

Sommaire

Préface	9
----------------------	---

Introduction

Les spécificités de l'innovation	15
Innovation et découverte scientifique.....	15
Innovation et recherche appliquée.....	16
Innovation et développement exploratoire.....	17
Les différents genres d'innovations.....	17
La démarche de l'innovateur, comparée à celles du chercheur et de l'ingénieur.....	19
Innovation et continuité.....	21

Chapitre 1

Exemples historiques d'innovations en Aéronautique	25
Le grand visionnaire.....	25
1.1 – Les scientifiques et les précurseurs.....	26
1.2 – Les pionniers de l'aviation.....	36

Chapitre 2

Les trois grandes ères de l'aviation	51
2.1 – L'ère des appareils à mâts et à haubans.....	51
2.2 – L'ère des monoplans à revêtement métallique.....	75
2.3 – L'ère des avions à réaction.....	91

Chapitre 3

Les domaines d'innovations	121
3.1 – Les progrès en aérodynamique.....	121
3.2 – Les innovations en propulsion : turboréacteur, turbopropulseur, turbofan.....	124
3.3 – Les innovations en matériaux et structures	128
3.4 – Trains d'atterrissage et systèmes associés.....	131
3.5 – Les commandes de vol électriques.....	134
3.6 – Les facteurs humains.....	135
3.7 – Innovations pour l'aviation de transport depuis 1945.....	137
3.8 – Vol supersonique et vol hypersonique.....	151

Chapitre 4

Les modalités de l'évolution de l'aéronautique	157
4.1 – Naissance, croissance, vie, déclin, disparition d'une innovation.....	157

4.2 – Les voies en impasse.....	168
4.4 – La voie royale.....	173
Chapitre 5	
Innovations et Systèmes	175
5.1 – Systèmes d’armes.....	175
5.2 – La matrice Innovations-Systèmes.....	186
5.3 - L’innovation de concept.....	189
5.4 – L’ASMP : un exemple d’innovation, pour le concept et la technologie	195
5.5 – Innovations et familles de systèmes.....	201
Chapitre 6	205
Les hélicoptères	205
6.1 – Les premiers appareils à voilure tournante.....	205
6.2 – La propulsion des hélicoptères modernes.....	214
6.3 – Les hélicoptères français.....	216
Chapitre 7	
Innovations en organisations	225
Chapitre 8	
Les formules nouvelles : espoirs ou mirages ?	227
8.1 – L’avion à effet de sol, ou hydroaéroplane.....	227
8.2 – L’aile volante.....	227
8.3 – Avion de transport de très grande capacité, à formule canard.....	233
8.4 – Avions de transport à écoulement laminaire.....	234
8.5 – L’avion de transport avec turboréacteur à hydrogène.....	237
8.6 – L’essor vertical	238
8.7 – Le transport à grande vitesse.....	243
8.8 – Les drones.....	244
Chapitre 9	
Conclusion et perspectives	253
Améliorer la propulsion	255
Améliorer les cellules	255
Optimiser la mission	256
Optimiser la gestion du trafic aérien.....	256
Annexe A 1 – Progrès des connaissances en Aérodynamique.....	261
Annexe A 2 – La dualité militaire – civile.....	277
Annexe A 3 – Le tronc commun avec l’automobile.....	306
Annexe A 4 – Le tronc commun avec la marine.....	311

Sommaire

Annexe A 5 – Le turboréacteur : les débuts et les controverses initiales	315
Annexe A 6 – Les débuts de l’aéronautique : Quatre grands pionniers	317
Annexe B 1 – Le Centre de Chalais-Meudon, de l’aérostation à l’aéronautique.....	319
Annexe B 2 – L’ONERA, de l’Aéronautique à l’Aérospatial.....	327
Annexe B 3 – L’Institut aérotechnique et les Instituts de Mécanique des Fluides.....	333
Annexe B 4 – Les écoles françaises de formation d’ingénieurs dans le domaine aéronautique et spatial	335
Annexe B 5 – Les organismes de recherche et d’essais d’Europe Occidentale.....	341
Annexe B 6 – Aerial Experiment Association.....	347
Annexe B 7 – Le NACA, précurseur de la NASA.....	349
Annexe B 8 – La DARPA.....	355
Annexe B 9 – Autres organismes de recherche aérospatiale.....	361
Annexe C 1 – Les débuts de l’observation aérienne	363
Annexe C 2 – Les débuts du moteur à explosion et de ses applications aéronautiques.....	381
Annexe C 3 – L’aviation militaire, de 1919 à 1939.....	389
Annexe C 4 – Le transport aérien commercial.....	415
Annexe C 5 – De Concorde à Airbus.....	429
Annexe C 6 – L’impact du trafic aérien sur l’environnement.....	435
Annexe C 7 – L’Avionique en France.....	455
Annexe D 1 – Les fratries en aéronautique.....	459
Annexe D 2 – Personnalités françaises ayant eu deux carrières techniques.....	473
Annexe D 3 – Autres grands innovateurs français en aéronautique.....	487
Annexe D 4 – Constructeurs et inventeurs étrangers.....	541
Annexe E 1 – Les innovations au Salon de l’Aéronautique	593
Annexe E 2 – Les innovations présentes dans deux grands musées de l’aéronautique.....	605
Annexe E 3 – Le GIFAS, l’ANAE et l’AAAF.....	611
Annexe F – Dates mémorables d’innovations aéronautiques, de vols et de lancements marquants.....	615
Bibliographie	723
Glossaire	729

Préface

*de l'Ingénieur général Émile Blanc,
président du Comité pour l'histoire de l'aéronautique*

Quand Jean Carpentier m'a demandé de présenter son ouvrage *Cent vingt ans d'innovations en Aéronautique*, j'ai été ravi et extrêmement honoré de sa proposition. D'autres auraient été plus compétents que moi et mieux à même de le faire que je puis l'être, mais peut-être, n'ayant pas été aussi proches du travail accompli, n'auraient-ils pu rendre l'hommage que mérite cet aboutissement de tous les efforts de recherche, d'approfondissement et d'interprétation de l'auteur et surtout témoigner de la permanence de son action pour faire avancer à la fois la science et la mise en œuvre des résultats acquis dans le but de doter notre pays et, à travers lui, l'Europe d'une aéronautique du plus haut niveau. Dans l'exercice de ses différentes responsabilités, que ce soit au Service Technique Aéronautique, à la Direction des Recherches et Moyens d'essais de la DMA, devenue ensuite Direction des Recherches Études et Techniques de la DGA, ou à l'ONERA, il excella à développer, orienter, coordonner l'ensemble des travaux de recherche scientifique et technique dans les domaines : Avion, Missile et enfin Espace. Plus tard, participant de près à la rédaction des prestigieuses revues d'Aéronautique et d'Astronautique ou à l'Académie de l'Air et de l'Espace, il assura la présentation et l'explication des résultats les plus complexes et contribua à leur plus large diffusion. Jean Carpentier a suivi une trajectoire ascendante et féconde qui lui vaut la reconnaissance et l'estime de tous et, en tout premier lieu, celle de ceux qui ont travaillé avec lui et ont eu, comme moi, la chance d'avoir été son élève et d'être initié dans la fin des années cinquante à la mécanique du vol et au concept de fonctions de transfert des avions. La révélation des potentialités de cette innovation venue en direct des universités américaines et qui conduisit à l'atterrissage automatique et, par la voie des commandes de vol électriques, au Contrôle Automatique Généralisé que l'on trouve aujourd'hui à bord de tous les avions et qui donne une large similitude de pilotage à toute une famille, a été, pour beaucoup, dans le choix de nos voies professionnelles personnelles. C'est donc pour moi un très vif plaisir de présenter l'ouvrage et l'auteur et une occasion que je saisis pour le remercier chaleureusement.

Tout au long de sa carrière, Jean Carpentier a côtoyé l'innovation, tant technique que conceptuelle, dans ce domaine d'élection qu'est pour

elle l'Aéronautique et au sein duquel elle a pu exprimer l'ensemble de ses facettes dans le champ de la recherche fondamentale, de la recherche appliquée dont elle se distingue, ou du champ de la fabrication des produits, de leur mise sur le marché ou enfin de l'organisation industrielle où elle trouve son domaine d'excellence. Il a donc, tout naturellement, été amené à rassembler ses idées dans l'ouvrage particulier que vous avez entre les mains pour vous faire partager le fruit de ses propres découvertes dans la genèse des processus innovants, pour vous faire part de ses trouvailles inédites d'intuition créatrice ou de sagesse déductive réfléchie qui ont marqué les progrès de l'aéronautique tout au long du siècle dernier et, chemin faisant, de nous amener tous à nous interroger sur nos propres expériences et donner aux plus jeunes l'occasion d'y puiser des motivations d'action. Pour mieux situer l'innovation dans le processus de création d'un produit, d'un système, il a établi une distinction entre le *chercheur* qui, limité souvent à son domaine de compétence, avance par déduction à partir de ses résultats d'expérience, et qui se distingue de l'*innovateur* dont la démarche est inductive et qui, lui, scrute l'horizon des applications dans toutes les directions. Jean Carpentier les distingue de l'*ingénieur* qui prend en compte les impératifs extérieurs et situe son action dans la chronologie : recherche-développement-industrialisation-marché-succès/échec. Cette distinction est très utile pour caractériser le rôle des différents acteurs de l'épopée aéronautique du xx^e siècle. et donner à chacun sa véritable place.

Dans un premier temps, il évoque les innovations balbutiantes du « canal historique », celles des scientifiques et des précurseurs qui spécifient les lois aérodynamiques élémentaires, pour s'arrêter plus longuement sur Clément Ader qui reconnaît le modèle de l'aile de la chauve-souris et dégage les notions de portance et de charge alaire ainsi que celle de traînée. Ader déposa le brevet « Avion » dès 1890. Ingénieur visionnaire : il publie même en 1909 un livre prophétique, « l'Aviation militaire », qui ne reçoit aucun écho, il était trop en avance sur son époque. Les pionniers ont une place de choix : Otto Lilienthal, rigoureux, dessine scientifiquement sa « polaire », Octave Chanute et Wilhelm Kutta précèdent les frères Wright, opiniâtres, d'esprit méthodique et doués de talent en mécanique ; ils sont les auteurs de la véritable naissance de l'aviation avec leur Flyer qui réalisa, le 17 décembre 1903, le premier vol d'un « plus lourd que l'air motorisé ». Ce voyage à travers le temps nous fait remonter à l'origine des temps « pré-historiques » pour mieux nous préparer à la présentation des grandes ères de l'aviation :

– *Les appareils à mâts et à haubans*, d'abord. Les pionniers français sont à la pointe des progrès. : 1906, Henry Farman ouvre la voie à la technique de

décollage, Esnault-Pelterie invente le « manche à balai », 1909 voit l'apparition des ailerons. Les frères Seguin inventent le moteur rotatif. L'année 1909 marque un véritable tournant avec la traversée de la Manche, la création de « Sup Aéro », et le premier Salon international, ancêtre du salon du Bourget.

L'aviation se développe aussi dans les autres pays européens : Allemagne, Royaume-Uni, Russie. La Grande Guerre amène des progrès significatifs à la fois sur les cellules, les moteurs et l'armement ; le tir à travers l'hélice est inventé.

– *Les avions métalliques*, ensuite. À partir de 1922, il est acquis que les qualités aérodynamiques conditionnent les performances des avions. Les organismes de recherche en Aérodynamique vont jouer un rôle essentiel. Les cellules métalliques ont une meilleure intégrité de structure, une traînée plus faible, une capacité d'emport plus élevée, elles vont se généraliser. L'hélice à pas variable accompagne une évolution spectaculaire des moteurs avec la suralimentation et l'arrivée des carburants à haut indice d'octane. Parti de 450 CV en 1924, le moteur d'avion atteindra 1500 CV en 1939 pour passer à 2200 CV pendant la guerre 1939-1945.

– *Les avions à réaction*, enfin. La propulsion à réaction avait été considérée par les Américains comme utopique à cause d'une consommation trop élevée. Or ceci n'est pas vrai dans tout le domaine de vol. Von Ohain et Whittle conçurent les premiers turboréacteurs. Le Heinkel 178 fit son premier vol le 27 août 1939 et le Gloster E 28 vola le 15 mai 1941, mais c'est le Messerschmitt 262 équipé d'un Jumo 004 avec un compresseur axial qui ouvrit la voie à l'aviation à réaction. La France devait magistralement combler le retard accumulé au cours de la deuxième guerre mondiale pour occuper dans ce domaine une place plus qu'honorable. Cette saga est racontée dans les publications du Comaéro : *Les avions militaires*, *Les avions civils*, *Les moteurs aéronautiques*.

Ces rappels historiques étaient nécessaires pour nous mettre en appétit avant d'aborder le plat de résistance : *Les innovations*. En effet, grâce à elles, les progrès en aérodynamique sont constants, la simulation numérique complète les essais en soufflerie. L'accroissement des performances des ordinateurs a des répercussions dans tous les domaines, le calcul des structures en bénéficie et fait d'énormes progrès; les moteurs voient les rapports poussée/masse et les températures entrée-turbine croître alors que les consommations spécifiques baissent, le turbofan pointe le bout de son nez. Parallèlement, l'ergonomie des postes d'équipage est un sujet d'innovations fécondes. Une rubrique entière est consacrée aux *avions innovants*, celle-ci illustre par description et synthèse des acquis, la longue marche des

réalisations vers plus de performance et plus de sécurité. Le chapitre darwinien consacré aux *modalités de l'évolution de l'aéronautique* est intéressant à plus d'un titre. Un produit issu d'une innovation nouvelle en élimine un autre qui avait représenté en son temps une innovation majeure. Le monde des équipements est riche en exemples de ce genre. Comme dans l'Évolution, il existe aussi des *voies en impasse*. Elles sont relativement peu nombreuses, car le processus de création en aéronautique n'est pas celui d'une progression par essais et erreurs, mais se déroule à partir d'hypothèses raisonnées dans le but de satisfaire un objectif défini, reconnu raisonnablement atteignable. Par opposition à la voie-impasse il existe une *voie royale*, celle que met à notre portée l'informatique avec la possibilité de concevoir un *avion virtuel* support des arbitrages rendus en vue d'optimiser l'exécution de la mission, les spécifications de l'ensemble des composants, la réalisation, la fabrication, le maintien en condition opérationnelle et l'introduction des technologies futures. *Innovations et Systèmes* ouvrent une ère nouvelle dans la recherche de solutions en abordant, d'une manière globale, les problèmes posés par l'exécution d'une tâche, d'une mission. La matrice innovation-systèmes est aussi un outil précieux pour traiter et gérer l'évolution du futur des systèmes, mais elle n'est pas adaptée à la conception de systèmes nouveaux c'est-à-dire à l'innovation de concept, celle qui introduit une révolution dans la course avec l'attaquant. Il n'en reste pas moins que le duel *attaque-défense ou obus-cuirasse* est une source inépuisable d'innovations, mais il est déséquilibré, en faveur de l'attaque, dans un rapport de plusieurs ordres de grandeur. La prééminence alternative de l'une sur l'autre entraîne des remises en cause et des solutions en progrès; le duel radar-furtivité éclaire parfaitement les avancées qui résultent d'un tel duel. L'introduction d'une troisième dimension, celle des *nouveaux concepts* qui, en s'élevant au dessus de la matrice des innovations techniques existantes-systèmes, pallie leur insuffisance pour aborder la question des systèmes nouveaux. Une incursion dans le domaine des *hélicoptères*, dont la mise au point a demandé plus de temps, donne l'occasion d'évoquer ses visionnaires, ses pionniers, et les grands réalisateurs de ces aéronefs. La place acquise par les hélicoptères français est enviable. Elle est le fruit de recherches en aérodynamique, en aéroélasticité, sur les qualités de vol et les aides au pilotage qui ont débouché sur des innovations et des progrès techniques qui ont permis de surmonter le découragement des pionniers après leurs échecs répétés.

Jean Carpentier traite également des *formules nouvelles* et aborde les espoirs qu'elles suscitent ; il met en garde contre les mirages qu'elles peuvent créer. Elles portent du rêve qui sera peut-être demain réalité, mais

aussi peuvent conduire à des impasses qu'il faudra détecter à temps et à des déceptions qu'il faudra surmonter par de nouvelles innovations. Pour lui, le spécialiste travaille dans l'espace unidirectionnel de son domaine, l'opérationnel se déplace sur une deuxième dimension, celle des systèmes existants. Le succès vient souvent de l'association harmonieuse, dans un concept innovant, de deux systèmes existants complémentaires : avion-missile ; navire-missile ; navire-hélicoptère. Les solutions d'avenir sont à rechercher dans un parcours dans l'espace tridimensionnel : technologies présentes et futures, systèmes existants et en projet, concepts d'ensemble intégrateurs et innovants. La prospective aérospatiale doit être basée sur cette approche tridimensionnelle globale et être confiée à des équipes associant des experts pointus, des généralistes imaginatifs à fort potentiel de synthèse, des créateurs d'ensemble intégrant les progrès scientifiques et techniques et aptes à effectuer les associations de systèmes qui seront à la base des concepts et systèmes nouveaux.

Les réflexions que nous propose Jean Carpentier sont le fruit d'un énorme travail d'analyse des progrès acquis par le passé ; il dresse en complément une fresque historique d'une rare qualité dans laquelle l'action et la personnalité des acteurs constituent l'élément de fond essentiel. Elles débouchent, au terme d'un parcours riche d'expériences et de succès personnels, sur des propositions constructives. Celles-ci ont comme objectif de nous inviter à suivre les voies qu'il nous propose pour tirer par nous-mêmes les enseignements qui nous feront dégager les moyens d'aborder et de construire avec efficacité le futur.

Je n'ai aucun doute sur l'accueil qui sera réservé à cet ouvrage d'une qualité exceptionnelle, ni sur la manière dont il sera apprécié dans tous les milieux aéronautique et historique. Il fait honneur à son auteur et, à travers lui, à tous ceux dont il a évoqué le rôle, l'action et les mérites dans la construction de l'aéronautique. Il sera de la plus grande utilité pour tous ceux que passionnent l'histoire et le devenir de cette activité. Qu'il en soit doublement remercié !

Introduction

Les spécificités de l'innovation

Dans le domaine industriel, l'innovation est l'introduction d'un produit, d'un équipement ou d'un procédé nouveau. Elle se situe au sein de l'ensemble des processus qui se déroulent depuis la naissance d'une idée neuve jusqu'à sa matérialisation. Pour la concurrence industrielle, l'innovation caractérise le pionnier, par opposition au simple exploitant qui se contente de réaliser et de vendre le même produit, selon le même procédé. Lancer une nouveauté permet d'échapper à la concurrence et de conquérir, au moins pendant un certain temps, un élément de monopole. Fabriquer un bien nouveau, en faisant appel à une méthode de production nouvelle, et ainsi ouvrir un débouché commercial nouveau, c'est innover.

Dans le domaine de l'économie, c'est Joseph Schumpeter qui, le premier, a introduit le concept d'innovation dans l'analyse des grands facteurs de développement. Pour lui, fabriquer un produit nouveau, introduire une nouvelle méthode de production, ouvrir un débouché nouveau, utiliser de nouvelles matières premières, mettre en place une nouvelle organisation, c'est innover. En règle générale, le nouveau ne sort pas de l'ancien, mais apparaît à côté de l'ancien, lui fait concurrence jusqu'à le ruiner, et modifie toutes les situations, de sorte qu'un processus de mise en ordre est nécessaire, écrit-il dans son livre le plus célèbre, « *Capitalisme, socialisme et démocratie* », publié en 1942. Schumpeter affirme que les innovations apparaissent par « grappes ». Lorsqu'une innovation importante se fait jour, elle entraîne toute une série d'innovations connexes qui, à leur tour, stimulent l'économie. Cela crée une phase d'expansion qui peut, soit se stabiliser, une fois l'innovation diffusée, soit décliner en raison de l'apparition d'autres innovations conduisant à de meilleures performances en terme d'efficacité/coût.

Innovation et découverte scientifique

Dans le domaine scientifique, l'innovation et la découverte sont, sans s'opposer, à distinguer nettement.

La découverte scientifique se produit lors d'un travail de recherche, le plus souvent à caractère fondamental, entrepris pour approfondir les

connaissances dans un secteur très étroit d'une discipline scientifique, par un chercheur ou une équipe de chercheurs, dont la notoriété internationale dépend des résultats qu'ils annoncent dans des colloques spécialisés et qu'ils publient dans des revues de très haut niveau.

La découverte scientifique a lieu dans le cadre d'une recherche de base, ou recherche fondamentale, effectuée au sein d'organismes tels que le CNRS en France, ou dans les Universités. Cette recherche se situe en amont du processus de progrès des connaissances humaines, entièrement hors du champ des applications. Elle ne donne pas naissance à des innovations, tout au moins dans un premier temps.

De la découverte scientifique, il résulte généralement le dégagement d'un nouveau champ d'exploration, d'abord pour les chercheurs, ensuite pour les ingénieurs qui trouvent ainsi des idées neuves en vue d'applications répondant soit à des besoins existants, soit à la création de besoins nouveaux. La voie est ainsi ouverte à des innovations.

Innovation et recherche appliquée

La recherche appliquée exploite les connaissances scientifiques obtenues par la recherche fondamentale, les met à l'épreuve du calcul ou de l'expérimentation, en vue de trouver des applications pratiques. Elle est le plus souvent effectuée par des laboratoires d'organismes, étatiques ou industriels, avec une finalité liée aux besoins de ces organismes. Elle se concrétise par des brevets, suivis de publications destinées à susciter l'intérêt des industriels sans compromettre la propriété industrielle de l'organisme concerné.

Le résultat de la recherche appliquée n'est pas immédiatement prêt à déboucher sur le marché, car il faut, au préalable, passer par le stade du développement, puis par celui de l'industrialisation. Comme pour la découverte scientifique, il n'engendre pas forcément une réelle innovation, du moins immédiatement.

La différence de nature entre Recherche et Innovation n'exclut pas leur rencontre et leur convergence dans la réalisation de nouveaux produits. Bien souvent, l'innovateur prend en compte les perspectives que pourront offrir les recherches en cours et en suit, avec beaucoup d'attention, la progression, de façon à en exploiter les résultats, dans les meilleurs délais. Cette convergence peut être réalisée le plus efficacement lorsque des contacts étroits existent entre les chercheurs et les innovateurs. Les exemples sont nombreux dans le domaine aéronautique. Citons, par exemple, le rôle de la

recherche et de l'innovation dans le domaine des hélicoptères, où la France a joué un rôle primordial.

Innovation et développement exploratoire

Il s'agit de préparer le passage au stade industriel qui commence par le développement d'un produit parfaitement défini. Ce n'est pas encore le cas au stade du développement exploratoire. Car il faut être sûr que le produit est réalisable, qu'il tiendra ses promesses en termes de performances, et qu'il soutiendra aussi la comparaison avec la concurrence, du point de vue des coûts, de la sécurité et du respect de l'environnement. L'évaluation de ces promesses peut se faire d'une façon exhaustive par la simulation numérique, en exploitant pleinement les possibilités de systèmes de conception globale, tels que CATIA. On peut ainsi vérifier que le produit pourra, non seulement être fabriqué dans les délais par des personnels bien formés, mais aussi être utilisé et maintenu en fonctionnement dans des conditions optimales. C'est une sorte d'assurance tous risques, depuis la naissance jusqu'à la fin de vie du matériel. On n'est pas loin du « Développement durable ». C'est ce procédé qui, sous l'impulsion de Dassault Systèmes, a constitué, en lui-même, une réelle innovation. D'abord appliqué à l'Aéronautique, il est maintenant trouvé des applications dans toute l'industrie.

Les différents genres d'innovations

On peut distinguer quatre grands genres d'innovations :

– *L'innovation technique* qui résulte, soit d'une invention, soit d'une amélioration technologique. Il peut s'agir d'une innovation de produit, qui correspond à un besoin, reconnu mais qui est ainsi mieux satisfait. Il peut aussi s'agir d'une innovation de procédé, qui permet de réaliser le même produit avec des moyens différents, ce qui permet de le produire à meilleur coût ou avec de plus grandes garanties de reproductibilité et de fiabilité.

– *L'innovation économique* ou innovation de marché, qui correspond à une nouvelle application d'un produit ou d'un procédé industriel existant dans un autre domaine. On peut lui rattacher, dans le domaine militaire, l'innovation opérationnelle, qui consiste à exploiter les possibilités offertes par un nouveau matériel, en complément ou en remplacement de matériels existants, de nature très différente.

– *L'innovation de concept*, qui consiste en une combinaison nouvelle de produits ou de moyens existants, pour satisfaire un besoin non encore exprimé. Il s'agit d'une anticipation, correspondant à la découverte d'un besoin latent. Ce type d'innovation peut conduire à la remise en cause du comportement du client, voire de son mode de vie. Son impact économique ou social peut rejoindre les prévisions de Schumpeter, en ce qui concerne l'évolution des facteurs-clés du développement ou de la croissance mondiale.

C'est sur ce type d'innovation qu'il convient de porter plus particulièrement l'attention. C'est, en effet, celui qui est le plus original, le plus risqué, mais le plus prometteur. Il est, très souvent, pluridisciplinaire, avec un caractère transversal, de sorte qu'il échappe généralement aux spécialistes enfermés dans des voies trop étroites pour penser à tirer parti des progrès dans des disciplines voisines. Ce sont les généralistes, à l'écoute des découvertes et des inventions dans des domaines variés, qui sont les mieux placés pour innover. Il peut s'agir d'une seule personne, mais, le plus souvent, d'une petite équipe qui, en procédant par association d'avancées ou de découvertes récentes, conçoit un produit ou un procédé nouveau.

Pour déboucher sur le marché, l'innovation doit correspondre à un besoin. Mais celui-ci peut n'être pas encore exprimé. Il revient, à la petite équipe créatrice, d'en pressentir l'existence potentielle, avec une intuition prospective.

– *L'innovation en organisations*. Elle se situe souvent à de hauts niveaux décisionnels. Elle consiste à créer des organismes nouveaux, tels que l'École d'aéronautique et de mécanique (la future Sup'Aéro), en 1909, ou des expositions au sol (le 1^{er} Salon de la locomotion aérienne en 1908-1909), et en vol (la Grande Semaine de Champagne, en 1909), des établissements de recherche pluridisciplinaire, ou encore à constituer une armée de l'Air autonome, à créer des sociétés aéronautiques multinationales, à signer des accords de coopération, etc. Ce genre d'innovations est souvent très fécond, il peut préparer l'avenir à moyen ou long terme (c'est le cas pour la formation des ingénieurs), il peut faciliter les synergies entre disciplines distinctes, il peut aussi ouvrir de nouvelles perspectives de débouchés. Nous serons amenés à évoquer des exemples significatifs de ce genre d'innovations, mais l'essentiel de notre propos se concentrera sur l'innovation technique et sur l'innovation de concept.

L'innovation technique et l'innovation de concept peuvent jaillir à des instants très variables selon les domaines et suivant les époques. À cet égard,

il faut souligner que les inventions innovantes ont, dans le passé, demandé du temps pour se retrouver dans le domaine public, il a fallu :

- 100 ans pour que la photographie soit devenue un procédé à l'usage de chacun ;
- 50 ans pour le téléphone ;
- 35 ans pour la triode ;
- 20 ans pour l'automobile.

Les délais ont été moins longs lorsqu'il s'est agi de matériels à caractère stratégique. Il n'a fallu que :

- 10 ans pour passer de la découverte du neutron à la première pile atomique ;
- 8 ans pour passer des ondes ultracourtes au radar ;
- 7 ans pour passer de l'avion des frères Wright aux premiers avions militaires ;
- 5 ans pour passer de la réaction en chaîne à la première bombe atomique.

Dans ces cas particuliers de matériels stratégiques, ce furent les besoins des États qui accélérèrent le passage aux applications.

De toute façon, ce passage ne peut intervenir qu'après une phase de mise au point au stade du laboratoire ou du bureau d'étude qui peut être plus ou moins longue selon les cas et les circonstances. C'est ainsi que, bien que le pompage optique ait été découvert par Alfred Kastler et Jean Brossel à l'École Normale Supérieure en 1954 et que le laser à rubis ait été inventé par le physicien américain Theodore Maiman en 1960, les applications « grand public » des lasers ne sont intervenues qu'à partir de 1965.

La démarche de l'innovateur, comparée à celles du chercheur et de l'ingénieur

Il est intéressant de comparer la démarche de l'innovateur à celle du chercheur ainsi qu'à celle de l'ingénieur ou du technicien.

Le chercheur

Dans son travail d'approfondissement des connaissances scientifiques, le chercheur procède en associant observation, réflexion et expérimentation. Sa démarche est principalement déductive, avec une logique rigoureuse qui

permet d'avancer pas à pas, qui compare les résultats d'expérience à ceux obtenus en faisant varier les paramètres et les conditions d'essai.

Bertrand Goldschmidt distingue sept phases qui précèdent la découverte scientifique : la naissance de l'idée nouvelle au stade brut, le passage à une idée plus raffinée, le stade de l'expérimentation, la conception d'une hypothèse raisonnable, puis celle d'une hypothèse inattendue fondée sur l'intuition, l'expérimentation plus poussée, l'expérimentation contradictoire, pour aboutir enfin à la découverte scientifique.

Cette démarche rigoureuse conduit à une théorie nouvelle qu'il convient de conforter par d'autres observations ou expérimentations. La théorie est ainsi admise jusqu'à ce que des résultats nouveaux viennent la contredire ou en limiter le domaine d'application. C'est ainsi que la théorie de l'attraction universelle émise par Newton a vu son domaine limité par la théorie de la relativité restreinte d'Einstein, qui, elle-même, a été supplantée par la théorie de la relativité générale. De grandes difficultés surviennent lorsque les expérimentations semblent contradictoires. Ce fut le cas pour l'optique corpusculaire de Newton qui n'expliquait pas les phénomènes de diffraction et d'interférences. Le concept ondulatoire de la lumière devait être admis, au même titre que le concept corpusculaire. En sens inverse, Louis de Broglie montra l'aspect ondulatoire de l'électron. La Mécanique ondulatoire est l'exemple-type du concept qui englobe l'ensemble ondes et particules. La démarche de Louis de Broglie se rapproche davantage de celle de l'innovateur que de celle du chercheur. Il en est de même de celle d'Einstein. Tous deux ont procédé plus par induction que par déduction. C'est bien ainsi que procèdent les grands innovateurs.

L'innovateur

Pour *trouver*, le chercheur doit chercher : cette tautologie recouvre une réalité profonde, car il faut cerner les limites des connaissances scientifiques et tenter de les approfondir, de les étendre, de les appliquer à de nouveaux domaines.

Pour innover, le processus est inverse : c'est moins de chercher que de réfléchir dans des domaines différents et de tenter de transposer les résultats obtenus dans des domaines qui, *a priori*, semblent totalement distincts. Innover sans chercher, peut-être, mais non sans réfléchir !

Bien souvent, le chercheur est trop limité par son domaine de compétence, qui s'étend davantage à la verticale qu'à l'horizontale. Au contraire, l'innovateur doit constamment observer l'horizon dans toutes les directions. Il ne doit pas se décourager lorsque ce tour d'horizon lui paraît improductif. L'idée « géniale » peut surgir à l'improviste et se révéler à

son esprit, un peu comme l'image latente en photographie argentique ! C'est parfois dans les moments de découragement qu'elle survient, comme Henry Farman en fit l'expérience pour le décollage (voir par 3.1).

Ce tour d'horizon doit aussi s'appuyer sur une connaissance approfondie des tentatives précédentes. Les frères Wright ont tenu compte des essais d'Otto Lilienthal, mais ils ont aussi vérifié les résultats expérimentaux de ce grand pionnier et ont corrigé certaines erreurs. C'est donc un balayage dans un espace quadridimensionnel espace-temps que l'innovateur doit se situer. La connaissance de l'histoire des sciences et des techniques est indispensable au progrès, et ceci est vrai tout particulièrement pour l'Aéronautique.

L'ingénieur

Quant à l'ingénieur, il doit s'appuyer sur les fruits de la recherche, en tenant compte des impératifs extérieurs, liés à la concurrence et au marché. Il doit avoir une vue large des possibilités qu'offrirait un nouveau produit, dans toute la durée de vie souhaitable de ce produit. Ceci suppose une perception aiguë des progrès qui risquent de s'accomplir dans des secteurs variés. Lorsqu'il s'agit de produits à forte base d'électronique, le risque de péremption est considérable, car les progrès de la microélectronique et de l'informatique sont fulgurants. L'ingénieur doit donc être totalement ouvert aussi bien au chercheur qu'à l'innovateur. Il ne doit pas être trop obnubilé par l'obtention rapide d'un résultat, il est préférable d'envisager toutes les possibilités du futur produit et de ses ramifications, sous forme d'options ou de famille, en vue de faciliter l'emploi par des utilisateurs variés.

Alors que l'ensemble recherche-développement-industrialisation suit l'ordre chronologique, il n'en est pas de même pour la recherche et l'innovation qui ne sont pas strictement corrélées dans le temps. Il arrive bien souvent que l'innovation s'effectue avant même que la recherche ait été entreprise et que ce soit l'innovation qui déclenche un ensemble de recherches. Ce fut le cas pour de nombreuses innovations en aéronautique.

Innovation et continuité

Il peut paraître paradoxal de rapprocher l'innovation et la continuité. Ces deux termes semblent aussi distincts que le feu qui embrase et l'eau qui éteint, ou encore que le vent qui se lève et le grand calme qui apaise. Les innovations qui se succèdent et se remplacent sont souvent des sauts brusques, des discontinuités, un peu comme les variations génétiques des êtres vivants. On pourrait considérer qu'elles sont les résultats d'une lutte

pour la vie des véhicules et des appareils appartenant à des générations successives. La synthèse de résultats acquis dans des disciplines différentes, parfois sans lien apparent entre elles, peut produire un phénomène de fécondation, analogue à celui qui aboutit à la reproduction des espèces végétales ou animales, à leur transformation par hybridation ou mutation.

Il semblerait naturel d'en conclure que les responsables de ces passages à des générations de plus en plus performantes sont des hommes nouvellement acquis à des techniques d'avant-garde, forcément plus jeunes que leurs prédécesseurs. Ces considérations sont le plus souvent exactes, notamment pour tout ce qui concerne les applications de l'informatique dont les jeunes sont les plus aptes à tirer le meilleur parti. Mais il reste bien des cas où l'innovation est le fait de personnalités dont l'esprit inventif ne se dément pas au cours des années. À titre d'exemples, comme nous le verrons, Gustave Eiffel et Albert Caquot sont restés innovants jusqu'à un âge très avancé. Citons aussi l'innovation opérationnelle que fut l'emploi de l'aviation pour l'observation aérienne, lors du début de la Grande Guerre : à 65 ans, le « toujours jeune d'esprit » Général Galliéni fit appel aux avions disponibles, militaires ou civils, et le jeune constructeur Louis Breguet, alors âgé de 34 ans, put lui fournir les informations qui conduisirent à la victoire de Joffre sur la Marne en septembre 1914.

Pour des personnalités hors du commun, la continuité qu'ils assurent par leur activité propre n'est nullement un obstacle à la création de nouvelles réalisations, elle est la source même des innovations. Parmi ces personnalités, dans le domaine de la détection radar et de la discrétion électromagnétique, figure incontestablement Jacques Dorey, de l'ONERA, dont l'imagination et la passion pour l'innovation dans le domaine des systèmes électroniques n'avaient pas de limites.

Dans un tout autre domaine, celui de la propulsion en aéronautique, c'est la personnalité de Joseph Szydlowski qui s'impose. Dans son livre, « *Joseph Szydlowski et son temps ou l'aventure de Turboméca* », Guy Decôme conte ce que furent « les sept vies de Joseph Szydlowski ».

Pour conclure ces réflexions préliminaires, il faut souligner qu'une innovation est véritable et productive quand elle survient au moment propice, où l'état de la science et de la technique le permet, ce qui n'était certes pas le cas pour les idées fulgurantes de Léonard de Vinci ! Mais, de toute façon, il revient à l'innovateur le mérite d'avoir le courage de se lancer dans une voie nouvelle, souvent malgré le scepticisme et l'incompréhension des

Les spécificités de l'innovation

utilisateurs potentiels et en dépit des nécessaires efforts pour la mise au point du concept ou du produit innovant.

Dans ce qui suit, seront présentés de nombreux exemples d'innovations qui ont jalonné l'évolution de l'aviation au cours du xx^e siècle.

Chapitre 1

Exemples historiques d'innovations en Aéronautique

La naissance de l'aviation et son développement ont été marqués par de nombreuses innovations qui eurent lieu dans des voies très diverses. La chronologie de l'Aéronautique en fournit de nombreux exemples.

IV^e-V^e siècles avant J.-C. Le cerf-volant est utilisé pour les jeux et festivals en Chine, en Corée et au Japon. Il fut ensuite utilisé pour la reconnaissance aérienne et pour transmettre des messages à des troupes encerclées. Il s'agit d'une invention sans recherche préalable, et qui conduisit à innover dans le domaine opérationnel.

Le grand visionnaire

Léonard de Vinci (1452-1519) commença ses études sur le vol vers 1486. Ses premiers travaux concernèrent des machines à ailes battantes. Ce n'est qu'à la fin de sa vie qu'il s'intéressa sérieusement au vol plané. En observant le vol stationnaire d'oiseaux dans un mouvement d'air ascendant, il en déduisit que l'action de l'air est la même, que ce soit l'oiseau ou l'air qui soit en mouvement. Cette déduction était essentielle, elle aurait dû être remémorée lors de la controverse qui fut déclenchée lorsque Gustave Eiffel remplaça ses essais de maquettes en chute libre depuis sa Tour par des expérimentations en soufflerie.

Léonard de Vinci fit, en outre, une véritable découverte scientifique, en affirmant, en 1513, que les oiseaux peuvent voler grâce à l'accroissement de la pression de l'air au-dessous de leurs ailes et à la diminution de celle-ci au-dessus et qu'il en résulte une force de sustentation croissant avec la vitesse du vol. Mais Léonard de Vinci n'en précisa pas le mode de croissance.

On peut trouver, dans les dessins de Léonard de Vinci, des aperçus sur des machines volantes qui pourraient être considérées comme les lointains ancêtres des avions et les hélicoptères d'aujourd'hui, si l'on faisait abstraction de l'absence de moteurs, ainsi que d'erreurs sur le principe de fonctionnement des rotors assimilés à des vis à axe vertical.

1.1 – Les scientifiques et les précurseurs

Il fallut attendre le Français **Edme Mariotte** (1620-1684) et le Néerlandais **Christiaan Huygens** (1629-1695) pour que soit établie la proportionnalité des forces aérodynamiques au carré de la vitesse.

Mariotte détermina cette loi en mesurant la force exercée par un jet d'eau sur un dynamomètre. En 1673, il présenta ses résultats à l'Académie des Sciences de Paris où il avait été admis en 1666, année de la fondation de l'Académie, en même temps que Huygens. Celui-ci commença, en 1668, l'étude de la chute des projectiles dans un milieu résistant. Une année d'expérimentation le conduisit à la loi de proportionnalité au carré de la vitesse, mais il ne publia ses résultats qu'en 1690.

L'antériorité de la découverte scientifique revient donc à Mariotte. Cette loi obtenue par l'expérimentation fut démontrée par la théorie grâce à **Isaac Newton** (1642-1727). Le tome II des *Principia* publié en 1687 était consacré à la statique et à la dynamique des fluides. Newton avait été intrigué par l'affirmation de René Descartes selon laquelle l'espace interplanétaire serait rempli d'un fluide au sein duquel se déplaceraient les astres. Cette affirmation paraissait à Newton contraire à l'observation du mouvement des corps célestes qui n'est pas dissipatif, mais régulier et répétitif. Newton calcula la résistance des corps se déplaçant dans un fluide et montra qu'elle est proportionnelle au carré de la vitesse, ainsi qu'au carré du diamètre et à la densité du fluide. Il en déduisit que les corps célestes se déplacent dans un espace vide, « à l'exception, peut-être, de vapeurs extrêmement rares et des rayons lumineux ». En outre, alors que Mariotte et Huygens n'avaient pas étudié l'effet de l'incidence et ne s'étaient donc pas intéressés à la portance, Newton calcula cette force en postulant que le fluide est constitué d'un ensemble de particules indépendantes. Cette hypothèse le conduisit à une loi de portance proportionnelle au sinus carré de l'incidence, ce qui donnait une portance très faible aux incidences normales de vol. Cette loi, dite « du sinus carré de Newton », fut admise par la communauté scientifique et conduisit d'éminents savants à conclure que le « plus lourd que l'air » ne pourrait pas voler.

Il fallut attendre Lanchester pour que soit établie scientifiquement la théorie de l'écoulement d'un fluide sur un profil en incidence. Cependant la théorie corpusculaire de Newton s'applique lorsque le déplacement du mobile s'effectue dans un gaz raréfié, comme c'est le cas aux très hautes altitudes, lors du début de la rentrée d'un véhicule spatial dans l'atmosphère.

Benjamin Robins (1797-1851) étudia la résistance de l'air à l'aide d'un bras tournant, ainsi qu'avec un pendule balistique. Il confirma la

proportionnalité au carré de la vitesse et montra l'influence de la forme du corps en mouvement. Il constata un accroissement important de la traînée aérodynamique au voisinage de la vitesse du son. Ses travaux attirèrent l'attention de **Leonhard Euler**. Euler et Robins montrèrent l'intérêt d'une section frontale réduite à l'avant, ce qui est conforme à l'évolution de la traînée en transsonique.

Sir George Cayley (1773-1857) est, en Grande-Bretagne, considéré comme l'inventeur de l'aéroplane. L'observation des oiseaux le conduisit à comprendre l'intérêt de la cambrure des profils pour accroître la portance et à préconiser, dès 1808, la réalisation d'un appareil comportant des ailes en dièdre pour assurer l'équilibre latéral et un gouvernail de profondeur pour s'élever ou pour descendre. Il ajoutait un gouvernail de direction pour permettre la conduite dans un plan horizontal. Il réalisa plusieurs maquettes capables de transporter un homme et leur fit effectuer des vols planés. La démarche de Sir George Cayley incorpore un effort de recherche d'après l'observation attentive du vol des oiseaux. Cependant l'adjonction du gouvernail de direction semble résulter de la comparaison avec les poissons et les véhicules marins, ce qui restera une obsession pour beaucoup d'inventeurs.

Au Royaume-Uni, également, **Francis Herbert Wenham** (1824-1908) effectua des essais de plaques planes montées sur des bras tournants et détermina approximativement la position du centre de pression aux incidences faibles. De ces essais, comme de l'observation du vol des oiseaux, il conclut à l'intérêt des ailes à grand allongement.

Horatio Phillips (1845-1926) entreprit des recherches sur l'aérodynamique de profils, de largeurs et de courbures variables, selon une démarche scientifique qui lui permit de vérifier les hypothèses émises, plusieurs décennies auparavant, par Sir George Cayley. Il réalisa, pour l'*Aeronautical Society*, un tunnel aérodynamique dans lequel l'air était entraîné par de la vapeur d'eau. Il collabora avec l'inventeur Hiram Maxim et prouva qu'un profil cambré crée davantage de portance qu'un profil plan. En 1891, il fit breveter une aile à fente, au profil à courbure variable. En 1893, il construisit un multiplan, comportant 50 ailettes superposées fixées sur une armature d'acier, comme un store vénitien, de 2,9 m de haut. Cet ensemble était posé sur une structure à 3 roues, propulsée par un moteur à vapeur de 9 CV qui actionnait une hélice bipale de 1,8 m. Les ailettes, en bois, ne mesuraient que 3,8 cm en largeur, mais avaient une envergure de 6,7 m.

Les essais s'effectuèrent sur une piste circulaire de 60 m de diamètre, le multiplan étant attaché à un pylône central. Le 19 juin 1893, il atteignit la vitesse de 64 km/h et s'éleva à une hauteur de 90 cm, en parcourant, en cercle, plus de 600 m. En 1904, avec l'appui financier du Comte de Lambert, Horatio Phillips construisit un appareil comportant 20 ailettes étroites, incurvées et étagées. Ce multiplan reposait sur un bâti équipé d'un train tricycle et mû par un moteur à explosion, il était destiné à soulever un homme, mais il ne put qu'effectuer qu'un bond de 15 m. En 1907, à bord d'un autre mutiplan, ayant 4 rangées de 50 ailes minuscules, et équipé d'un moteur de 22 CV, Horatio Phillips effectua un saut incontrôlé de 150 m, en atteignant une vitesse de 48 km/h. C'était le tout premier vol motorisé réalisé en Grande-Bretagne. En 1911, Horatio Phillips construisit un multiplan comportant 110 ailettes et propulsé par une hélice bipale entraînée par un moteur à explosion avec 6 cylindres en ligne. Ce fut le « chant du cygne » de la formule des multiplans, définitivement dépassés par les appareils de type monoplane ou biplane, plus robustes et moins sensibles aux phénomènes vibratoires.

Le Britannique **Frederick W. Lanchester** (1868-1946) effectua, en 1894, des essais sur des ailes de forme en plan elliptique, dont il soupçonnait l'intérêt du point de vue de la traînée, du fait que cette forme se retrouvait chez de nombreux oiseaux. Il eut le grand mérite d'introduire la notion de circulation autour d'un profil d'aile et d'établir sa relation avec la portance aérodynamique, mais il fallut attendre la parution de son livre « Aerodynamics » en 1907 pour que soit expliqué clairement comment sa théorie devait être appliquée.

En France, parmi les précurseurs de l'aviation, **Jean-Marie Le Bris** (1817-1872) fut l'un de ceux qui allèrent, avec le plus d'efficacité, rigueur dans l'analyse et audace dans l'expérimentation. Officier de marine, il observa, très attentivement, le vol des oiseaux des mers du Sud. De retour en France, il réalisa un grand planeur dont la voilure, le fuselage et la queue étaient inspirés de l'albatros. Les ailes étaient mobiles en incidence.

Se tenant debout sur cette « barque ailée », baptisée « Albatros », il l'essaya sur les dunes de Tréfeuntec (Finistère), puis il l'installa sur un berceau fixé à une charrette. Le cheval lancé à vive allure, face au vent, permit à Le Bris de prendre de la hauteur. Le planeur se serait élevé jusqu'à une altitude que des observateurs ont, dans leur enthousiasme, évaluée à une centaine de mètres (ce qui semble surestimé). Le Bris se posa, avec adresse, sans dommage pour lui-même. Il fut ainsi, en décembre 1856, le premier

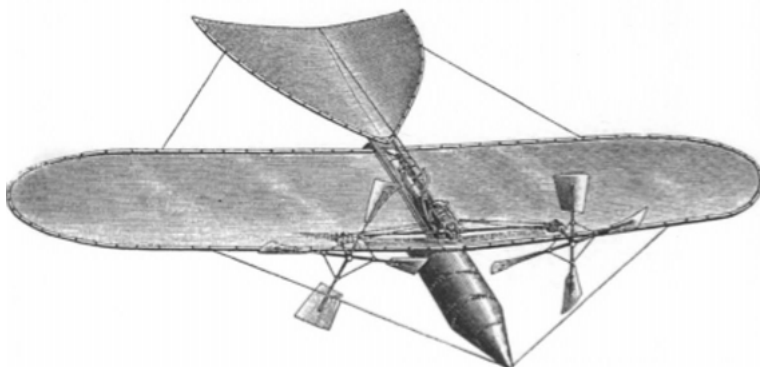
homme à s'élever avec un « plus lourd que l'air ». Le Bris déposa un brevet le 9 mars 1857 et recommença des essais avec un deuxième appareil en 1867 et 1868, dans le port de Brest.

Félix du Temple (1823-1890) déposa, en 1857, un brevet pour un aéroplane et travailla, avec son frère Jean-Louis, à mettre au point un appareil propulsé par une hélice mue par un moteur à vapeur et disposant des commandes essentielles pour son contrôle. Ils réalisèrent un modèle réduit qui s'envola et atterrit convenablement. C'était le premier vol d'un aéroplane quittant le sol par ses propres moyens. Inventeur génial, Félix du Temple déposa, en 1876, un autre brevet sur une machine à vapeur dont la circulation accélérée de l'eau apporta une véritable révolution dans la propulsion navale. Ceci constitua la première « retombée » navale de la recherche aéronautique.

Alphonse Pénaud (1850-1880) observa, lui aussi, très attentivement le vol des oiseaux. À partir du vol des corbeaux, il établit une théorie de la descente planée et détermina la traînée aérodynamique. Il mit en évidence le rôle du centrage (position du centre de gravité par rapport au centre de pression ou foyer). Il montra le rôle de la queue pour assurer la stabilité longitudinale et préconisa un calage de l'empennage horizontal à incidence négative, à l'inverse de George Cayley. Ses observations lui permirent de distinguer les parties des ailes des oiseaux qui servent principalement à la sustentation et celles qui servent surtout à la propulsion. Pénaud fit voler de petites maquettes au moyen d'une hélice entraînée par un ressort en caoutchouc. Ses observations, ses réflexions et ses réalisations de petites maquettes volantes lui permirent d'affirmer, en 1873, que « le problème du plus lourd que l'air est résolu sous trois formes principales : l'hélicoptère, l'aéroplane et l'oiseau mécanique ».

Dans un brevet, en date du 18 février 1876, il décrivit un aéroplane mû par un moteur de 30 CV et capable de voler à 25 m/s, avec une incidence de 2 degrés. Le contrôle de l'appareil était assuré par l'action du pilote sur deux gouvernails horizontaux et sur un gouvernail vertical. Il ne fait pas de doute que, si Pénaud avait vécu plus longtemps et s'il avait pu recevoir un soutien financier pour réaliser un appareil à l'échelle 1, il aurait été le grand précurseur de l'aviation.

Victor Tatin (1843-1913) s'est inspiré d'Alphonse Pénaud en réalisant, en 1879, un petit monoplan à air comprimé, doté de deux hélices quadripales.



Maquette d'aéroplane de Victor Tatin (Musée de l'Air et de l'Espace)

L'intérêt du gauchissement des ailes pour effectuer des virages fut découvert par **Louis Mouillard** (également à partir du vol des oiseaux). En 1881, il publia un ouvrage intitulé « *L'empire de l'air, essai d'ornithologie appliquée à l'aviation* ». Il déposa, avec Octave Chanute, un brevet concernant un appareil dont la stabilité latérale était assurée par le gauchissement des ailes.

Ainsi, l'ensemble des découvertes de Pénaud et de Mouillard préfigurait la conception de l'aéroplane que les Français allaient appeler « avion », en hommage à Clément Ader.

Clément Ader (1841-1925) fut incontestablement, parmi les précurseurs qui s'aventurèrent au XIX^e siècle dans la voie du « plus lourd que l'air », celui qui entreprit les plus grands efforts. Dès son enfance, il fut fasciné par le vol des oiseaux dont il remarqua le profil creux de leurs ailes. Ses activités, particulièrement fécondes dans l'industrie du téléphone, ne lui firent pas oublier ses observations de jeunesse sur les oiseaux et ses expérimentations avec des cerfs-volants. Dès 1871, il avait proposé la réalisation d'un cerf-volant capable de sustenter un observateur aérien du champ de bataille. Il mesura, à partir de 1873, la portance et la traînée de profils pouvant servir à des ailes ou à des pales d'hélices. Il pressentit que le profil doit être plus cambré pour les faibles vitesses que pour les vitesses élevées. Clément Ader est le premier à connaître l'ordre de grandeur de deux paramètres essentiels pour le vol : *la portance*, d'où la charge alaire et la surface de voilure nécessaire à la sustentation, et *la traînée*, d'où la puissance nécessaire à la traction. À l'aide d'un planeur de 8 m d'envergure, maintenu par des câbles, il put déterminer la finesse maximale, de l'ordre

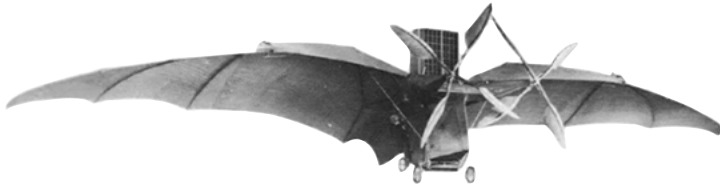
de 10, de ses profils. Clément Ader était bien conscient de la nécessité du contrôle de l'orientation suivant les trois axes, mais, pour lui, l'essentiel était de disposer d'un moteur léger et d'une hélice efficace.

Dès 1885, il définit son premier appareil motorisé qu'il dénomme Eole. À cette époque, le seul moteur autonome opérationnel était la machine à vapeur (la première voiture automobile à moteur à explosion ne sort qu'en 1892). Mais, pour obtenir un rapport poids/puissance bien inférieur à celui des machines à vapeur existantes (de l'ordre de 50 kg/CV), Clément Ader dut revoir complètement la conception et la réalisation des différents constituants des machines à vapeur, de façon à obtenir un ensemble léger, autonome en eau pour le vol de croisière et capable d'une forte puissance pendant la brève durée du décollage. Son objectif était un rapport poids/puissance de 6 kg/CV.

Le 10 avril 1890, Clément Ader déposa un brevet pour un « Appareil ailé pour la navigation aérienne, dit Avion » et, le 9 octobre 1890, il réussit, avec Eole, à voler à 15 cm de hauteur sur une cinquantaine de mètres, en ligne droite. L'Avion n° 2 fut conçu pour être doté d'un moteur du même type que celui d'Eole, mais beaucoup plus puissant (de l'ordre de 36 CV), soit près du triple, pour un poids supérieur de 50 % seulement. Cependant, le couple de renversement, qui aurait été produit par ce moteur entraînant une hélice quadripale de 3 mètres de diamètre, conduisit Clément Ader à abandonner la formule du monomoteur pour celle du bimoteur, avec deux hélices tournant en sens inverse et de pas opposé. Ceci l'obligea à modifier profondément la cellule et à réaliser un moteur de puissance intermédiaire entre celle du moteur d'Eole et celle du moteur de l'Avion n° 2. Ce moteur fournit 24 CV, avec le même poids que celui d'Eole (23 kg). Toutes ces transformations prirent beaucoup de temps et l'Avion n° 3 ne fut réalisé qu'en juillet 1897. Mais Clément Ader n'avait pas acquis la maîtrise complète du contrôle de vol de ses appareils. Ceci explique le relatif insuccès de la tentative du 14 octobre 1897, à Satory. Vécue par Ader comme une envolée ininterrompue de 300 m, elle ne fut pas attestée par les membres de la commission officielle qui étaient placés à une distance trop grande pour vérifier la réalité de cette envolée. N'ayant pas pu emporter la conviction des services officiels, Clément Ader ne renonça pas, il poursuivit ses études de nouveaux projets pendant quatre années.

En 1898, il s'intéresse au domaine naissant de l'automobile et persuade la Compagnie industrielle des téléphones de créer une branche automobile. La première automobile Ader sort en 1900. Elle est équipée du moteur à deux cylindres en V que Clément Ader avait breveté en 1898,

en vue des versions suivantes de ses appareils aéronautiques En 1903, sept voitures Ader sont engagées dans la course Paris-Madrid. Sur les 220 voitures qui prennent le départ, seulement 22 finissent la course, et, parmi celles-ci toutes les 7 voitures Ader ! En dépit de ces succès, la société Ader doit faire appel à des capitaux britanniques, avant de disparaître en 1907. Faute de crédits, Clément Ader met fin à ses travaux et se retire à Muret en 1906.



Avion n° 3 de Clément Ader (Revue Icare)

Le bilan des réalisations et des expérimentations de Clément Ader peut s'établir ainsi :

– *Des avantages incontestables* : un excellent profil, une forme en plan de la voilure correcte, des hélices bien conçues, un devis de masse bien calculé et respecté, un bilan propulsif satisfaisant, grâce à un moteur de puissance massive suffisante.

– *Des inconvénients majeurs* : aile souple de forme compliquée, difficile à réaliser et à réparer, hélices en matériaux légers (bambou, liège, papier entoilé), de comportement mécanique incertain, absence d'aérodynamisme du fuselage due à la difficulté d'intégrer la machine à vapeur, de fort encombrement vertical, et, surtout, des commandes de vol inadaptées (absence de commande d'inclinaison en roulis, commande d'assiette longitudinale par manivelle et vis sans fin permettant de déplacer les ailes vers l'avant ou vers l'arrière, ce qui correspondait à un réglage « trim » plutôt qu'à une commande de tangage).

Pour résumer, Clément Ader procéda :

- à l'observation fine du vol animal qui le conduisit à d'excellents profils d'ailes ;
- à un programme d'expérimentations conçu et réalisé avec rigueur et précision ;

– à des réalisations innovantes, notamment pour le moteur qui fut alors le premier au monde, grâce à sa puissance massique, à être monté sur un « plus lourd que l'air ».

Par contre, Clément Ader qui avait retenu, de la lecture de l'ouvrage de Louis Mouillard, les qualités du vol des chauves-souris, considéra que la roussette des Indes, grand chiroptère d'un mètre d'envergure, était un modèle à imiter, en raison de son aptitude à modifier le profil de ses ailes en vol, de son aisance à en modifier l'envergure ou à agir de façon différentielle sur leur extension. Toutes ces possibilités que la Nature avait offertes à la roussette des Indes étaient certes admirables, mais trop difficiles à obtenir avec les techniques de l'époque. La solution des ailes de chauves-souris était à rejeter d'emblée. Et pourtant, les difficultés de réaliser et de réparer des voilures aussi complexes n'ont pas rebuté Clément Ader qui estimait que des ailes de type membranaire, avec des possibilités d'articulation, pourraient rendre plus faciles les inévitables modifications qui résulteraient des essais. En outre, Clément Ader considérait, avec intérêt, la possibilité de replier la voilure lors du transport de ses appareils, notamment pour des utilisations militaires qu'il jugeait inéluctables.

En conclusion, Clément Ader, observateur perspicace, remarquable expérimentateur, brillant ingénieur, à la fois chercheur, inventeur et innovateur, était trop en avance sur son époque. Pour concevoir ses premiers appareils, il ne put bénéficier des progrès d'autres techniques, notamment de celles liées à l'automobile qui, avec le moteur à explosion, offrit des possibilités nouvelles à l'aviation. En 1885, l'industrie automobile n'existait pas encore. Pouvait-on concevoir l'avion et le réaliser avant l'automobile ?

Rappelons que cet excellent ingénieur était aussi un visionnaire dont les vues sur l'aviation militaire allaient être pleinement vérifiées, un quart de siècle plus tard. C'est à ce visionnaire perspicace que l'on doit cette affirmation : « Qui sera maître de l'air sera maître du monde ».

Lorsqu'il se replia à Muret, en 1906, Clément Ader renonça à construire des avions, mais il réfléchit à l'avenir de l'aviation, notamment de l'aviation militaire. Son livre prophétique « L'aviation militaire » parut au début de 1909, alors que Louis Blériot n'avait pas encore traversé la Manche et qu'aucune armée au monde n'avait encore acheté d'aéroplane.

Pour étayer ses prévisions, Clément Ader ébaucha plusieurs avant-projets d'avions, en examinant l'intérêt des matériaux métalliques, notamment de longerons en tôle d'acier très mince. Il abandonna alors

la formule de l'aile de chauve-souris, mais conserva le repliement de la voilure qui lui paraissait très utile pour garer les grands avions du futur. Il proposa de remplacer le revêtement de soie par de la toile caoutchoutée imperméable. Il conçut un monoplan géant, avec des ailes à courbure variable pour s'adapter à des vitesses différentes. Ses études prospectives le mènent aux avant-postes de la propulsion par réaction. Il ne voit pas de limite à la dimension des avions, mais il ne semble pas imaginer des vitesses supérieures à 300 km/h, ce qui, en 1912, semblait une vitesse énorme, comparée à celle de Blériot traversant la Manche à une soixantaine de km.

D'emblée, Clément Ader vit tout l'intérêt des avions pour leur emploi militaire : il distingua les « avions éclaireurs » pour l'observation, les « avions torpilleurs » pour le bombardement, les « avions de ligne » pour la chasse et la destruction en vol des appareils ennemis. Il souligna la nécessité d'une aviation embarquée sur des navires spécialisés et jeta les bases d'une guerre aéronavale. Il établit un plan d'organisation de la défense aérienne de la France et insista sur l'urgence de créer une armée aérienne, à l'instar de l'armée de terre et de la marine. Il souligna la nécessité d'instituer une école d'aviation militaire dont son livre « L'aviation militaire » préfigure l'enseignement qui y serait prodigué. Abandonnant tout droit à un remboursement par l'État des dépenses qu'il avait dû effectuer pour réaliser ses différents appareils, il demandait aux services officiels de financer, avec ces crédits, la fondation d'un prix à décerner au premier aviateur français qui réaliserait un avion monté par deux officiers et capable de faire le trajet, plusieurs fois répété, du camp de Satory au polygone de Vincennes, en passant sur Paris (but final de ses expériences). Cette supplique figure dans la lettre ouverte que Clément Ader adressa, le 12 octobre 1908, au Président de la République. Il concluait ainsi : « L'heure est solennelle, toute l'Europe va armer aériennement Il faut donner à la France, par l'aviation, la sécurité dont elle a impérieusement besoin ». Selon Clément Ader, « *L'aviation militaire deviendra toute puissante. D'elle dépendra l'avenir des nations* ».

Ainsi, l'épopée de Clément Ader comporta plusieurs phases :

– tout d'abord, une *phase d'observation* du vol des oiseaux et des chauves-souris, ce qui le conduisit à évoluer sur l'axe des disciplines scientifiques et techniques (aérodynamique, propulsion, matériaux), c'était la démarche du chercheur ;

– ensuite, une *phase de réalisation*. En concevant ses appareils qui tiraient profit des résultats de ses observations et de ses recherches, Clément Ader effectuait la démarche de l'inventeur et de l'ingénieur qui parcourt l'axe des réalisations ;

– enfin, une *phase de prospective*. En parcourant la troisième direction, celle des concepts d'emploi des futurs avions, Clément Ader présentait les besoins militaires qui n'étaient pas encore exprimés. Il en tirait toutes les conséquences nécessaires pour la Défense Nationale. Ce fut la démarche d'un grand innovateur qui révélait toutes les possibilités de l'aviation militaire.

Nul n'est prophète en son pays et peu nombreux sont les pionniers français qui se sont réclamés de Clément Ader. Il eut pourtant ses partisans. En 1900, Gabriel Voisin qui était alors engagé comme dessinateur à l'Exposition Universelle, découvrit l'Avion Ader n° 3. Ce fut, pour lui, une véritable révélation : « *Sous mes mains, se trouvaient les commandes mystérieuses qui donnaient vie à cette incomparable création. Suspendu aux palans, le grand oiseau oscillait lentement. Pourquoi était-il fixé dans cette enceinte ? Pourquoi n'était-il pas en plein ciel, survolant notre misère ?* ». Il faut aussi citer Henry Farman qui écrivit à Clément Ader, le 14 octobre 1908, pour lui exprimer son admiration et pour le féliciter pour son initiative d'avoir adressé une lettre ouverte au Président de la République, « *initiative d'autant plus précieuse qu'elle vient de la part du premier pionnier de cette nouvelle science, science si difficile mais qui a fait tant de prosélytes* ».

Mais, dans son premier livre, en 1904, Ferdinand Ferber ignore Clément Ader, alors qu'il reconnaît en Otto Lilienthal le père de la démarche aéronautique. Aucun hommage ne sera rendu à Clément Ader par les premiers utilisateurs de la commande au pied de la gouverne de direction, ni de la conjugaison de la roulette de queue à cette commande. De même, la création de Sup'Aéro, en 1909, par le Colonel Roche n'a pas été effectuée sous le patronage de Clément Ader.

En 1910, Gustave Eiffel publia, dans son livre « La résistance de l'air et l'aviation », les caractéristiques, mesurées en soufflerie, d'ailes analogues à celles des principaux appareils de l'époque et de profils en « ailes d'oiseau » qui coïncident avec « *la courbe universelle de sustentation* » de Clément Ader, sans mentionner le nom de celui-ci.

Les planeurs exploitent pleinement les « voies aériennes » que Clément Ader considérait comme essentielles pour optimiser le vol, en réduisant la

consommation grâce aux vents favorables, mais aucun hommage ne lui a été rendu pour ce qui est la base du vol à voile.

Les services officiels français n'ont pas compris l'intérêt d'une arme aérienne à base d'avions, sans doute parce que leur attention était accaparée, à cette époque, par les ballons et les dirigeables. L'attention de Charles Renard sur l'aéronautique fut due à Ferdinand Ferber qui était peu attiré par les réalisations de Clément Ader. En outre, la fragilité des appareils pouvait expliquer la réticence des militaires à les employer dans des conditions opérationnelles.

Clément Ader eut le grand tort d'avoir eu raison trop tôt !

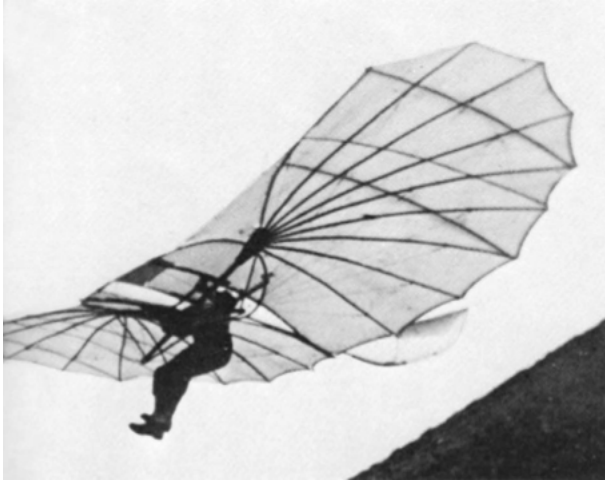
1.2 – Les pionniers de l'aviation

Otto Lilienthal (1848-1896)

Cet ingénieur mécanicien allemand étudia le vol animal de façon très approfondie. À partir de 1886, il analyse la résistance de l'air dans le vol des oiseaux et en publie le résultat, en 1889, dans ce qui sera le grand livre de sa vie : « *Der Vogelflug als Grundlage der Flugekunst* » (Le vol des oiseaux considéré comme la base de l'art du vol ». Sa première machine volante voit le jour en 1891. Il l'expérimente lui-même, en se lançant du haut de collines et effectue des vols de plusieurs centaines de mètres, avec, parfois même, des virages. Il crée, peu à peu, la méthode du vol plané. Ses différents appareils, du type monoplane ou du type biplane, ont tous le même aspect et le même principe de fabrication en bambou et rotin. Ils pèsent une vingtaine de kilogrammes et reproduisent les formes et les courbures des ailes d'oiseaux. Le pilote se tient par les avant-bras, court contre le vent en descendant une pente inclinée. Le planeur s'envole et le pilote le fait évoluer en inclinant son corps.

Lilienthal effectua environ 2 000 vols planés, en augmentant progressivement la hauteur de départ. Il s'exprimait ainsi : « La seule voie qui puisse conduire à une rapide solution du vol humain passe par une pratique systématique et énergique des expériences de vol véritable ».

Les meilleurs vols d'Otto Lilienthal dépassèrent 300 mètres, avec une durée de 12 à 15 secondes, mais se terminèrent tragiquement le 9 août 1896. Ce jour-là, une soudaine rafale de vent fit cabrer l'appareil qui décrocha et tomba d'une hauteur de 15 m. Lilienthal, gravement blessé, mourut le lendemain. Sa mort, qui interrompit ses travaux menés de façon très



Otto Lilienthal, en vol plané (Revue Icare)

rigoureuse, ne lui permit pas de passer du planeur à l'appareil à moteur, ce qui était son objectif final.

L'apport de Lilienthal est considérable, tant en aérodynamique (il détermina la variation des coefficients de portance et de traînée, avec l'incidence, d'où la « *polaire* de Lilienthal »), que pour la conception d'un planeur. Les frères Wright adoptèrent sa méthode scientifique et sa démarche pragmatique et le considérèrent comme « le plus grand des précurseurs ». La contribution d'Otto Lilienthal consacra le vol plané au détriment du vol battu, elle ouvrit la voie à l'aviation.

Il faut noter que la démarche d'Otto Lilienthal et celle de Clément Ader étaient assez complémentaires. Otto Lilienthal mit la priorité au vol plané, à partir de collines d'où il pouvait s'élancer sur leur pente, face au vent. Clément Ader, au contraire, considérait qu'il était essentiel de démontrer la possibilité de faire décoller un appareil motorisé, sur un terrain plat, tout en étant conscient que cette démonstration ne pouvait se prolonger par un vol réel dans des conditions de vent variable. Les essais de Clément Ader et de Lilienthal eurent lieu à la même époque, mais sans lien entre eux. On peut rêver à ce qu'aurait donné la coopération de ces deux grands précurseurs !

Octave Chanute

Cet Américain d'origine française, eut, aux États-Unis, une brillante carrière dans le génie civil (ponts et voies ferrées). Il fut, en 1891, président

de la Société des ingénieurs civils américains. En dehors de ses activités professionnelles, il se passionna pour le vol humain et se constitua, de 1874 à 1888, un dossier de documentation. En 1889, il découvrit, à Paris, les travaux de Louis Mouillard et le convainquit de déposer un brevet sur « les planeurs à queue, avec gauchissement des ailes pour assurer la stabilité latérale et la direction ».

Octave Chanute s'intéressa aussi aux expérimentations d'Otto Lilienthal qu'il fit connaître en publiant, en 1894, un livre intitulé « *Progress in flying machines* ». En s'inspirant de Lilienthal et de l'Australien Laurence Hargrave qui s'était élevé à cinq mètres du sol à l'aide de quatre cerfs-volants à structure cellulaire, le 12 novembre 1894, Octave Chanute élaborait, en 1896, un programme d'expérimentation de planeurs, pour aboutir à la formule du biplan léger, mais robuste (grâce aux mâts et aux haubans) et présentant une grande stabilité.

Chanute déclara, en 1903, à l'Aéro-club de France : « *Je n'ai eu d'autre mérite que de prendre les expériences de Lilienthal là où la mort l'avait surpris, de les perfectionner de mon mieux, jusqu'à ce que d'autres, plus heureux, les amènent au résultat parfait. Le progrès de la science, surtout en aéronautique, se fait par étapes successives* ».

Modeste et désintéressé, Chanute avait un véritable esprit scientifique. Il fut un excellent conseiller pour les frères Wright qui avaient pris connaissance, en 1899, du livre de Chanute. C'est en réalisant et en expérimentant des planeurs inspirés de ceux de Lilienthal que les frères Wright, aux États-Unis et Ferdinand Ferber, en France, firent accomplir à l'aviation ses premiers grands progrès.

Wilhelm Kutta et Nicolai Joukovski

Sur la théorie également, les vols de Lilienthal eurent un grand impact. Le mathématicien allemand Wilhelm Kutta s'appliqua à calculer la portance aérodynamique des profils minces incurvés utilisés par Lilienthal. Comme celui-ci avait procédé à ses nombreux essais en notant méthodiquement les paramètres et les conditions expérimentales, Kutta put vérifier la relation entre la portance et la circulation. Cette relation, qui fut précisée, en 1906, par le professeur russe Nicolai.Y. Joukowski est celle du « théorème de Kutta-Joukowski » qui est à la base de l'aérodynamique théorique. Comme il a été mentionné plus haut, la notion de « circulation » avait été introduite, dès 1894, par le britannique Frederick.W. Lanchester, mais il fallut attendre 1907, avec la parution de son livre *Aerodynamics* pour avoir un exposé détaillé de l'aérodynamique des ailes à envergure finie, avec, pour la première fois, la mention des tourbillons d'extrémité et de tourbillon lié.

Entre la fin des expérimentations de Lilienthal (1896) et la formulation du théorème de Kutta-Joukowski (1906), il s'écoula une décennie pendant laquelle l'expérimentation était en avance sur la théorie.

C'est essentiellement grâce à l'expérimentation que l'aéronautique est née à l'aube du xx^e siècle, avec les travaux des pionniers, tels que Samuel Pierpont Langley et les frères Wright, aux États-Unis et Henry Farman, Gabriel et Charles Voisin, Alberto Santos-Dumont, Ferdinand Ferber et Louis Blériot, en France

Les frères Wright

Wilbur Wright (1867-1912) et son frère Orville (1871-1948) furent, dès leur enfance, inséparables. Ce lien familial très étroit et leurs goûts communs, notamment pour la mécanique, contribuèrent beaucoup à leur réussite. Après avoir exercé leurs talents inventifs dans différents domaines (presse d'imprimerie, bicyclettes, machines-outils), ils se passionnèrent pour l'aviation. En 1899, Wilbur écrivit à la *Smithsonian Institution* pour obtenir des informations sur les machines volantes, en justifiant ainsi sa demande : « *Je me suis intéressé au vol mécanique depuis mon enfance quand je construisais de petites chauves-souris dans le genre des machines de Cayley et de Pénaud. Mes observations n'ont fait que renforcer ma conviction que le vol humain est possible. Ce n'est qu'une question de connaissance et d'adresse. Le peu que je pourrais apporter devrait aider celui qui atteindra le résultat final* ».

Ce résultat allait être acquis, en moins de cinq ans, par les frères Wright eux-mêmes !

La réponse de la Smithsonian Institution fut de leur conseiller de lire deux sources particulièrement riches d'informations, le livre d'Octave Chanute *Progress in flying machines* (1894) et *The aeronautical annuals* (années 1895-1896-1897), revue éditée par James Means. Ces documents constituaient une base de documentation qui relatait les réflexions et les expérimentations antérieures, de façon claire et cohérente.

Trois voies se dégageaient :

- construire d'emblée un aéronef d'une taille importante qui puisse être piloté par un homme ;
- commencer par un modèle réduit ;
- faire voler un planeur, avant de passer à un aéronef motorisé.

La première voie avait été celle de Clément Ader qui avait prouvé, avec *Eole* en octobre 1890, qu'avec assez de puissance, un appareil ailé pouvait

décoller du sol, et effectuer un saut en ligne droite sur une courte distance et à très faible hauteur. Mais Clément Ader n'avait aucun moyen pratique de contrôler sa machine en vol.

La seconde voie avait eu de nombreux adeptes, dont, notamment, Alphonse Pénaud qui, bloqué dans un fauteuil roulant, conçut différents modèles réduits propulsés par une hélice entraînée par un moteur à caoutchouc, qui contribuèrent à susciter l'intérêt pour l'aviation. Il parvint à trouver les conditions de la stabilité des aérodynes à ailes fixes. Il inspira ainsi les frères Wright qui considérèrent Pénaud comme l'un de leurs plus importants prédécesseurs.

La troisième voie était la bonne. Elle fut défrichée par George Cayley et, surtout, par Otto Lilienthal. Celui-ci, grâce à ses 2 000 vols effectués avec 16 modèles de planeurs, constitua un ensemble de résultats aérodynamiques dont les frères Wright prirent connaissance avec intérêt. Ils procédèrent selon une démarche pragmatique et méthodique dont ils ont fixé le début à la mort d'Otto Lilienthal en août 1896. Après une phase de réflexion, de 1897 à 1898, ils consultèrent la documentation qui leur fut fournie par la Smithsonian Institution en 1899 et celle qu'ils avaient pu glaner de leur côté. Cette documentation joua un rôle déterminant, comme l'ont reconnu les frères Wright : « *Nous étions, en 1898, sur le point d'abandonner nos travaux lorsque le livre de Mouillard nous est tombé entre les mains. Nous avons alors continué avec les résultats que vous savez* ».

Les frères Wright, ayant analysé les obstacles qui s'étaient jusqu'alors opposés au vol humain, étudièrent et réalisèrent :

- une voilure ayant des caractéristiques aérodynamiques et structurales adéquates ;
- un propulseur efficace et léger ;
- un dispositif de contrôle et de commande permettant le contrôle de la stabilité de l'appareil et de ses évolutions.

À la différence de leurs prédécesseurs, les frères Wright considérèrent le problème dans son ensemble et voulurent réaliser un appareil qui puisse, non seulement décoller, mais aussi évoluer et atterrir sans dommage. Clément Ader avait, bien entendu, saisi l'ensemble du problème, mais il croyait préférable de le résoudre pas à pas, en cherchant d'abord à prouver la possibilité du décollage ; le contrôle de la stabilité et le pilotage auraient été étudiés ultérieurement. Pour les frères Wright, les commandes de vol devaient être, dès le début, une composante essentielle.

Première étape : le cerf-volant (1899)

Quelques semaines seulement après avoir reçu la documentation fournie par la Smithsonian Institution, les frères Wright expérimentèrent, sur un petit cerf-volant, un système de commandes qu'ils comptaient incorporer sur leurs appareils ultérieurs. Convaincus que le maintien de l'équilibre latéral était essentiel, ils décidèrent que ceci pourrait être obtenu en agissant, de façon différentielle, sur la portance des ailes, en gauchissant leurs extrémités dans des sens opposés. Le biplan à entretoises et à treillis était une solution qui permettait de conserver à l'aile sa rigidité, tout en lui donnant la possibilité d'une certaine torsion à ses extrémités. Le cerf-volant biplan de l'été 1899 pouvait ainsi évoluer selon les ordres manuels de l'opérateur qui agissait sur deux câbles fixés aux extrémités des ailes. La stabilité en tangage était assurée par une surface horizontale placée à l'avant du biplan (disposition « canard »). La structure en treillis et le dispositif de contrôle de ce cerf-volant furent aussi les principales caractéristiques des appareils que les frères Wright réalisèrent ensuite. Ils se lancèrent dans la conception de planeurs, puis d'aéroplanes de même conception, mais qui étaient successivement améliorés, en fonction des résultats d'études entreprises de façon rigoureuse. Ils étaient convaincus que l'appareil capable de voler devait être un ensemble cohérent et qu'il devait former, avec son pilote, ce que nous appelons maintenant un « système ». Ceci est manifeste en ce qui concerne la solution qu'ils adoptèrent pour le contrôle de leur appareil en roulis et en tangage. Alors qu'Otto Lilienthal contrôlait le tangage en déplaçant ses jambes vers l'avant ou vers l'arrière, les frères Wright le contrôlèrent en agissant sur une surface horizontale qu'ils disposèrent en avant de l'appareil.

Cette disposition de type « canard », différente de celle retenue par Pénaud, Lilienthal et Chanute qui avaient monté leur empennage en arrière, présentait deux avantages :

- protéger le pilote en cas de crash ;
- réduire les conséquences d'un décrochage, car celui-ci se produisait sur l'empennage, avant de se produire sur la voilure principale ; l'appareil s'inclinait en léger piqué et reprenait assez de vitesse pour pouvoir se redresser.

Mais, en contre-partie, cette disposition conduisit les frères Wright à reporter trop en arrière le chargement de leur Flyer. Ce centrage arrière rendait leur appareil statiquement instable, d'où la nécessité d'un pilotage très réactif, à laquelle se heurtèrent de nombreux apprentis pilotes ultérieurs. Parmi les mérites des frères Wright, il ne faut pas oublier de citer

leur adresse pour contrôler leurs différents appareils, adresse constamment améliorée au cours des diverses étapes de leur démarche.

Deuxième étape : le planeur (1900-1901)

Les essais des frères Wright, avec leur cerf-volant en 1899, constituèrent la première étape de leurs expérimentations. Les résultats acquis confirmèrent la pertinence de leurs conceptions relatives au pilotage et ils purent les appliquer au planeur qu'ils essayèrent en 1900. Les essais qu'ils effectuèrent à partir de dunes à Kitty Hawk, d'abord en tenant le planeur en laisse, comme un cerf-volant, puis en le lâchant et en le pilotant en étant à bord, montrèrent la validité de leurs concepts, mais la longueur de leur vol plané était inférieure à leurs prévisions. Pour augmenter la portance, ils agrandirent les ailes de leur planeur biplan, puis accrurent la cambrure du profil.

Troisième étape : le planeur amélioré (1902)

Cependant, les résultats de la deuxième étape (1901) étant inférieurs à ceux qu'ils attendaient en appliquant les valeurs des coefficients de portance et de traînée publiées par Otto Lilienthal, les frères Wright décidèrent de fabriquer une petite soufflerie et y essayèrent des profils d'ailes de formes différentes. Cette soufflerie avait une veine de section carrée de 40 cm de côté et de longueur 2 m, le courant d'air était produit par un ventilateur qui pouvait engendrer une vitesse de 50 km/h. La soufflerie était équipée de deux balances (l'une pour la portance, l'autre pour la traînée) que les frères Wright avaient réalisées eux-mêmes, avec des lames de scies et des rayons de bicyclette. Les résultats sur deux cents profils et ailes, de formes et de cambrures différentes, leur permirent de corriger les coefficients aérodynamiques des tables de Lilienthal et de disposer de nouvelles tables. Un autre résultat très précieux fut de trouver que la portance d'une aile de grand allongement est supérieure à celle d'une aile courte de même surface.

Le planeur de 1902 eut une envergure de 9,60 m au lieu de 6,60 m, tout en ayant une surface de voilure à peine augmentée par rapport à celle des planeurs précédents. En outre, le planeur de 1902 comportait un empennage vertical fixe destiné à supprimer le lacet inverse (créé par le gauchissement des ailes) qui avait été une difficulté rencontrée lors de la deuxième étape. Cette disposition fut ensuite complétée par un gouvernail de direction qui était mû par la commande de gauchissement. Les frères Wright effectuèrent plus de sept cents vols avec leur planeur, en volant sur une distance atteignant 150 à 200 m.

Quatrième étape : le vol à moteur (1903)

La troisième étape (1902) fut décisive, car elle permit aux frères Wright de passer à l'étape finale, celle du vol à moteur. Jusqu'alors, ils ne s'étaient pas souciés du moteur, pensant, à juste titre, que les progrès rapides des moteurs à explosion en ce début du xx^e siècle permettraient de se procurer, à un prix acceptable, un moteur de puissance de 8 à 9 CV et d'un poids inférieur à 180 livres.

En décembre 1902, les frères Wright, n'étant pas satisfaits des offres qui leur étaient faites, se décidèrent à réaliser eux-mêmes un moteur dont leur mécanicien Charlie Taylor fit, tout seul, l'usinage. La puissance obtenue était de 12 à 16 CV, donc suffisante, mais elle ne pouvait être fournie que pendant un temps court, du fait de la rusticité du refroidissement.

Quant à l'hélice, constatant qu'aucune théorie n'était disponible sur le plan pratique, les frères Wright la considèrent comme une voilure tournante. Ils sélectionnèrent un profil pour les pales et l'essayèrent sur un montage à axe horizontal disposé dans leur soufflerie. Pour créer un important débit d'air, (nous dirions maintenant pour obtenir un bon rendement propulsif), ils décidèrent d'utiliser deux hélices de grand diamètre (2,60 m) et, pour ne pas perturber l'écoulement sur les ailes, ils les firent propulsives (à l'arrière des ailes) et non pas tractrices (à l'avant).

Vers le milieu de l'été 1903, ils entreprirent la réalisation de la cellule. Ils augmentèrent la surface alaire, en portant l'envergure à 12,30 m et la corde à 2 m. La masse totale du Flyer était de 700 livres. Les commandes étaient celles du planeur. Le berceau du pilote commandait le gauchissement et la gouverne de direction qui étaient couplés. Un levier permettait à la main gauche de commander la gouverne de profondeur. Un petit levier, à droite, permettait de couper le moteur. Le pilote disposait d'un anémomètre, d'un chronomètre et d'un compte-tours. Pour le lancement, on avait disposé une rampe de 20 m de longueur sur laquelle descendait le Flyer, monté sur un chariot à roulettes.

Les premiers essais eurent lieu avec, aux commandes, Wilbur, le 14 décembre 1903 et Orville, le 17 décembre. Non encore habitués à l'instabilité longitudinale et à la grande sensibilité de la commande en tangage, les deux frères ne purent empêcher le Flyer de se cabrer, de décrocher et de piquer sur le sol.

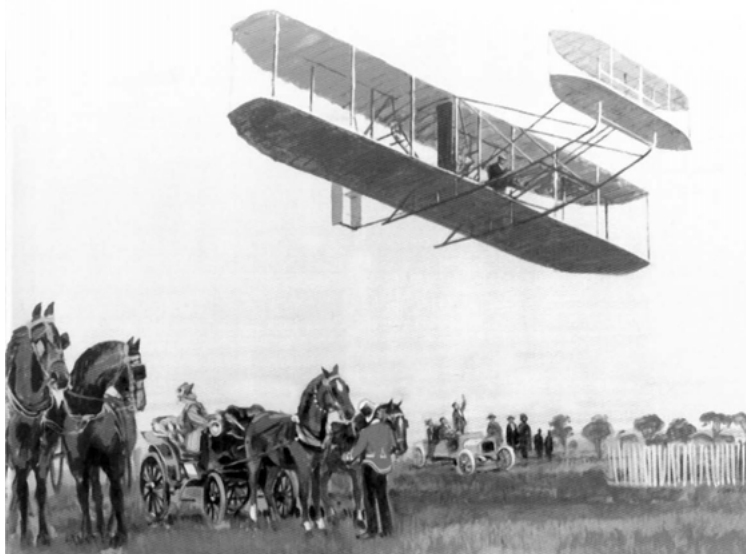
Finalement, Wilbur parvint à maîtriser l'appareil et à effectuer un vol de 260 mètres en 59 secondes. C'est ce dernier vol du 17 décembre 1903, effectué au cours de la quatrième étape du processus méthodiquement conçu et appliqué par les frères Wright, qui est considéré comme étant le

premier vol d'un « plus lourd que l'air piloté et motorisé », marquant ainsi la naissance officielle de l'aviation.

Cinquième étape (1904-1905)

En 1904, les frères Wright remédièrent aux défauts d'instabilité longitudinale et de trop grande sensibilité de la gouverne de tangage et s'exercèrent à effectuer des virages. Le 5 octobre 1904, Wilbur réussit un vol de 39 minutes, en faisant trente fois le tour du terrain qui leur avait été accordé à Huffman Prairie, près de Dayton, il avait ainsi parcouru 39 km.

Cette cinquième étape marque la fin des travaux des frères Wright, en ce qui concerne la conception, la réalisation et l'expérimentation de leurs appareils. Leur succès était dû à leur esprit méthodique associé à leur talent en mécanique, ainsi qu'à leur caractère opiniâtre et à leur volonté d'aboutir en cherchant à résoudre de façon pratique les problèmes rencontrés. Les années ultérieures furent consacrées à la promotion de leur invention, protégée par des brevets, plutôt qu'à la poursuite des améliorations que d'autres pionniers, notamment en France allaient apporter.



31 décembre 1908 : Wilbur Wright bat les records du monde de durée et de distance (2 h 20 minutes et 124,700 km), à Auvours, près du Mans (Revue Icare)

Les frères Wright eurent le grand mérite de :

- réaliser le premier système aéronautique réussi : leur *Flyer* associait aérodynamique, propulsion, structure, contrôle de vol, en une synergie efficace,
- construire des hélices ayant un excellent rendement propulsif, grâce à leur conception à partir d'un profil d'aile dont l'orientation (le pas) est fonction de la distance à l'arbre moteur,
- concevoir le pilotage suivant les trois axes, en attachant une grande importance au contrôle latéral pour effectuer les virages, et sans rechercher la stabilité longitudinale. Cette conception était à l'inverse de la plupart des autres pionniers qui s'inspiraient davantage de la conduite des navires par leur gouvernail de direction et estimaient indispensable de conserver une grande stabilité longitudinale, au détriment de la maniabilité. Sur ce plan, aussi, les frères Wright étaient les premiers dans la bonne voie.

On peut constater que chacune des propriétés des *Flyer* avait été anticipée par l'un ou l'autre des précurseurs (Cayley, Pénaud, Phillips, Lilienthal, Chanute), mais aucune n'avait été approfondie avec la rigueur des frères Wright et n'avait été associée aussi harmonieusement aux autres propriétés dans le même appareil.

Il faut aussi souligner que les frères Wright ont conçu et réalisé, eux-mêmes, les moyens expérimentaux, la cellule de leur appareil, le moteur et l'hélice, absolument tout.

Ils ont effectué, eux-mêmes, de multiples essais en vol, en procédant de manière progressive très rationnelle, depuis leur premier planeur jusqu'au *Flyer* des vols mémorables de décembre 1903.

Les frères Wright sont bien, eux, les auteurs de la véritable naissance de l'aviation !

À côté des « espèces » vite disparues qui conduisaient à des voies en impasse, se développèrent progressivement celles décrites dans les paragraphes relatifs aux précurseurs tels que les Britanniques George Cayley, Francis Herbert Wenham, Horatio Phillips, Frederick W Lanchester et les Français Jean-Marie Le Bris, Félix du Temple, Alphonse Pénaud, Louis Mouillard, Clément Ader. Ils apportèrent tous leur pierre à l'édifice. Ce fut ensuite l'époque des pionniers, dont les plus grands furent Otto Lilienthal, les frères Wright et les Français Charles Renard, Ferdinand Ferber, les frères

Voisin, les frères Farman et Louis Blériot. Ceux-ci furent à la base de la naissance de l'aviation en Europe, peu après les vols mémorables des frères Wright aux États-Unis.



Santos-Dumont sur Demoiselle (Musée de l'Air et de l'Espace)

Il est juste de mentionner aussi le Brésilien Alberto Santos-Dumont, Parisien d'adoption. Il acquit la renommée, avec ses vols spectaculaires en dirigeable, dont celui effectué le 19 octobre 1904, avec un aller-retour Saint-Cloud –Tour Eiffel. En 1906, il réussit son premier envol sur aéroplane et se voit attribuer la première performance contrôlée et homologuée : vol de 220 m à 6 m du sol en 21 s, soit à la vitesse de 41,29 km/h. Il réalise ensuite le modèle « Demoiselle », avec lequel il effectue des vols de plus longue durée. Cet appareil se caractérise par son extrême simplicité : le « fuselage » est un simple trièdre formé par trois tiges de bambou qui soutient un siège rustique pour le pilote placé au-dessous de la voilure.

Souhaitant voir construire beaucoup de « Demoiselle », Santos-Dumont renonce à ses droits d'inventeur et deux firmes, Duthail-Chalmers et Clément-Bayard en réalisent une centaine, au total. De construction facile, la « Demoiselle » est le premier aéroplane d'un prix accessible. Mais ce ne pouvait être le point de départ d'une lignée de grand avenir. Il fallait, au préalable, apporter des innovations sur des points essentiels, tels que la technique de décollage, le manche à balai et les ailerons pour le pilotage en roulis. Il fallait aussi améliorer notablement la propulsion, avec des moteurs fiables, assez puissants et plus légers. Il fallait, de toute façon, approfondir l'aérodynamique.

Les premières souffleries

L'emploi d'une soufflerie pour étudier l'aérodynamique autour d'un profil d'aile remonte à 1871. Le Britannique Herbert Wenham utilisa une

veine longue de 3,6 m et de section carrée (45 × 45 cm), ouverte aux deux extrémités. L'air y était insufflé par un ventilateur mû par la vapeur. Pour améliorer l'écoulement et éviter la rotation de l'air, un autre Britannique, Horatio Phillips, utilisa, en 1884, un jet de vapeur pour aspirer l'air dans la veine : c'était la première soufflerie à trompe à vapeur.

En 1894, Charles Renard construisit une soufflerie pour étudier la stabilité des dirigeables. En 1900, Jules-Étienne Marey visualisa l'écoulement dans une soufflerie à l'aide de filets de fumée qu'il photographia.

En 1901, les frères Wright, bien que sceptiques sur les résultats obtenus jusqu'alors, construisirent leur propre soufflerie. Ces essais en soufflerie précisèrent les caractéristiques aérodynamiques de leurs profils d'aile, montrèrent l'intérêt des ailes à grand allongement et permirent ainsi les succès de 1902 et 1903.

Le professeur russe Joukovski réalisa en 1902 une soufflerie qui lui permit de compléter ses études théoriques par une approche expérimentale rigoureuse.

De nombreux progrès furent ensuite apportés aux souffleries et favorisèrent les progrès de l'aviation. Parmi les principaux protagonistes de ces progrès, il faut citer Gustave Eiffel et Ludwig Prandtl.

Après une brillante carrière dans le génie civil, **Gustave Eiffel** (1832-1923) commence, à plus de 60 ans, une nouvelle carrière dans un tout autre domaine, celui de l'aérodynamique, en s'intéressant aux expériences de l'académicien Louis Cailletet qui entreprit, en 1892, de mesurer la résistance de l'air en laissant tomber, depuis le 2^e étage de la Tour, des parachutes faiblement lestés. En 1904, Gustave Eiffel entame une série de travaux expérimentaux, en faisant tomber, depuis le deuxième étage de la Tour, des surfaces et des volumes lourds, afin d'étudier la résistance de l'air à plus grande vitesse. Il constate l'existence d'une dépression sur la surface externe d'un profil (extrados) et d'une surpression sur la surface interne (intrados).

En 1907, Gustave Eiffel décide de réaliser une soufflerie ayant des caractéristiques supérieures à celles des souffleries existantes : section de veine plus grande et ventilateur en aval, de façon à ne pas perturber l'écoulement dans la veine, mesures précises et non intrusives, par balance aérodynamique et micro-manomètres répartis à la surface de la maquette.

En 1912, Gustave Eiffel crée un laboratoire à Auteuil, avec une soufflerie plus puissante et plus grande, capable de vitesses de 30 à 40 m/s, dans



Gustave Eiffel et sa soufflerie d'Auteuil (Laboratoire Eiffel)

une veine de 2 m de diamètre. Ces performances, remarquables à cette époque sont obtenues grâce à l'emploi d'un convergent à l'entrée et d'un divergent à la sortie de la veine, ce qui permet d'utiliser un ventilateur de 50 CV, au lieu de 400 CV, en l'absence de convergent-divergent. Ce type de soufflerie dit « Soufflerie Eiffel » se généralisa rapidement dans le monde entier.

Ludwig Prandtl (1875-1953) est considéré comme le fondateur de l'aérodynamique théorique et expérimentale. Il lui revient le grand mérite d'avoir déterminé, pour la première fois, la portance aérodynamique d'une aile à partir de ses caractéristiques géométriques et d'avoir établi une théorie rigoureuse de la portance des ailes d'envergure finie. Ses travaux sur la couche limite lui donnèrent une notoriété telle qu'en 1904, il fut nommé directeur de l'Institut de Physique technique à l'Université de Göttingen. Il y créa ce qui devint le plus grand centre de recherche aérodynamique au monde, pendant la période 1904-1930. De 1905 à 1910, il étudia les écoulements supersoniques et mena, de pair, les études théoriques sur les ondes de choc et les ondes de détente et les études expérimentales à l'aide d'un dispositif optique, tout nouveau, la strioscopie. Prandtl reçut, en 1908, la visite du Britannique Frederick W. Lanchester qui avait, dès 1894, introduit la notion de « circulation » autour d'un profil d'aile et avait établi sa relation avec la portance aérodynamique. À la suite de cet entretien avec Lanchester, Ludwig Prandtl développa sa « théorie de la ligne portante ». En 1918, Max Munk, collègue de Prandtl, introduisit le concept de « traînée induite » (traînée liée à la portance). Une grande partie des travaux de Ludwig Prandtl et de son équipe sur la théorie de

l'aile d'envergure finie, fut classée secrète par le gouvernement allemand pendant la première guerre mondiale et ne fut publiée qu'à partir de 1918. Jusqu'alors aucune théorie scientifique n'était disponible pour le calcul, *a priori*, des caractéristiques aérodynamiques des ailes d'avions. Celles-ci ne pouvaient qu'être mesurées, *a posteriori*, en soufflerie.

Si le nom de Gustave Eiffel est attaché au concept de soufflerie à circuit ouvert, avec convergent et divergent, celui de Ludwig Prandtl est lié au concept de soufflerie à circuit fermé dont le premier exemplaire fut réalisé à Göttingen en 1908. Ce concept présente, par rapport à celui Gustave Eiffel, les avantages suivants :

- insensibilité de l'écoulement aux fluctuations de l'air extérieur,
- possibilité de contrôler la pression et l'humidité dans la veine,
- puissance nécessaire plus faible (une partie de l'énergie cinétique de l'air est récupérée).

Une soufflerie de deuxième génération fut construite à Göttingen en 1916, avec une chambre de tranquillisation dans le circuit fermé. La tranquillisation de l'écoulement fut aussi adoptée par Gustave Eiffel, par l'emploi de filtres en amont de la veine.

En 1917, Ludwig Prandtl démontra la supériorité des profils d'épaisseur relative maximale de 13 %, par rapport aux profils qui étaient jusqu'alors utilisés pour les avions de combat, et dont l'épaisseur relative ne dépassait pas 5 %. Ces résultats étaient conformes à la théorie de la circulation établie par Lanchester. Anthony Fokker comprit immédiatement le parti qu'il pouvait tirer des profils épais :

- ils permettaient de réaliser des ailes sans haubans, donc d'obtenir, pour l'ensemble de l'avion, une traînée aérodynamique plus faible qu'avec des ailes haubanées,
- leurs coefficients de portance plus élevés que ceux des profils minces permettaient d'obtenir une vitesse ascensionnelle et une manoeuvrabilité plus grandes.

C'est ainsi que furent réalisés successivement le triplan Fokker Dr I, avec lequel s'illustra Manfred von Richthofen, surnommé « le baron rouge », et le Fokker D VII qui, mis en service au début de 1918, surclassa ses adversaires tels que le SPAD XIII et le Sopwith Camel qui, tous deux, utilisaient des profils minces. Le Fokker D VII fut ainsi le chasseur le plus efficace de la première guerre mondiale.