaines zones particulières.

Les avions légers volent selon ce même principe de règles de vol à vue (VFR) mais peuvent être encore équi-

pés d'un ou deux récepteurs VOR, optionnellement d'un ADF, qui constituent leurs moyens primaires de radionavigation.

Vol à vue ou aux instruments, des objectifs et des moyens différents

Souvent, voire systématiquement, ces instruments sont accompagnés d'un GPS, portable ou intégré puisque la fonction « moving map » ou « direct to » peut simplifier le suivi du vol et surtout éviter de se perdre, tout simplement. De plus en plus souvent, la fonction GPS est prise en compte sur une tablette tactile ou un télé-



Ce n'est pas parce qu'on navigue aux instruments que l'on n'a pas besoin de jeter un œil dehors de temps en temps, comme ici à bord d'un BAe ATP entre Marseille et Malte. (F. Marsaly)

phone moderne. Les avions les plus modernes intègrent une avionique qui rassemble l'ensemble de ces moyens.

Des Cessna 172, 182, des Bonanza, des avions de construction amateur volent depuis longtemps avec des suites avioniques très avancées dont les écrans sont d'une modernité et d'un confort sans équivalent. Par exemple, le PS28 dispose d'une avionique Dynon avec un écran pouvant afficher les paramètres de vol, les indicateurs du moteur et les moyens de navigation. VOR et GPS intégré s'affichent donc sur une carte pour permettre le suivi de navigation le plus précis et le plus compréhensible possible. Mais, même dans le cadre d'une

navigation en suivant les instruments radio et en utilisant le GPS pour le suivi de la trajectoire, il faut rester dans le cadre du vol à vue, en respectant les classes d'espace aérien, les minima de visibilité, les hauteurs de vol et la distance par rapport aux nuages. Dans tous les cas, la bonne vieille carte papier demeure obligatoire à bord.

Mais les pilotes de loisir n'ont pas d'obligation d'atteindre l'endroit prévu coûte que coûte. Quand la météo ne le permet pas, il vaut mieux rester au sol et ranger les avions dans les hangars. D'autres n'ont pas ce luxe.

Lorsqu'ils sont équipés du matériel spécifique, dont un horizon artificiel, deux récepteurs VOR, un conservateur de cap, entre autres, les

avions légers peuvent aussi voler en suivant les règles de vol aux instruments (IFR), selon les trajectoires imposées par les routes aériennes, à haute ou basse altitude tracées généralement entre deux balises VOR/DME, et le contrôle aérien.

Il devient possible donc de voler et d'atteindre sa destination par pratiquement tous les temps. Même s'il s'agit d'un déplacement d'agrément, l'approche de la navigation IFR est résolument plus professionnelle dans l'esprit.

Comme on peut l'imaginer, les vols commerciaux répondent à des normes de navigation encore plus sévères.

Sur un A380, trois centrales à



Un des satellites de la constellation GPS. Depuis les années 1990, elle est désormais indispensable pour la navigation autour du monde. (Boeing)



Un écran, trois affichages (carte, instruments de vol, paramètres moteurs). On note la température d'huile élevée, conséquence de la réchauffe carburateur maintenue, par erreur, après une remise de gaz. (F. Marsaly)



Une balise VOR vue du ciel. (DR)



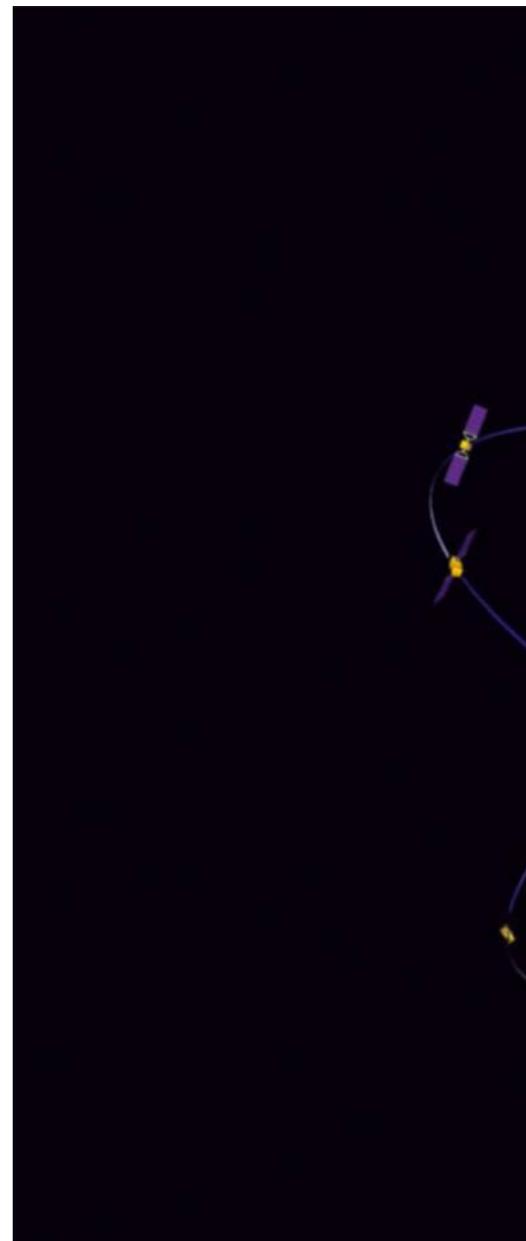
Une centrale de navigation inertielle Sigma 40 de Safran.
(Ricardo Funari/CAPA Pictures/Safran)



Au cœur d'une centrale inertielle de navigation, le gyroscope – ici en rouge. (Philippe Stroppa/Safran)

inertie travaillent de concert comme moyen principal de positionnement. Elles alimentent en données deux Flight Management System, des calculateurs complexes qui se surveillent mutuellement, centralisant les données aérodynamiques et de navigation, capables d'optimiser les performances de l'avion. Aujourd'hui, les FMS sont présents sur l'ensemble des avions commerciaux. La dérive des centrales à inertie est prise en compte et comparée aux autres moyens de navigation, utilisés en parallèle – quand ils sont disponibles, GPS, VOR et DME.

Ainsi, traverser l'Atlantique ou le Pacifique se fait le plus simplement du monde. Le plan de vol établi en fonction des conditions météo et des performances possibles de l'avion est entré dans le FMS qui ensuite alimente le « Flight Director » et oriente l'avion à travers le pilote automatique. L'équipage assure la surveillance de ce suivi,



ainsi que les paramètres techniques et se tient prêt à faire face aux imprévus tout en gérant les communications avec le contrôle aérien en route.

Mais les gros porteurs ne sont pas les seuls à être très bien équipés. Les avions plus légers, mais transportant aussi des passagers comme les Dash 8 Q400, disposent d'un équipement très évolué. Si l'équipage peut toujours se référer à deux récepteurs VOR, pouvant être aussi utilisés pour le guidage final ILS, avec, évidemment les récepteurs DME associés, ce qui comprend aussi les balises militaires TACAN, ou même à deux ADF toujours présents, le Q400 dispose également d'un ou deux FMS offrant une position GPS recoupée par DME comme moyen de navigation primaire. Deux centrales utilisant des gyroscopes de directions horizontales et verticales sont associées à des accéléromètres pour déterminer l'attitude et les variations de cap de l'avion.

Elles se recalent automatiquement en mode normal et leurs informations sont comparées en temps réel pour éviter tout problème. Le pilote automatique est donc là aussi alimenté et le suivi de vol se fait simplement. Lorsque les procédures prennent en compte le recours à des moyens de navigation par satellite, on parle de procédures GNSS (Global Navigation Satellite System), ce qui ouvre la possibilité de voler sous le régime RNAV, en s'affranchissant des points de passages hérités de la radionavigation et d'optimiser ainsi les routes et trajectoires utilisées.

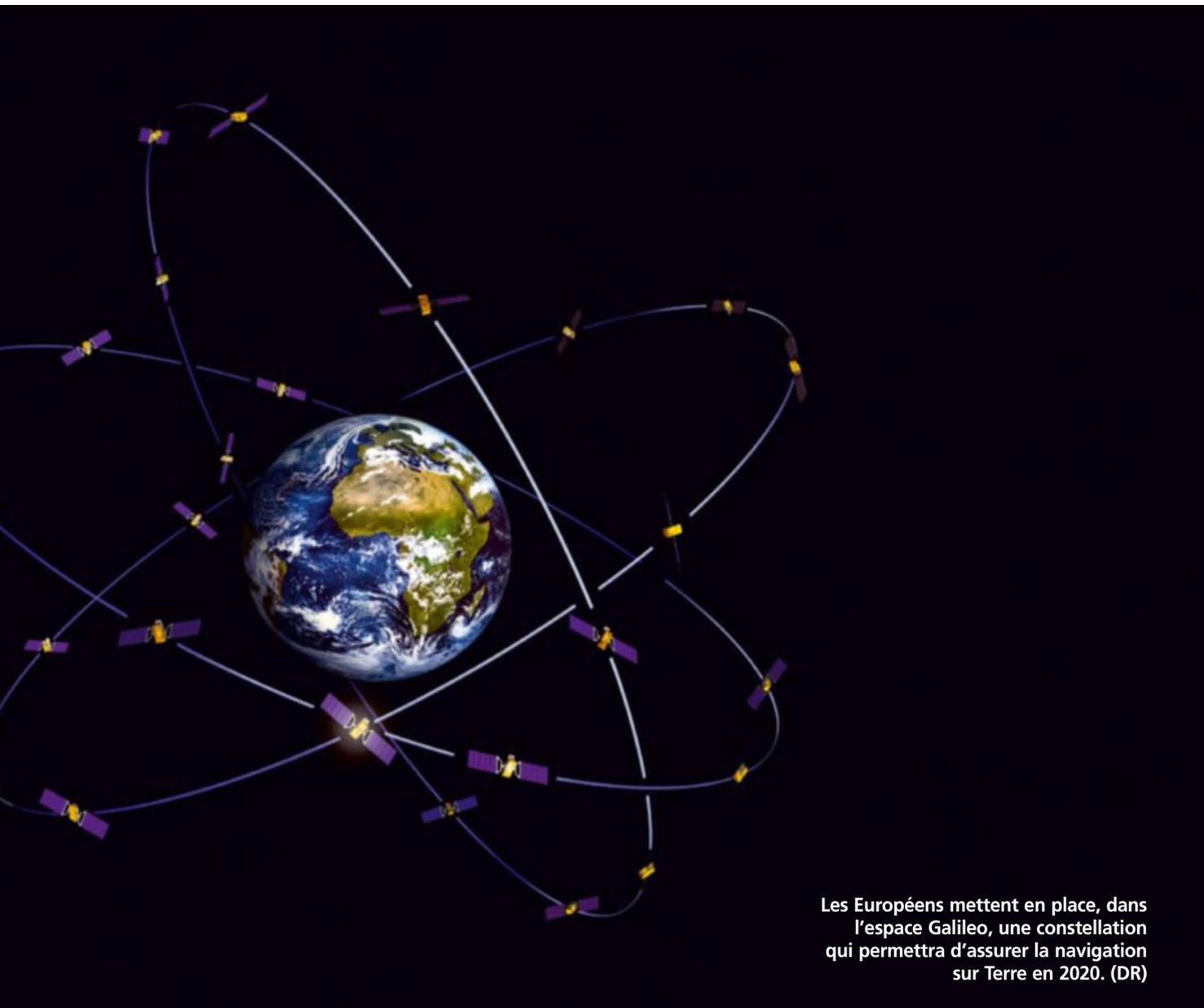
Et les militaires dans tout ça ?

Les avions militaires, eux, doivent s'affranchir le plus possible des repères au sol qui peuvent être faussés en tombant aux mains des adversaires, détruits par les combats ou tout sim-

plement brouillés. Il est donc nécessaire que les avions soient le plus autonomes possible. Les centrales inertielles demeurent donc l'outil principal. Leur dérive est compensée par un recalage sur les moyens radios habituels mais aussi par un repérage radar ou par satellite. C'est dans ce cadre que, pour ce qui concerne l'armée française, l'émergence de la constellation Galileo s'avère cruciale et décisive pour ne plus relever d'un organisme allié mais étranger.

En 2018, il est possible d'employer des moyens de navigation d'une complexité technique incroyable, dont l'apport à la sécurité des vols n'a pas besoin d'être expliqué. Néanmoins, on peut toujours, pour le plaisir, prendre l'air armé d'une simple carte papier, à l'ancienne et c'est bien là l'essentiel ! ■

Merci à Franck Mée, Pierre-François Mary et Francis Arnould.



Les Européens mettent en place, dans l'espace Galileo, une constellation qui permettra d'assurer la navigation sur Terre en 2020. (DR)



C'est gonflé ! Pneus et avions, le géant Michelin



Train d'atterrissage de l'Airbus A350-900 équipé de pneus NZG. Michelin s'est imposé depuis plus de 30 ans sur le marché des pneus d'avions. (Adrien Daste/Safran)



Michelin équipa le Concorde après son accident avec le Air X. (Michelin)



Avec l'avion, le pneumatique rencontre des conditions extrêmes, tant dans le domaine des températures que de la résistance des matériaux. (Jean-Christophe Moreau/Creative Center/Safran)

En 2018, la moitié des avions commerciaux chaussent des pneus Michelin. Présentation d'une réussite autour d'un équipement peu connu et néanmoins indispensable pour les avions : le pneu.

Par Alexis Rocher

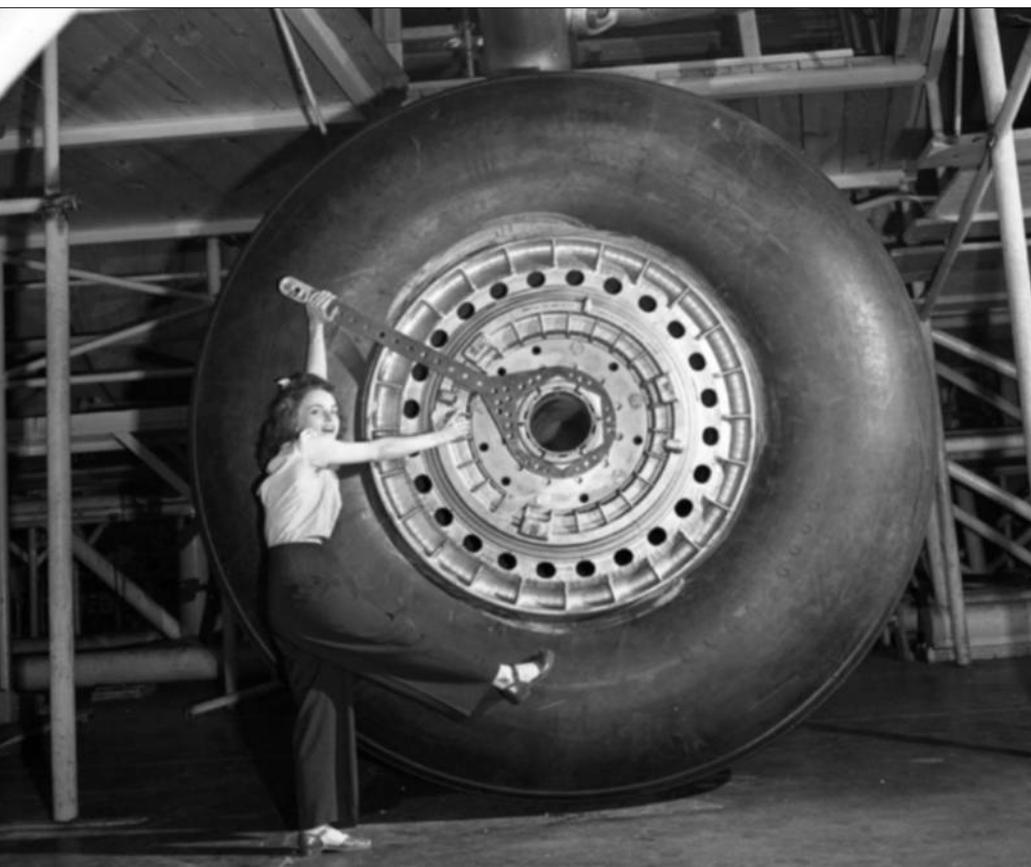
Cette histoire pourrait commencer ainsi : et l'aviation découvre la roue. Avant de partir dans les airs, il fallait déplacer l'avion au sol puis accélérer avant de pouvoir décoller. Roues et skis se disputèrent comme moyens de déplacement. Clément Ader installa des petites roues sur *Eole*. Le 9 octobre 1890, le grand jeu des témoins de la première tentative de vol d'Ader consista à chercher la disparition des traces de roues sur le terrain pour prouver que l'appareil avait décollé. Les frères Wright optèrent de leur côté en 1903, avec le *Flyer I*, pour des skis fabriqués en bois, comme pour la cellule. Faciles à fa-

briquer, mais assez peu pratiques au sol. La roue se généralisa de fait rapidement. Boudin et tubes de caoutchouc cédèrent la place au pneumatique gonflé à l'air. Le pneu s'imposa dans l'aviation après avoir accompagné l'essor de l'automobile. Ce fut dans ces temps anciens qu'entra en scène André Michelin, qui ne tarda pas à prendre une place importante dans le petit monde des personnalités de l'industrie qui militèrent activement pour que l'aviation joue un rôle de premier plan (voir l'encadré « Michelin et l'aviation »).

Paradoxalement, si les frères Michelin avaient pris une grande importance dans la fourniture de pneus



Les pneus sont une composante essentielle du train d'atterrissage. Les moyeux contiennent les freins carbone. (Cyril Abad/CAPA Pictures/Safran)



L'un des plus grands pneus dans l'aviation. Il équipait le bombardier géant B-36. (Convair)

pour l'automobile, ce n'était pas le cas dans l'aéronautique. Leur principal concurrent actuel, l'Américain Goodyear, fournissait depuis 1909 constructeurs et armées. Les Japonais de Bridgestone assemblaient des pneus pour l'aviation depuis 1936. En France, Kléber se fit un nom, en commençant par équiper les Potez. En 1969, Concorde partait dans le monde du supersonique, doté des Kléber-Colombes et des Dunlop britanniques.

Radial et avion

Michelin se fit connaître à partir d'une innovation, le pneu radial associant gomme et acier. Partant de l'automobile, la technologie radiale passa aux poids lourds, aux engins agricoles et à l'aéronautique au début des années 1970. Il fallut peaufiner les études et les essais tant les contraintes sont ici nombreuses, parfois même contradictoires. L'aviation suppose du matériel résistant et léger, mariage souvent difficile. Il faut pouvoir résister aux hautes températures lorsque le pneu touche la piste, mais aussi affronter le froid polaire à haute altitude, le tout en étant le moins lourd possible, en assurant le plus grand nombre de décollages et d'atterrissages. L'équation est particulièrement difficile. Pour la petite histoire, sur Mirage III, l'usure était calculée de la façon suivante : chaque pneu disposait d'un crédit de 80 points. Chaque décollage et atterrissage, en fonction de la masse de l'avion, coûtait un lot de points. Arrivé à zéro, remplacement obligatoire ! Le rechapage est possible, parfois jusqu'à 15 opérations de ce type sur les pneus actuels.

La conquête de l'Amérique

Pour Michelin, la percée se fit d'abord dans le secteur militaire. Le 28 avril 1981, un Mirage III fit pour la première fois un vol d'essais à Brétigny avec des pneus à carcasse radiale. L'armée de l'Air passa ensuite commande pour le « Mirage » 2000. Puis l'Us Air Force suivit pour équiper d'abord les Mc Donnell Douglas F-15E, puis les F-4 « Phantom » II, avant de généraliser cet équipement à pratiquement l'intégralité de sa flotte. Ce fut aussi le cas de l'Us Navy pour ses avions.

Dans le secteur civil, Airbus s'intéressa à la technologie radiale au début des années 1980. En décembre 1983, la certification commerciale fut obtenue pour l'Airbus A300. Air France équipa sa flotte en Michelin.

Dès lors Bibendum va faire le tour du monde sur les avions. Cette ascension vers les sommets passa par la reprise de BF Goodrich en 1988/1989. La gamme s'étoffait des petits avions de tourisme jusqu'à la navette spatiale. Précisons en passant que, compte tenu de sa vitesse d'atterrissage de 400 km/h après un passage dans l'espace, ses pneus servaient une seule et unique fois. Autre avion très contraignant pour ses pneumatiques, le Concorde. L'accident du F-BTSC le 25 juillet 2000, suite à l'éclatement d'un pneu après avoir heurté une lamelle métallique tombée sur la piste, souligne l'importance du pneumatique. Pour revoler l'avion a bénéficié d'une amélioration du pneu radial sous la forme du système NZG (Near Zero Groth - grandissement presque nul), qui incorpore un composite fait de nylon et de fibres d'aramide. Ces fils renforcés réduisent l'extension de la carcasse (structure) du pneumatique (due aux effets de la pression et de la force centrifuge au décollage) à moins de 3 %, à comparer aux 8 % observés dans un pneumatique radial nylon et à 12 % pour un pneumatique diagonal conventionnel.

Autre succès au début des années 2000 avec l'Airbus A380. Le NZG équipe aujourd'hui le Dassault Falcon 8X et l'Airbus A350. Son fabricant annonce jusqu'à 20 000 dollars de gain par rapport à un pneu radial classique, de quoi ravir les finances des compagnies aériennes. Autre atout et non des moindres : 10% de masse gagnée, de quoi faire rêver les

Michelin, un grand nom de l'aviation

André Michelin, cofondateur avec son frère Edouard de la société éponyme, s'intéressa à l'aviation dès ses débuts. Il fit partie des membres fondateurs de l'aéro-club de France en 1898. Il fut un généreux donateur en finançant des compétitions – 100 000 francs pour celui qui rejoindrait Paris au sommet du Puy-de-Dôme. Il incita le gouvernement à développer une aviation militaire, éditant à un million d'exemplaires la brochure : « Notre avenir est dans l'air ». Pendant la Guerre, Michelin finança la production de bombardiers ainsi qu'une école qui bénéficia de la première piste en dur. Après le conflit, André Michelin poursuivit ses encouragements, notamment en proposant de nouveaux prix et, en 1930, en faisant paraître un guide aérien. La disparition d'André Michelin en 1931 marqua un coup d'arrêt dans l'association du nom avec l'aviation. Le projet de fabriquer des chasseurs VG 33 à Clermont-Ferrand resta sans suite en 1940. Le grand retour se fit avec l'introduction du radial et la reprise des activités au début des années 1980.



Le pneu est poussé au maximum de sa résistance lors de l'appontage. Ici un Rafale Marine. (Dassault Aviation/Alex Paringaux)



22 pneus pour le train d'atterrissage de l'Airbus A380. Un record dans l'aviation civile.



Les pneus nécessitent une surveillance toute particulière, ici ceux de l'Airbus A350-1000. (Cyril Abad/CAPA Pictures/Safran)

ingénieurs aéronautiques qui traquent sans relâche le moindre kilogramme.

La famille des Boeing 737 Max est livrée avec du NZG, de même que le 777 du même constructeur. En 2018, Michelin annonce détenir la moitié du marché de l'équipement en pneus des avions de ligne. Le catalogue va des Daimond et Cessna de tourisme jusqu'au Rafale, en passant par l'avion expérimental solaire *Solar Impulse* et le Comac 919 chinois, concurrent de l'Airbus A320. Précisons que, sur le marché mondial des pneus d'avions, émergent des concurrents chinois.

Le pneu qui parle

Dans un monde de l'aéronautique hyperconnecté, le pneu est désormais branché en direct avec les équipes de maintenance. Selon ses promoteurs



Pneus d'avions, des chiffres

- 55°, chiffre le plus bas des températures rencontrées par un pneu d'avion
- 3 millions de pneus signés Michelin en 2017
- 15 bars, pression moyenne. Le pneu est testé jusqu'à quatre fois ce chiffre
- 18 roues pour un Boeing 747 et un Airbus A350-1000
- 22 roues pour un Airbus A380
- 24 kilos, masse du pneu du train principal du Rafale Marine
- 27 bars, pression de gonflage des pneus du Rafale Marine
- 28 bars, pression des pneus du SR-71
- 35 tonnes, masse supportée par un pneu
- 60 % de l'usure se fait au moment du touché de la piste
- 199°, température qui déclenche un fusible dégonflant le pneu pour éviter une surpression
- 300 atterrissages pour le Michelin NZG sur Airbus
- 300 fois son poids - résistance du pneu
- 24 000 dollars, prix d'un pneu de F-18 Hornet
- 4 000 dollars, prix catalogue pour le plus cher



L'atterrissage met à contribution les pneus.
(Vince Streato/Creative Center/Safran)

Michelin et Safran, grâce à des capteurs embarqués, le système PreSense permet de connaître en direct la pression du pneumatique, ce qui évite au sol le contrôle classique avec intervention manuelle sur la valve et la roue ou bien au moyen d'un manomètre.

Toujours dans le domaine de l'innovation plane est lancée l'idée de mettre en rotation les roues des avions avant qu'elles ne touchent le sol, pour éviter que les pneus et la piste ne soient abîmés au moment de l'impact.

« Des études scientifiques ont montré que l'usure pourrait être réduite de 99 % en mettant en rotation les pneus avant que l'avion ne touche le sol », explique Claudio Bonvino, étudiant d'un programme de recherches de l'Ecole polytechnique dans le cadre du concours Fly Your Ideas organisé par Airbus. Pneu et aviation vont continuer à évoluer de concert. ■



Avec PresSense, le pneu envoie directement les informations techniques le concernant, pour faciliter sa maintenance. (Michelin)



Des avions hyper câblés

Commandes électriques de vol et autres ordinateurs de gestion des nombreux systèmes embarqués passent tous par de nombreux réseaux de câblage. Pas d'avions sans câbles au XXI^e siècle.

Par Alexis Rocher

En matière de câblage, les chiffres donnent le vertige : 24 km sur le F-16, premier chasseur à commandes électriques, 67 km sur un 737-700, 275 sur un Boeing 747-400 et 530 km sur l'Airbus A380. Le câble est au cœur de l'industrie aéronautique du XXI^e siècle.

Les gros câbles dits de puissance servent notamment à démarrer les ré-



Tous les câbles sont réunis en usine sous forme de harnais installés sur des gabarits. Pas d'avions modernes sans des kilomètres de câbles !
(Pierre Soissons/Safran)

acteurs des avions, les câbles de transmissions de données sont utilisés pour les commandes de vols notamment mais aussi pour les loisirs à bord qui dépendent aussi des câbles optiques. Les câbles résistants au feu sont capables de continuer à transmettre leurs données au cockpit pendant un certain temps, en cas d'incendie.

A la main !

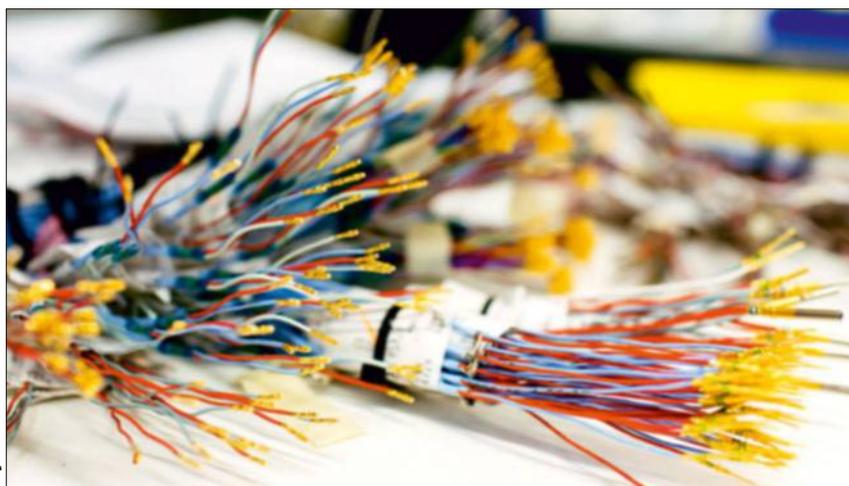
Ces câbles sont regroupés en harnais qui doivent être déroulés, connectés, et installés dans la cabine, sous le plancher, sous les sièges, au plafond et même dans les cloisons de l'appareil. Cloisons qui sont elles-mêmes isolées par une couche de laine de verre. En usine, ils sont disposés sur des tables appelées gabarits, où se trouve dessiné préalablement le plan général. Notons que 70% des petites mains qui œuvrent dans l'assemblage du câblage est féminin, car réputé plus méticuleux.

Sur le Boeing 787, une cinquantaine de fournisseurs mondiaux approvisionnent Safran avec plus de 180 km de câbles et de gaines protectrices, et 330 000 composants (connecteurs, contacts, coques, etc.), qui permettent à l'équipe Safran d'installer environ 1 500 harnais, panneaux électriques, boîtes de jonction et conduits de train d'atterrissage sur chaque avion. Safran Electrical & Power a livré au printemps 2017 son millionième harnais électrique pour le Boeing 787. Sur le Comac C919, il a fourni 52 km de câblage et 725 harnais électriques.

Les avions de type A 320 ou A 330 étaient équipés de câbles 100 % en cuivre. L'A 380 utilise des câbles 70% en cuivre et 30 % en aluminium, qui est un matériau plus léger. L'A 350 a des câbles 50 % en cuivre et 50 % en aluminium. Ainsi, alors qu'un A 320 compte 200 km de câblage (contre 67 km pour un 737 à commandes classiques), l'A 350, qui est un grand appareil, en accueille 350 km, grâce au gain de poids.

Des câbles imprimés

Les câbles, totalement incontournables aujourd'hui, seront-ils toujours présents à l'avenir ? Airbus s'est associé à Altran pour mettre au point une technologie qui permettrait d'en éliminer une partie dans les avions, car ils sont lourds, coûteux, et nécessitent encore une large part d'interventions manuelles. Le tandem a développé une encre, composée de polymères et de particules d'argent, en mesure de transmettre données et puissance électrique. ■



(Cyril Abad / CAPA Pictures / Safran)



Boîtes noires, pour plus de sécurité

Les boîtes noires sont toujours d'actualité en cas d'accident d'avion. Présentation d'un équipement indispensable pour la sécurité aérienne.

Par Alexis Rocher

Parler de boîtes noires c'est évoquer la sécurité aérienne. Au-delà de la compréhension des accidents, l'objectif visé consiste à éviter d'autres drames. Mais commençons par enfoncer une porte ouverte : les fameuses boîtes noires sont orange. Néanmoins elles furent bien noires à l'origine.

L'hussenographe

Tout commence par les recherches d'un ingénieur français, François Hussenot. Polytechnicien, il commence sa

carrière en 1935 au Centre des matériels aériens (CEMA) de Villacoublay. Il se spécialise dans l'étude, la réalisation et le perfectionnement des instruments utilisés aux essais en vol. En 1939, il conçoit un enregistreur des données de vol à partir de photographies faites en chambre noire – d'où l'expression de « boîtes noires » (les Anglo-Saxons parlent de « flight recorder »). L'appareil prend le nom d'hussenographe. Pour la petite histoire, en juin 1940, craignant que les Allemands ne s'emparent de son invention, Hussenot, en poste en



Les boîtes noires ont permis de comprendre ce qui s'était passé le 1^{er} juin 2009 quand un Airbus A330 (vol 447) s'est abîmé dans l'Océan Atlantique. (DR)



Les boîtes noires de l'Airbus A330 (vol 447) furent localisées au printemps 2011. (BEA)



L'enregistreur de cockpit (CVR) du vol Germanwings du 24 mars 2015 : un témoignage de la violence du choc. (DR)



L'enregistreur des paramètres (ou FDR), qui renseigne sur les paramètres du vol. (BEA)



Il a fallu de longues recherches pour retrouver l'épave de l'Airbus A330 du vol 447. Les boîtes noires n'émettaient plus mais purent quand même être analysées. (BEA)

Aquitaine, cache sa machine en l'enfouissant dans une dune du bassin d'Archaon. Sable et vent vont engloutir le précieux hussenographe. Heureusement la péripétie ne mit pas un terme à la boîte noire. Hussenot fonda en 1947, avec son associé Marcel Ramoflo, la Société de fabrication d'instruments de mesure (Sfim) à

Massy. Il fait alors breveter un nouvel enregistreur qui projette sur une pellicule des paramètres comme la vitesse, l'altitude, les vibrations, les températures. C'est le succès pour la Sfim, qui fabrique en grande série ces enregistreurs photographiques de vol que les spécialistes connaissent sous le nom de HB, pour Hussenot et Beau-

doïn, ce dernier étant le fabricant qui aida l'ingénieur à mettre au point le système. En 1999 la Sfim est rachetée par Sagem, devenue ensuite Safran. Si la fabrication des boîtes noires a été arrêtée par Safran, l'établissement de Massy Safran porte le nom de François Hussenot. D'autres ingénieurs travaillent sur des boîtes noires avec enregistreurs magnétiques. Signalons aux Etats-Unis le professeur James J. « Crash » Ryan de l'université du Minnesota (par ailleurs détenteur d'un brevet de ceinture de sécurité pour voiture) et Edmund A. Boniface. Ingénieur chez Lockheed il breveta un enregistreur de son dans le cockpit.

Deux boîtes orange

Les boîtes noires sont au nombre de deux dans un avion. Elles sont généralement en acier et en titane, et elles sont placées à l'arrière de l'appareil, partie la plus préservée en cas de crash. La première boîte noire concerne les conversations en provenance du cockpit. Le CVR (Cockpit Voice Recorder-enregistreur phonique) enregistre les échanges entre les pilotes ou avec les contrôleurs,



Indispensable pour faire parler les boîtes noires : le laboratoire du Bureau enquête et analyse installé au Bourget. (BEA)

Que s'est-il passé avec l'Airbus d'EgyptAir ?

À la suite de l'accident survenu le 19 mai 2016, en Méditerranée, à l'Airbus A320 exploité par EgyptAir, qui fit 66 victimes, une enquête de sécurité a été ouverte. En application des textes internationaux en vigueur, l'accident s'étant produit dans les eaux internationales, l'Égypte, en sa qualité d'État d'immatriculation et d'exploitation de l'avion, est en charge de la conduite de cette enquête. Le BEA a néanmoins nommé un représentant accrédité de la France comme État de conception de l'avion, assisté de conseillers techniques du constructeur Airbus. Le NTSB (National Transportation Safety Board : homologue du BEA aux États-Unis) a également nommé un représentant accrédité par les États-Unis comme État de construction des moteurs. Le travail du BEA a consisté initialement à conseiller son homologue égyptien puis à participer aux opérations de recherche en mer de l'épave de l'avion. Dans le même temps, la collaboration des enquêteurs a permis de collecter et d'exploiter les premiers éléments disponibles, notamment des messages ACARS - système d'envoi de messages entre l'avion et l'opérateur permettant notamment la transmission d'informations destinées aux opérations de maintenance. Le BEA privilégie, dans un communiqué de juillet 2018, l'hypothèse précédemment évoquée de la propagation rapide d'un incendie et souhaite que les investigations sur cette hypothèse soient poursuivies « dans l'intérêt de la sécurité aérienne ».



L'Airbus A320 d'EgyptAir, accidenté le 19 mai 2016. Il a fait l'objet d'une enquête internationale. (DR)

ainsi que l'environnement acoustique du poste de pilotage (bruits, alarmes sonores). La seconde boîte dite FDR (Flight Data Recorder-enregistreur de paramètres) enregistre les paramètres de vol comme la trajectoire, l'altitude, la vitesse, ou encore la pression intérieure. La durée totale d'enregistrement est de 25 h pour le FDR, et de 2 h pour le CVR. Pendant le vol, les données enregistrées viennent de façon continue remplacer les données les plus anciennes, permettant ainsi d'avoir en permanence des informations à jour. Les boîtes noires les plus sophistiquées enregistrent jusqu'à 1 300 paramètres ; elles peuvent résister à une température de 1 100 °C pendant une heure ou supporter la pression jusqu'à 6 000 mètres sous la surface de l'eau. Ces caractéristiques permettent aux enquêteurs d'extraire avec succès les données des enregistreurs de vol après un accident dans presque 100 % des cas selon le BEA. Dans le domaine de l'aviation civile, il existe aujourd'hui deux technologies d'enregistreurs de vol : la bande magnétique et la mémoire électronique. Cependant les enregistreurs à mémoire électronique remplacent progressivement tous les enregist-

treurs à technologie magnétique, qui devraient disparaître complètement d'ici quelques années.

Le BEA enquête

En France, les boîtes noires arrivent au BEA (Bureau enquête et d'analyse), chargé de récupérer les données et de les exploiter. Avant même toute lecture des informations, il faut vérifier l'état des composants électroniques et éventuellement les réparer. Précisons que, devant l'importance que peuvent avoir les conclusions d'une enquête, les ouvertures des boîtes noires sont systématiquement filmées pour ne pas prêter à critique par la suite. Toutes les données sont récupérées.

Celles du FDR doivent d'abord être converties en valeurs de paramètres de l'avion. En effet, le fichier extrait de l'enregistreur est un fichier binaire appelé « fichier brut » ; le décodage de ce fichier brut est réalisé à partir d'un document de décodage propre à chaque avion. Les valeurs des paramètres et leurs évolutions au cours du temps peuvent être ensuite représentées sous forme de courbes ou de tableaux, et faire l'objet de calculs

relatifs au comportement de l'avion.

Les données du CVR permettent aux enquêteurs de procéder à l'écoute et à la transcription des enregistrements phoniques. Il est possible également d'effectuer, à partir de ces enregistrements audio, des analyses spectrales permettant d'identifier des alarmes ou des bruits dans le cockpit.

Le décryptage des données est une étape souvent difficile, tant les sons du CVR sont parfois inaudibles. Plusieurs logiciels concourent à recouper les données. Parallèlement des pièces sont récupérées sur le lieu de l'accident avant d'être analysées en laboratoire, là encore pour comprendre ce qui s'est passé. Les enquêtes sont minutieuses et souvent longues, ce qui est parfois difficile à admettre pour les familles des éventuelles victimes.

La généralisation des transmissions de données en temps réel va sans doute apporter de plus en plus d'éléments pour analyser les accidents. À partir de 2019, tous les longs-courriers qui sortiront des chaînes d'assemblage d'Airbus seront équipés d'un enregistreur de vol qui s'éjectera automatiquement en cas de situation d'urgence. Les boîtes noires seront toujours indispensables. ■



Cabines, histoire de



Pas de cabine prévue pour les premiers passagers, comme pour cette Canadienne en 1912. (DR)



tailles

La gigantesque cabine de l'Airbus A380. Onze sièges de front. (Airbus)

Quatre milliards de passagers ont voyagé dans des cabines d'avions en 2017. Celles-ci n'ont pas toujours été un empilement de sièges...

Par Alexis Rocher

Il faut bien le reconnaître, pour le passager moyen ivre de vacances à prix modiques, la cabine d'un avion c'est un siège pas confortable tant il devient vite étriqué, un espace réduit au minimum vital. Pour peu que les voisins s'endorment et bloquent le passage, alors c'est un pénible périple de plusieurs heures qui s'annonce. Les compagnies aériennes les plus généreuses proposent un écran sur le siège de devant, qui recèle une ribambelle de films et de jeux. Mais pas de mètre carré en plus. Les plus chanceux bénéficient du paysage offert par un hublot. Boeing et Airbus font le maximum pour agrandir ledit hublot sur leurs longs-courriers mais décidément la cabine prend assez vite des airs de cage. Le transport de passagers ne fut pas toujours un concours d'empilement de sièges dans un minimum de place, le tout pour un coût réduit.

Le nez au vent

Avant la Première Guerre mondiale pas de cabine. Le transport aérien existe sous la forme de baptêmes



Fin des années 1920 : salon dans le Dornier X et bar pour le Laté 631. (DR/Fondation Latécoère)



Premiers avions commerciaux, premières cabines. Siège en osier, pas de chauffage, pas d'hôtesse de l'air. (DR)

de l'air pour curieux. Le passager s'installe sur un siège rudimentaire, non loin du pilote. Tout change après la fin du conflit. Des esprits ambitieux bâtissent des compagnies aériennes et proposent des liaisons régulières. Le billet est cher, le confort réduit à sa plus simple expression. Prière de s'équiper de vêtements chauds ! D'anciens bombardiers remplacent les bombes par des passagers. Guère confortable. Pour des raisons de poids pas question d'installer autre chose que des sièges en osier. Impossible de tenir une conversation, le bruit des moteurs est assourdissant. Il n'est pas rare que les passagers soient vraiment malades tant les avions sont instables, proménés dans le ciel par les turbulences. Le sac à vomi est probablement le premier objet que connaît le passager.

Néanmoins la notion de confort n'est pas oubliée. Il faut augmenter la puissance des moteurs pour agrandir la cabine et surtout mieux l'équiper. Le service à bord des trains avec les wagons Pullman et des paquebots sert alors de référence. Cependant les premières hôtesses de l'air, au milieu des années 1920, sont des infirmières tant il faut d'abord s'occuper de la santé des passagers avant même de leur confort. L'idée de proposer des cabines dignes de celles des paquebots va finir par prendre forme avec les grands hydravions de la fin des années 1920. Le Dornier X marque ainsi les esprits avec ses quelque soixante passagers - au prix de 12 moteurs et une paisible vitesse de croisière de 170 km/h. L'avion resta au stade de l'exemplaire unique mais l'élan était donné.

Un air de paquebot de luxe

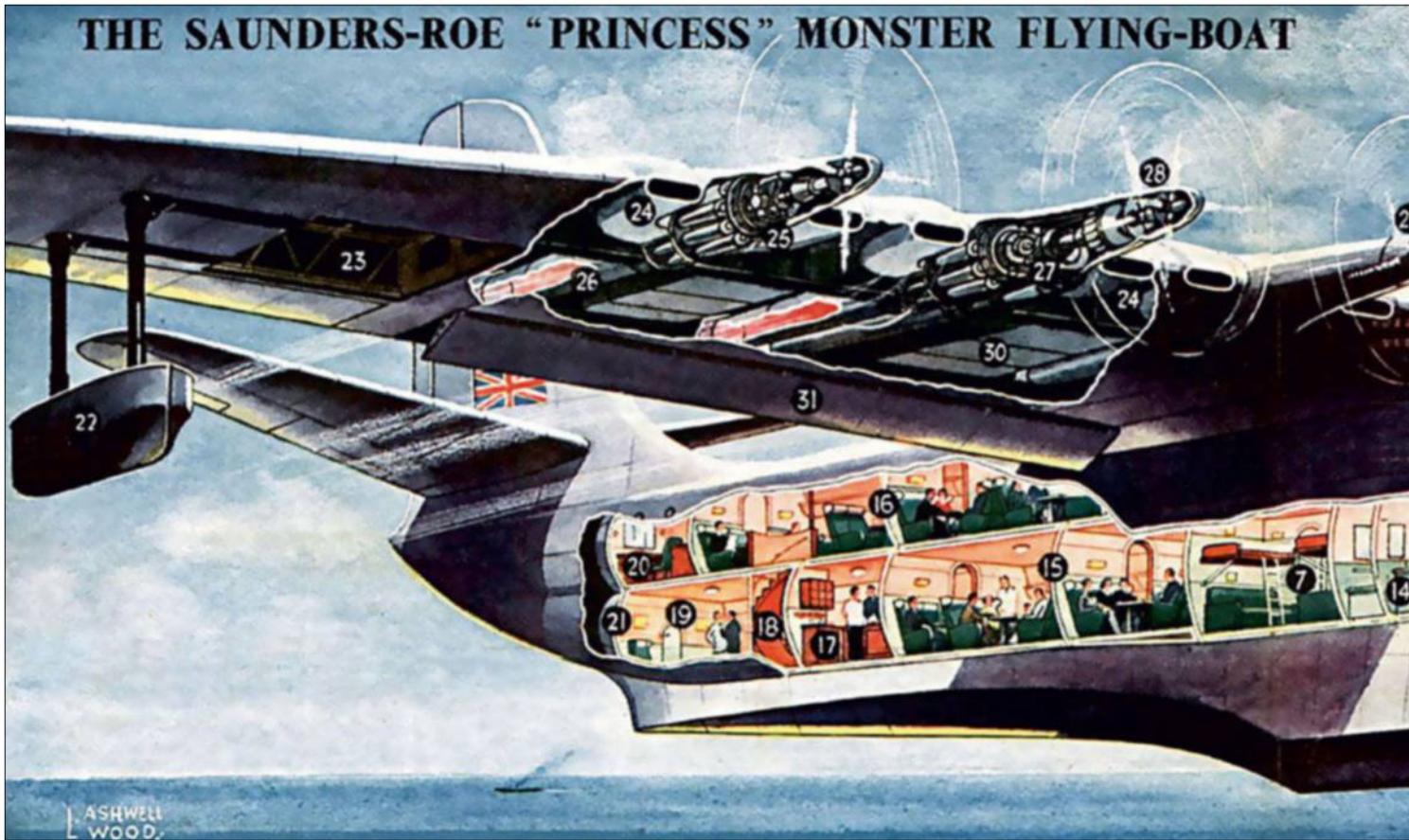
Les constructeurs français se lancèrent aussi dans le grand hydravion. Beaucoup de prototypes, de petites séries mais pas véritablement de révolution dans les aménagements des cabines. Le Latécoère 631 en est le dernier représentant. Les neuf exemplaires de série proposent à 54 passagers des traversées de l'Atlantique dans un confort proche de celui du *Normandie* qui avait marqué les esprits avant guerre. L'heure n'était pourtant plus aux paquebots du ciel après 1945. Les Britanniques l'apprirent à leur dépens avec le *Saunders-Roe Princess*, un colosse capable d'accueillir 100 passagers. Las, les hydravions transatlantiques sont passés de mode. Apparaît à cette époque, au sein des compagnies aériennes, de grands quadrimoteurs, les Lockheed



Le Laté 631 jouait la carte du luxe et du confort pour ses passagers. (DR/Fondation Latécoère)



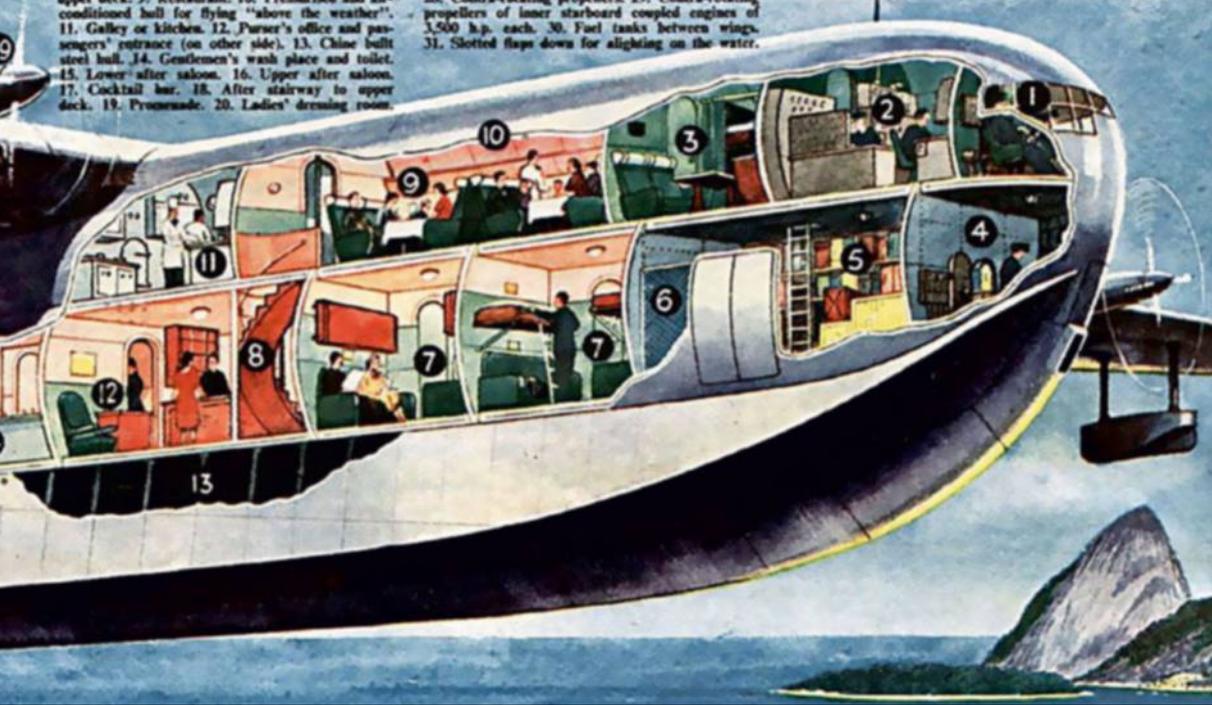
Fin des années 1940. Boeing poursuit l'idée du salon volant avec le 347. (Boeing)



Three of these 140-ton flying-boats are under construction for the world's longest stage air routes, carrying 104 passengers. They are powered by ten Bristol Proteus propeller gas-turbines giving a total power output of 35,000 h.p. We show an interior design scheme for one arriving at Rio de Janeiro on the South American route.

KEY TO NUMBERS

1. Captain and First Officer. 2. Control room. Engineer Navigator and Wireless Operator. 3. Crew's rest room. 4. Mooring compartment. 5. Passengers' baggage and freight hold. 6. Mails and Crew's entrance. 7. Four-berth cabin. 8. Stairway to upper deck. 9. Restaurant. 10. Pressurised and air-conditioned hull for flying "above the weather". 11. Galley or kitchen. 12. Purser's office and passengers' entrance (on other side). 13. Chine built steel hull. 14. Gentlemen's wash place and toilet. 15. Lower after saloon. 16. Upper after saloon. 17. Cocktail bar. 18. After stairway to upper deck. 19. Promenade. 20. Ladies' dressing room. 21. Sealed ends of pressurised hull. 22. Retractable wing float extended. 23. Recess for wing float. 24. Air intakes. 25. Single propeller gas-turbine engine of 3,500 h.p. 26. Jet tube. 27. Coupled propeller gas-turbine engines of 3,500 h.p. each. 28. Contra-rotating propellers. 29. Contra-rotating propellers of inner starboard coupled engines of 3,500 h.p. each. 30. Fuel tanks between wings. 31. Slotted flaps down for alighting on the water.



Le *Princess* poussa à son paroxysme le concept de palace volant. A la fin des années 1940, l'ère des hydravions était passée, et le *Princess* tout comme le Laté 631 furent abandonnés. (DR)

CONFORT CARAVELLE, CONFORT AIR FRANCE

Confort à la Française

La décoration intérieure de Caravelle affirme la tendance nouvelle inaugurée par Air France avec le Super Starliner : couleurs fraîches et gaies, tonalités claires, tapis moelleux et matériaux modernes. Quant au service de bord, il est dans la tradition du « service Air France » : prévenance discrète et courtoise. Et, bien entendu, la cuisine française est, elle aussi, du voyage!



Les fauteuils de Caravelle ont été tout spécialement conçus par AIR FRANCE, en vue d'assurer aux passagers un confort parfait.



Air France vante le confort « à la française » dans cette brochure de présentation de la Caravelle à la fin des années 1950. Le transport aérien est encore très largement associé au luxe à cette époque. (Air France)

Voyager confortablement ? Voilà l'idée avec les avions d'affaires ! (Dassault Aviation)



Constellation et Super Constellation, la famille des Douglas DC4/6/7 et le Boeing 347. Les diamètres des fuselages sont moins larges, limitant les fastueux aménagements. Pourtant Boeing propose un salon avec bar au niveau des soutes. Air France se fait fort d'illustrer le luxe à la française avec le Parisien spécial sur Paris-New-York. Siège basculant, petites cabines couchettes au programme. Les premiers jets qui arrivent à la fin des années 1950 suivent dans un premier temps la même route. Les passagers des premières Caravelle ne sont pas déçus.

En grand, en gros

Tout va changer ou presque au milieu des années 1960 avec la généralisation progressive des charters. Un seul objectif : le ticket pas cher. Commence alors un savant jeu pour accumuler les sièges dans les avions. Salons et bars disparaissent. Le cas du Boeing 747 est symptomatique. Il est dans un premier temps proposé par son constructeur comme un 347, avec salon et bar, au premier étage cette fois-ci. L'aménagement est néanmoins le plus souvent remplacé par des

sièges. Avec le 747 arrive une nouvelle génération d'avions de lignes dite « Wide body », large fuselage. Plus large, 10 passagers de face avec plusieurs rangées de sièges séparées par des couloirs. Lockheed propose le Tristar, McDonnell Douglas le DC-10. Chacun se prévalait d'avoir le fuselage le plus large, les sièges les plus confortables. Tout est pensé pour tenir le moins de place, comme par exemple les galley pour conserver les repas. Des jeux de cloisons permettent de varier les aménagements. Cette course à l'empilement permet d'embarquer jusqu'à 660 passagers sur le 747. Dans

The Lockheed L-1011 is on the way. It's a plane that will transport you into a new era of flight—with a new measure of comfort. And Eastern Airlines will be flying it. This year.

Two-by-two seating, even in coach, means you'll never be more than a step away from an aisle. No more necklines.

Overhead compartments will safely hold briefcases and small articles. Suite cases too being in center divider compartments. Full-length coats? They'll go in lockaway closets, of course.

Double-width doors will get you on and off easier and faster.

A below-deck galley will serve up restaurant-style meals speed by your piping hot on special carts.

Two extra-wide aisles will make it easier for you to move about...and for business to serve you.

Wide seats and armrests will give every passenger greater comfort. And separated cabin with room-height ceilings and straighter walls will make you feel more at home.

Quieter power, particularly on takeoffs and landings, will make the L-1011 a better neighbor to those who live or work near airports. It's the quietest of the big jets.

Reclining seats and legrests will come from seat rows spaced widely apart. And added legroom will eliminate slumping to get in and out of window seats.

The Lockheed L-1011
Lockheed-California Company, a Division of Lockheed Aircraft Corp.

The plane that pampers people.

« L'avion qui vous dorlote » affirme cette publicité de la compagnie Eastern pour ses Lockheed Tristar dotés de cabines grande capacité. (Eastern)



la même veine on trouve l'Airbus A380. Mais le gigantisme a ses limites. 853 passagers maximum en théorie. Les compagnies aériennes restent relativement assez prudentes avec le plus souvent autour de 550 passagers. Il faut en effet vendre un maximum de sièges, ce qui n'est pas toujours évident sur nombre de destinations où des avions plus petits font l'affaire. Les généreuses proportions de l'A380 permettent au bar de réapparaître.

Offrir un confort maximum

La course au nombre de sièges est aussi ralentie par la volonté de proposer des sièges plus rentables à destination d'une clientèle plus fortunée, habituée des classes business. Cette fois-ci le critère est bien d'offrir un confort maximum - toujours en prenant le moins de poids possible ! Les compagnies rivalisent d'installations princières, et notamment des cabines privatives. Reste pour les plus fortunés la solution de l'avion d'affaires. Vous pensez que tout est possible pourvu que le budget suive ? Que nenni ! Très rapidement des problèmes de poids et de sécurité limitent les ambitions d'installer des baignoires en marbre. Multiplier les jeux de lumières à bord ? Possible, mais il ne faut pas oublier que l'alimentation électrique empêche un jour d'utiliser une cafetière faute de pouvoir la brancher sans provoquer un court-circuit.

Alors à quoi ressemblera la cabine passagers du futur ? Airbus propose des cloisons pouvant reproduire le paysage extérieur et faire du voyage aérien un grand spectacle. Chic ? ■



Exercice d'aménagement de cabine en réalité virtuelle pour des ingénieurs. (Frank Rogozienski/CAPA Pictures/Safran)



Casse-tête chinois. Comment installer le plus d'éléments possible dans le plus petit espace disponible ? (Frank Rogozienski/CAPA Pictures / Safran)



C'est le retour du bar à bord de certains A380. (Airbus)

LE TOME 2 A POSSEDER ABSOLUMENT !

DÉDICACÉ
PAR L'AUTEUR !



Avions de rêve

Les plus beaux avions de collection en vol
par Xavier Méal

Tome 2

48,90 €
Port compris

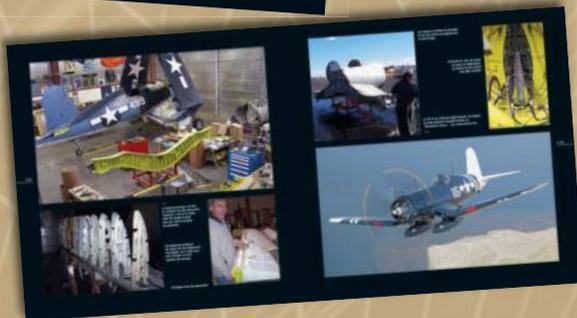
176 pages
Format 250 x 250 mm
Ref.4134

DANS CE LIVRE, 25 AVIONS D'EXCEPTION EN 200 PHOTOS MAGNIFIQUES

Biplans d'avant-guerre, warbirds de la Seconde Guerre Mondiale, avions postaux, jets... ces 25 portraits d'avions de légende sont aussi les 25 histoires de ces amateurs passionnés qui leur ont rendu la vie, malgré tous les obstacles. Pénétrez dans l'intimité de ces machines de rêve...

200 photos extraordinaires, dont la moitié prises en vol et aux quatre coins du monde par l'auteur.

**Recevez votre exemplaire,
personnellement dédié
par l'auteur Xavier Méal**



> **COMMANDEZ MAINTENANT**

au **03 44 62 43 79**

ou sur **boutiquelariviere.fr**

La librairie spécialisée

Complétez votre collection



Collection aviation moderne



HS
n°10



HS
n°9



HS
n°7



HS
n°6

Commandez sur boutiquelariviere.fr

BARNSTORMER



Retrouvez toute la collection sur

WWW.BARNSTORMER.FR



© Xavier BEJOT - BARNSTORMER partenaire du Air Legend - Un grand merci à France's Flying Warbirds (c)