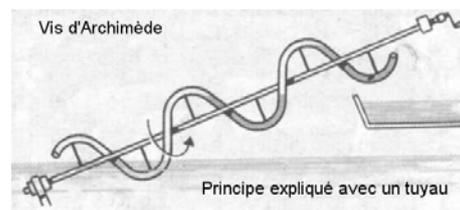


# L'hélice propulsive <sup>1</sup> à travers les âges.

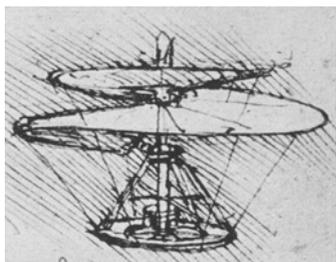
L'hélice<sup>1</sup> n'a longtemps connu que des applications loin des domaines de la sustentation et de la propulsion d'un mobile, par exemple la vis d'Archimède pour élever l'eau, vis « sans fin » inventée par Archimède au III<sup>e</sup> siècle avant J-C, lors de son séjour en Égypte et encore en usage de nos jours.



Là, l'hélice ne sert pas à la propulsion d'un engin par déplacement de matière, mais à la propulsion de matière, en l'occurrence de l'eau, par rotation dans un engin fixe. →



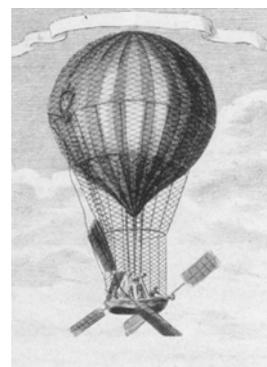
Qui n'a pas joué, dans son enfance, avec l'hélice chinoise, connue en Europe dès le Moyen Âge. Cela fait remonter très loin dans le temps l'invention du rotor sustentateur. Ce type de jouet, modernisé bien sûr, basée sur son ancêtre chinois, est toujours en vente de nos jours.



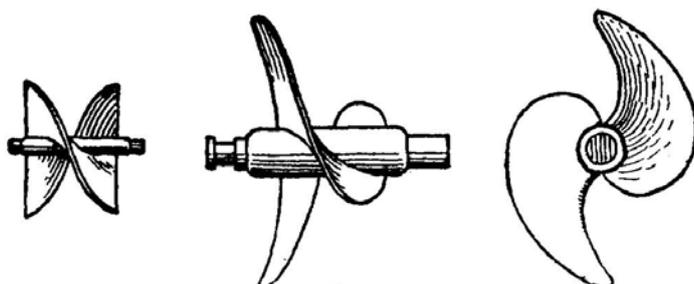
L'intérêt de son application à des machines volantes a été également perçu assez tôt.

← Les célèbres esquisses de Léonard de Vinci en témoignent, du moins pour la sustentation. De nombreux projets de modèles volants (aérostats et avions) apparus aux XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècles furent équipés d'hélices.

Alban et Vallet, directeurs de la manufacture de produits chimiques de Javel, construisirent par souscription en 1785 un très beau ballon qui était destiné à faire des ascensions captives payantes et à offrir aux souscripteurs la faculté d'effectuer des ascensions libres. Disposant d'un hangar, les aéronautes ne sortaient le ballon que par temps calme et le ramenaient à la corde du point d'atterrissage à Javel. Un nombre important d'ascensions furent ainsi exécutées en août et septembre 1785. Le ballon portait le nom du comte d'Artois, le futur Charles X, qui aurait pris part à des ascensions captives. Alban et Vallet avaient équipé la nacelle de rames à palettes s'effaçant dans un sens et destinées à commander soit les mouvements verticaux, soit la propulsion, dont le principal organe était une grande hélice, essayée avec deux ou quatre pales et avec laquelle il est certain qu'ils obtinrent d'appréciables manœuvres dans le lit du vent.



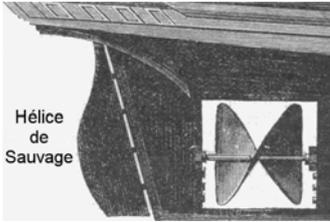
L'hélice fut proposée pour la première fois comme moteur des navires, en 1752, par le Suisse Daniel Bernoulli. Il projetait de faire tourner rapidement au milieu de l'eau une sorte d'aube de moulin-à-vent. L'idée de Bernoulli ne fut suivie d'aucune application pratique très concluante, pas plus que celle de l'ingénieur français Paucet qui proposa, en 1768, de remplacer les rames par des hélices. L'Américain David Bushnell fut aussi l'un de ces précurseurs. En 1777, il adaptait une hélice au bateau-plongeur qu'il venait d'inventer. En 1785, l'Anglais Joseph Bramah breveta une hélice à seize pales pour propulser les bateaux. Mais la première expérience fut faite par l'Américain John Stevens et l'Anglais d'origine française, sir Marc Isambard Brunel, qui accouplèrent deux hélices quadripales à leur chaudière monocylindre pour remonter la Passaic River (la machine et ses hélices se trouvent au Science Museum de Londres). Charles Dallery d'Amiens, en 1803, proposa l'emploi de l'hélice et fit même quelques essais. Il est même intéressant de noter que les essais de Dallery coïncidèrent avec ceux de Fulton sur l'emploi des roues à aubes. Ils ne réussirent pas à attirer l'attention et à valoir à son auteur la subvention qu'il sollicitait pour les continuer. On objectait, en outre, que l'eau n'offrirait pas assez de résistance au mouvement de l'hélice pour faire avancer le navire : Elle devait, disait-on, fuir sous le navire, bien loin de le faire avancer. Le capitaine du génie, Delisle, eut beau démontrer par le calcul, qu'il n'en serait pas ainsi, il ne put obtenir du ministère de la marine que son projet fût soumis à des essais réguliers.



**FORMES DES HÉLICES PRIMITIVES**

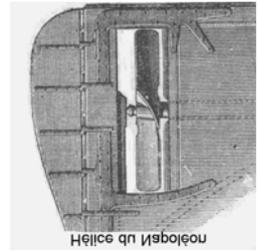
Après les essais infructueux du Français Dallery et de l'Autrichien Russel, les tentatives de J. Ericsson furent enfin couronnées de succès en 1837. Son système de deux hélices fut appliqué à un remorqueur, le Francis-Ogden. À la même époque, les Anglais Smith et Rennie, mettaient au point un système comparable et fondaient une société, la « Compagnie de propulsion par la vapeur », qui fit construire en 1838/39 un grand navire, l'Archimède. En 1843, Isambard K. Brunel construisit le premier vapeur transatlantique à hélice, le Great Britain, de 98 m de long.

<sup>1</sup> Le terme « propulsive » indique ici le moyen utilisé pour faire avancer un mobile. Dans beaucoup d'explications, ce terme indique une hélice *poussant* l'aéronef et placée à l'arrière alors que « tractive » indique une hélice *tirant* l'aéronef et placée à l'avant.



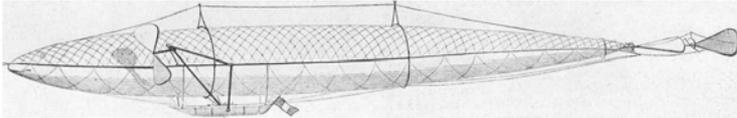
Deux ans plus tard, l'Amirauté britannique attacha deux vapeurs par l'arrière : l'Alecto avait des roues à aubes, le Rattler, était muni d'une hélice. Toute la puissance de l'Alecto ne l'empêcha pas de se faire remorquer par le Rattler : la supériorité de l'hélice était prouvée.

En France, Sauvage et Normand firent enfin triompher l'invention sur le Napoléon en 1841 avec la traversée entre Marseille et la Corse à une vitesse de dix nœuds.



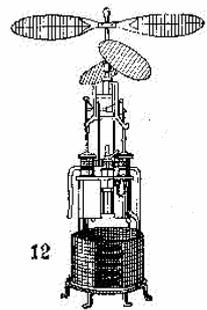
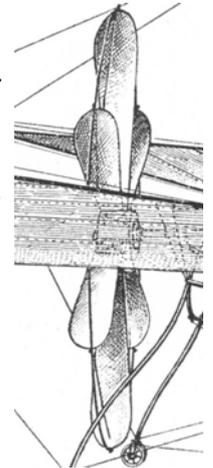
Pierre Jullien, simple ouvrier, devenu horloger, était certainement un homme de génie.

Passionné pour la navigation aérienne, il a su mettre dans ses essais une méthode, un instinct, une ingéniosité et un sens des proportions qui doivent le placer tout à fait en tête des précurseurs de l'aéronautique. Sans aucune fortune, il commença vers 1845 ses expériences sur la propulsion et c'est sur l'hélice qu'il fixa ses recherches : il mesurait la vitesse de petits chariots courant sur un fil de fer sous la traction d'hélices de différentes formes, mues par un mouvement d'horlogerie. Essayant enfin ses hélices adaptées à un ballon-poisson en baudruche, il obtint la propulsion et effectua des essais couronnés de succès à l'Hippodrome du 6 au 10 novembre 1850. Construit avec élégance, ce ballon de 1,2 m<sup>3</sup>, était propulsé par deux hélices mues par un mouvement d'horlogerie.



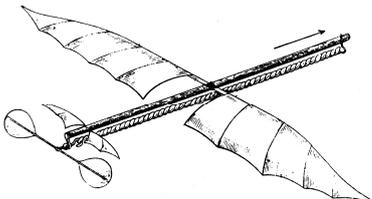
Le tout ne pesait que 1160 grammes. En 1858, Jullien faisait voler un petit aéroplane d'un mètre de long, ne pesant que 36 grammes et actionné par deux hélices dont le moteur était un fil de caoutchouc enroulé et tendu sur deux cônes, comme des fusées de montre. En cinq secondes, cet aéroplane parcourait douze mètres. Jullien est mort en 1876, âgé de soixante-deux ans, pauvre et oublié, à l'asile Sainte-Anne.

Le 2 mai 1857, Félix du Temple déposa le brevet d'une machine volante qu'il décrivait ainsi : « L'oiseau fait avec le plan de ses ailes et de sa queue un angle aigu avec l'horizon. L'air s'engageant sous les ailes et la queue avec la vitesse que l'oiseau s'est imprimée détermine une force normale au plan de ces ailes et de cette queue. Cette force produit une composante verticale qui détruit la pesanteur de l'oiseau. Exactement l'effet produit par le vent sur un cerf-volant. Seulement, dans le cas qui nous occupe, c'est la surface qui va au-devant de l'air ou qui frappe l'air. ». L'appareil comprenait un train d'atterrissage d'une facture nettement plus évoluée que celle de l'aéroplane de Henson, une hélice tractive à douze pales d'un diamètre de quatre mètres avec un pas de sept mètres →, une queue destinée à jouer le rôle de commande de profondeur et un gouvernail de direction. Mais la caractéristique la plus remarquable de cette machine résidait dans sa construction en aluminium, matériau que, pour la première fois dans l'histoire des plus lourds que l'air, le marin français proposait d'utiliser. Félix du Temple réalisa un modèle réduit qu'il fit voler en 1857, au moyen d'un mécanisme d'horlogerie dont le mouvement actionnait une hélice.



En 1863, Nadar fonde la Société d'encouragement à la locomotion aérienne et publie le Manifeste de l'autocommotion aérienne : « C'est l'hélice, la sainte hélice ! [...] qui va nous emporter dans l'air, comme la vrille entre dans le bois ».

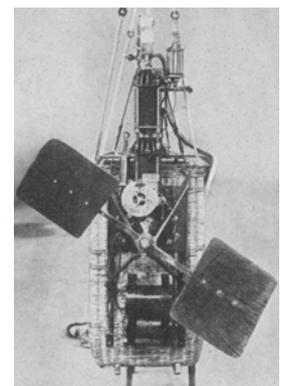
← Après avoir publié en 1863 « La conquête de l'air par l'hélice », le Vicomte Ponton d'Amécourt construisit en 1865 un hélicoptère à vapeur (Le terme d'hélicoptère fut d'ailleurs déposé, en France, par Ponton d'Amécourt le 16 Juillet 1862 dans le certificat d'addition au Brevet n°49.077, mais il est à noter que le 3 août 1861, il avait déposé en Angleterre une demande de brevet qui contient ces mots : *My aerostatical apparatus which I intend denominating aeronef or helicoptere*, alors qu'aucune machine de ce type n'avait encore décollé).



← En 1871, de Pénaud fabriqua un « planophore » à ressort de caoutchouc avec hélice propulsive qui effectua un vol d'une soixantaine de mètres.

Santos-Dumont se fit construire par Lachambre un petit dirigeable de 180 m<sup>3</sup>, très allongé. La nacelle, en osier tressé, comportait un petit moteur de Dion-Bouton transformé par la superposition de deux cylindres. La première ascension eut lieu le 20 septembre 1898 au jardin d'Acclimatation. Les évolutions se firent correctement. L'hélice se composait de deux palettes de bois vissées sur une barre d'acier plat elle-même vrillée pour donner le pas des pales. →

En 1906, H. Brosser publie « L'hélice propulsive », théorie et pratique : Fonctionnement de l'angle d'attaque ; Tracé de la surface propulsive ; Reculs ; Résistance de l'hélice à la rotation ; Hélices multiples ; Établissement et essai d'un propulseur hélicoïdal ; Hélices actionnées par les turbines.



1908 et 1909 virent de nombreuses publications sur l'hélice aérienne :

« Théorie des hélices aériennes » par Alfred Micciollo.

« La technique des Hélices aériennes », tracé, utilisation et construction par Gaston Camus, Ingénieur des Constructions civiles. L'auteur s'est proposé de résumer l'ensemble des connaissances afférentes à l'hélice aérienne, nécessaires et suffisantes pour en faire le tracé et en calculer les éléments. Il s'arrête d'abord sur la partie géométrique ; montrant comment de la courbe théorique qu'est l'hélice, on passe à la surface courbe la plus complexe d'une aile de propulseur. Il indique ensuite comment travaille une hélice, puis donne quelques généralités sur les caractéristiques des appareils aériens munis de propulseurs. Enfin, il insiste sur la détermination des éléments d'une hélice propulsive en utilisant les méthodes du capitaine Ferber et de M. Drzewiecki et permet de résoudre le problème suivant : Déterminer en fonction des caractéristiques d'un aéroplane, l'hélice qui lui convient.

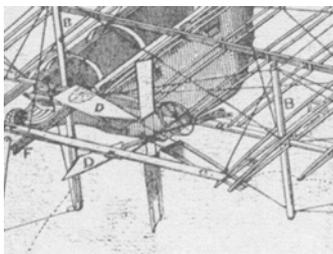
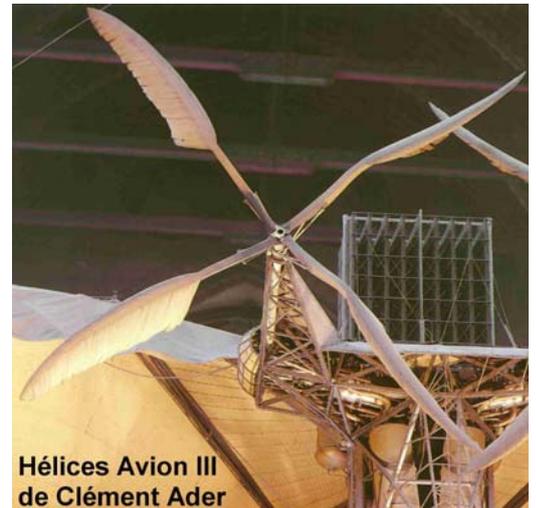
« Études anémométriques des hélices zooptères<sup>ii</sup> » et « Rôle de la torsion positive dans les hélices aériennes et les aéroplanes », communications à l'Académie des Sciences en mars et avril 1908 par Paul Amans.

« Recherches sur les hélices aériennes », Fascicule II du Bulletin de l'Institut Aérodynamique de Koutchino publié par D. Riabouchinsky.

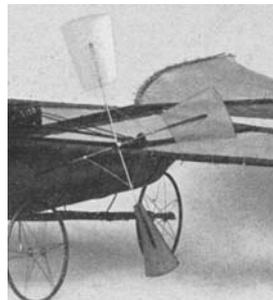
« Des hélices aériennes », Théorie générale des propulseurs hélicoïdaux et méthode de calcul de ces propulseurs pour l'air par S. Drzewiecki. Dans cette étude, l'auteur, parlant de la résistance éprouvée par un élément plan se déplaçant dans l'air, sous une certaine incidence et suivant une trajectoire hélicoïdale, déduit, par une série de calculs et de raisonnements mécaniques rigoureux, la théorie des hélices propulsives. Il en détermine tous les éléments comme le rendement, l'incidence optima, le diamètre, le pas, la surface active, etc., montre les relations qui relient tous ces éléments entre eux et aussi ces conditions du mouvement, comme la puissance motrice, la vitesse, le nombre de tours.

Des origines de l'aéronautique à la Seconde Guerre mondiale, l'essor de l'aviation a été associé à la propulsion par l'hélice. Suivant les possibilités technologiques apportées par d'autres branches d'activités, l'hélice fut mise en mouvement par un moteur à vapeur (cas des avions de Clément Ader<sup>iii</sup> → lire l'explication en note de fin) puis par un moteur à combustion interne de plus en plus léger et puissant à la fois ; puis par une turbine –Turbopropulseur et même « réacteur » comme on le verra par la suite pour les « double flux ».

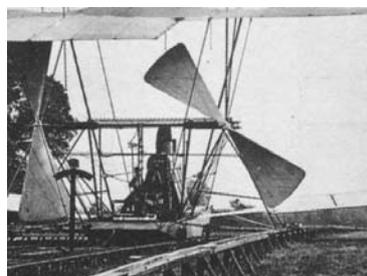
L'hélice est composée d'un certain nombre de pales<sup>iv</sup> fixées sur un moyeu tournant, chacune constituant une surface portante analogue à une aile d'avion. La pale change la direction de l'air, qui la contourne et lui transmet ainsi l'énergie reçue du moteur. La force de traction exercée sur l'arbre de l'hélice est égale à la variation de la quantité de mouvement et provoque l'avancement de l'avion. Les performances des hélices sont caractérisées par des coefficients de traction, de couple, d'efficacité propulsive et de rendement qui varient en fonction de la vitesse de vol.



1843 Henson



1879 Tatin



1894 Maxim

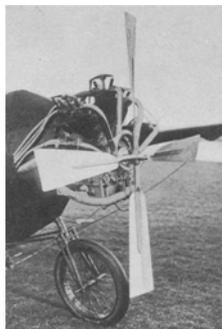


1902 Ferber

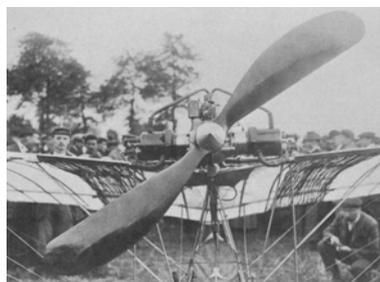
Comme on peut le voir sur les photographies ci-dessus, les dessins et « courbures » des pales des différentes hélices sont assez « empiriques » mais, au fil des années, les formes — donc les rendements — s'améliorent, fruit des expériences, du calcul et du début des essais aérodynamiques.

L'efficacité du fonctionnement de l'hélice se dégrade lorsque les vitesses de l'écoulement sur les pales — à l'extrémité externe où la vitesse due à la rotation est la plus élevée — atteignent la vitesse du son, provoquant l'apparition d'ondes de choc génératrices de pertes. C'est pourquoi l'utilisation de l'hélice est (en principe) limitée aux avions lents ne dépassant guère les nombres de Mach<sup>v</sup> de 0,6 à 0,7.

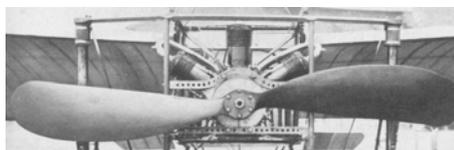
L'hélice est le seul et unique moyen par lequel la puissance transmise par l'arbre moteur peut être convertie en propulsion. L'air passe sur les pales exactement comme sur une aile lorsque l'hélice est en rotation. Seule différence, la vitesse du passage de l'air est plus grande du pied de pale à la tête de pale. L'hélice prend de l'air, l'accélère puis le rejette en arrière en un flux circulaire de grand diamètre. Tout comme une vis dans un écrou, le pas d'une hélice est la distance que celle-ci parcourrait si elle se "vissait" dans un milieu solide et le recul mesure la différence entre le pas et la distance dont l'hélice avance réellement pendant un tour. L'angle de calage d'une hélice est formé par la corde de la pale et une ligne passant par son plan de rotation.



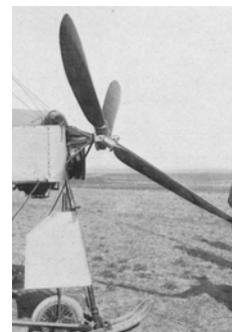
1908 R.E.P. de Esnault-Pelterie.



1908 Demoiselle de Santos-Dumont



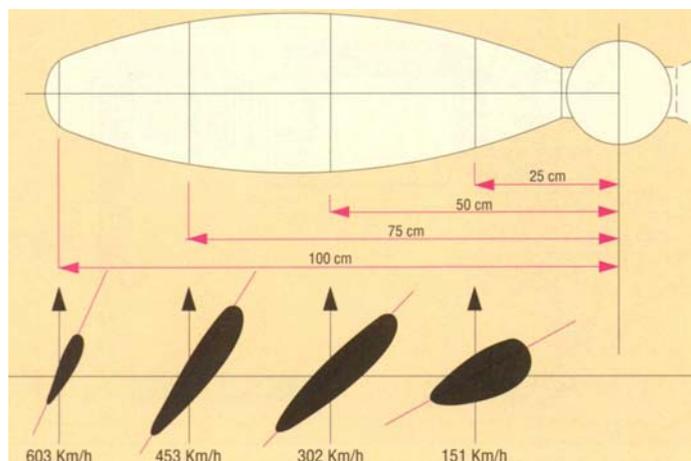
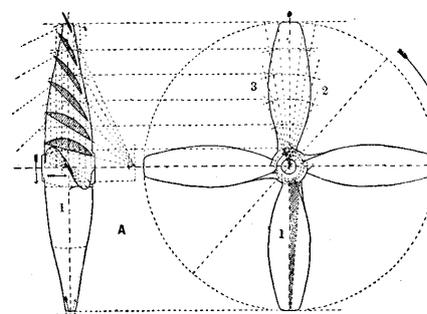
1909 – Blériot XI (Celui de la traversée de la Manche) avec moteur Anzani et hélice « Intégrale » de Lucien Chauvière qui fut un grand constructeur d'hélice jusqu'aux début des années quarante.



1911 – Bréguet trois pales articulées.

Avec Lucien Chauvière<sup>vi</sup> et son « intégrale » du Blériot XI, la première à être étudiée rationnellement, l'hélice prenait ses lettres de noblesse et allait garder, sans grandes modifications, son dessin et sa « courbure » pour les décennies à venir. Lucien Chauvière s'était peut-être inspiré des hélices maritimes qui, bien avant 1900, avaient déjà le bon « profil » ou avait lu les nombreuses publications sur ce sujet parues entre 1906 et 1909.

Plan deux vues d'hélice maritime de 1882 →



Une pale n'est pas uniforme sur toute sa longueur : vers la tête de pale, là où la vitesse est la plus élevée, voire parfois supersonique, l'angle de calage est le plus faible. En pied de pale, là où la vitesse est la moins grande, l'angle de calage est beaucoup plus élevé.<sup>vii</sup> Cette différence d'angle est nécessaire, car sans cela la pale n'exercerait pas une pression uniforme sur toute sa longueur. Divers types de matériaux ont été utilisés pour les hélices : l'aluminium plein ou creux, l'acier plein ou creux, le bois massif, le bois lamellé-collé, le bois renforcé par un profilé métallique.

← [Vitesse linéaire pour 1600 tours par minute]

En 1916, Marcel Bloch constatant que les hélices existantes n'offrent que de médiocres performances, décide d'en dessiner une. Cette hélice, appelée « Éclair », satisfait aux tests officiels. L'Armée commande une première série de 50 exemplaires qui sont construits chez un fabricant de meubles du faubourg Saint-Antoine à Paris. Marcel Bloch convainc Henry Potez de venir le rejoindre. Ils fondent alors la Société des Hélices Éclair dont ils deviennent les directeurs techniques. L'hélice Éclair équipe de nombreux appareils français et, en particulier, le SPAD VII<sup>viii</sup> de l'as Georges Guynemer. En 1917, l'Inspection du matériel la classe parmi les trois meilleures sur 253. Marcel Bloch entre dans la légende de l'aviation.



Les hélices à pas fixe sont celles où l'angle de calage des pales ne peut pas être modifié. Leur conception est en fait un compromis entre deux rôles : le décollage, lorsque le moteur est à plein régime et la pression atmosphérique élevée, et le vol en altitude, lorsque les gaz sont réduits et que la pression diminue. Les inconvénients de ce compromis sont qu'au décollage le moteur ne peut jamais utiliser toute sa puissance, car l'angle des pales est trop élevé, alors qu'en altitude, l'angle est trop faible pour assurer une traction efficace. Cela imposait des limitations sur l'altitude et la vitesse auxquelles pouvaient opérer les avions équipés d'hélices à pas fixe.

Quelle que soit l'adaptation des formes d'un avion en vue de lui donner le minimum de résistance à l'avancement, quelles que soient la qualité et la puissance du moteur dont il est muni, il est évident que ses performances dépendent en définitive du rendement de l'hélice. L'accroissement des vitesses et des altitudes confronte les ingénieurs à des problèmes de rendement et à la nécessité de pouvoir modifier l'orientation des pales, c'est-à-dire le pas.

La première hélice à pas variable, qui ait été conçue, n'était autre qu'une hélice à pas fixe dont on pouvait modifier l'angle de calage en vol, mais sur deux positions seulement : le petit pas pour le décollage et l'atterrissage, et le grand pas en régime de croisière. Le moteur pouvait ainsi tourner vite et fournir la puissance maximale au décollage sans atteindre la survitesse. En vol de croisière, l'augmentation du pas permettait de diminuer la consommation par un compromis entre la vitesse voulue et une faible rotation.

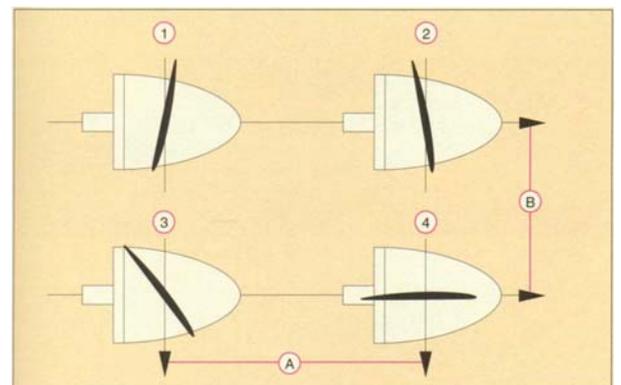


← Dès 1916, un RAF RE-8 britannique décollait muni d'une hélice quadripale à deux positions commandées par le pilote. Ses pales en bois tournaient sur des paliers rotatifs fixés sur un moyeu en acier. Cette hélice pesait environ 23 kg de plus qu'une hélice à pas fixe.



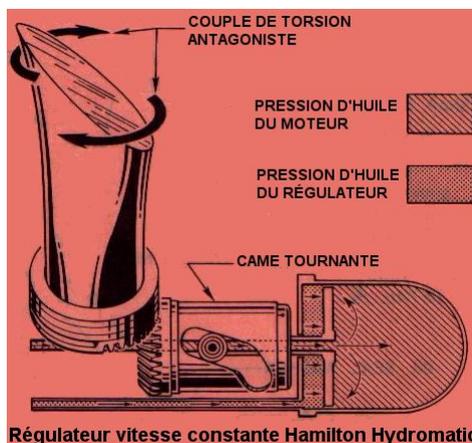
La plupart des premières hélices quadripales étaient composées de deux hélices bipales montées en quadrature, comme sur ce Farman Goliath en 1921. →

La nécessité d'obtenir tous les calages de pas intermédiaires apparut alors. La première véritable hélice à pas variable, fabriquée en série fut construite par la firme américaine Hamilton. En plus des deux positions initiales de calage, le pilote pouvait augmenter encore plus le pas pour éviter les sursrégimes dans un piqué ; en cas de panne moteur, il pouvait placer les pales dans le lit du vent pour diminuer la traînée (hélice en drapeau). L'ultime évolution dans le calage du pas fut l'apparition d'une nouvelle position : l'inversion de pas. Elle inverse la force de traction de l'hélice, ce qui permet d'obtenir une force de ralentissement diminuant la course des avions à l'atterrissage.



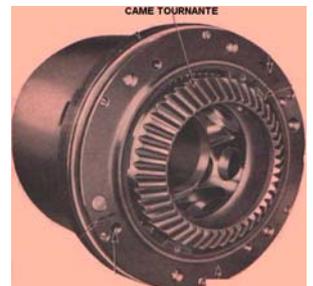
(1) Pale en pas inverse : frein, (2) pale au petit pas : décollage, (3) pale au grand pas : croisière, (4) pale perpendiculaire, en drapeau : panne de moteur.

Puis les moteurs furent dotés de régulateur d'hélice connecté à la fois à l'hélice et à la commande de pas d'hélice du pilote. L'hélice à vitesse constante, pour un calage donné, était née. La première fut essayée en vol sur un chasseur Gloster Grebe ← en 1927.



Régulateur vitesse constante Hamilton Hydromatic

Mais, c'est la firme Hamilton qui développa ce type avec l'hélice Hydromatic, mise en service en 1936. Ses pales, montées sur paliers à galets et roulements à billes, étaient positionnées par des cames. →

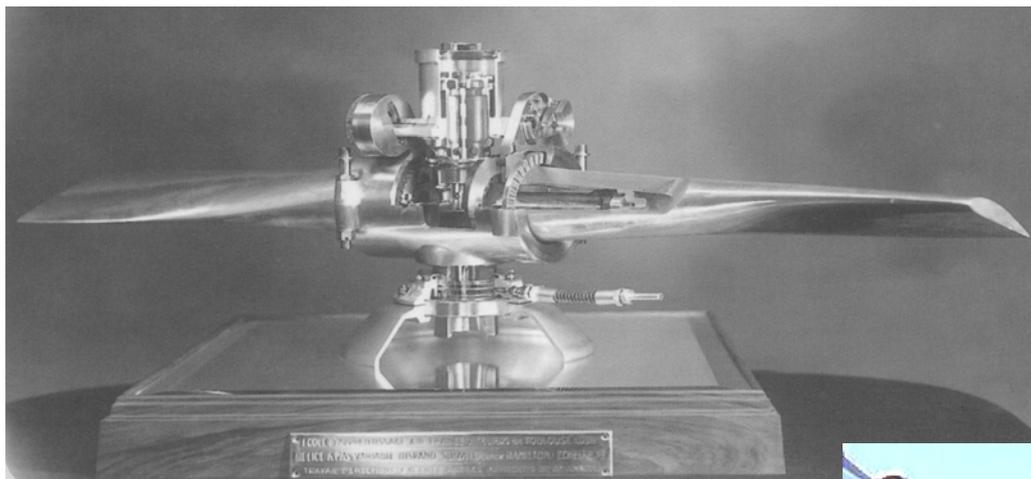


← La rotation de la came était obtenue par un piston hydraulique placé dans le moyeu et commandé par un régulateur.

Dès 1936, les Hanriot 220 et les Potez 630 → furent équipés d'hélices à pas variable en vol et la maison Lucien Chauvière équipa, en 1938, le Bloch 152-C1 d'une hélice n°371 à pas variable et à vitesse constante et le Morane Saulnier MS406 d'une hélice n°351 à deux pas.

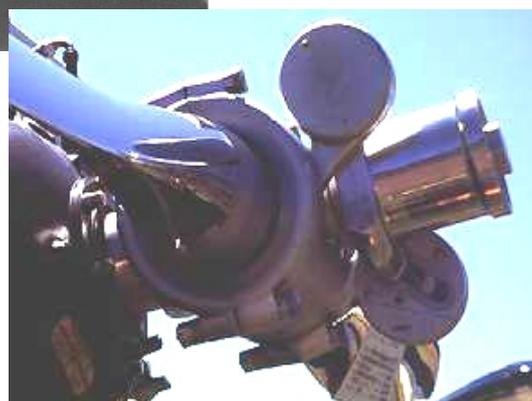


↓ Hélice à pas variable (au sol) Hispano-Suiza, sous licence Hamilton, à l'échelle  $\frac{3}{4}$ , réalisée par les apprentis de l'école d'Air France de Toulouse Montaudran en 1938.



Elle fonctionnait comme l'hélice Ratier<sup>vi</sup> (voir article « Les Gonfleurs d'Hélice » à la fin). On distingue le système de pistons gonflés pour le petit pas et le système de commande par bagues et tiges pour la mise en grand pas.

Cette réalisation ressemble beaucoup à l'hélice à pas variable qui équipait les Stearman PT-13D qui furent utilisés, au début de la Seconde Guerre mondiale, pour l'entraînement des pilotes américains. ↓ →



On ne commencera à y voir vraiment clair que vers 1925 bien que quelques éléments utiles furent découverts entre 1909 et 1913, à partir des essais entrepris par Chauvière, Dorand et surtout Eiffel avec la soufflerie du Champs-de-Mars. Dès 1890, Eiffel se consacrait entièrement aux études théoriques sur la résistance au vent. Il installait un laboratoire sur la plate-forme supérieure de la Tour, et ainsi réussissait à créer le premier prototype d'avion étudié entièrement en soufflerie<sup>ix</sup>. *Ce qui est remarquable et constitue une exception dans la conception des hélices, c'est le dessin de celle conçue par Ader<sup>iii</sup>, entre 1882 et 1890.*



L'« intégrale » de Lucien Chauvière a contribué à tous les records jusqu'en 1920. Les principales évolutions des hélices furent le pas variable et la régulation de vitesse. Suivant les puissances nécessaires, les diamètres grandissaient et le nombre de pales également : trois, quatre, voire cinq et même six. Ainsi, durant la Seconde Guerre mondiale, l'apparition du moteur Merlin fut rapidement suivie par l'adjonction d'une quatrième pale. Puis le Rolls-Royce Griffon de 2400 ch provoqua la transformation du Spitfire qui termina la guerre avec une hélice à ← cinq pales. L'augmentation de la puissance des moteurs posa quelques problèmes aux pilotes. Le couple du moteur appliqué à l'hélice fait embarquer l'avion dans une direction ou une autre suivant le sens de rotation et a même provoqué des renversements lors de décollages. De plus, un même avion peut être équipé de moteurs différents tournants en sens inverse, comme le Spitfire avec le Merlin ou le Griffon. Pour résoudre le problème et pouvoir encore monter en puissance, quelques avions furent équipés d'hélices contrarotatives à six pales. Ce doublet est

constitué par l'association de deux hélices montées sur deux arbres coaxiaux. Les deux hélices tournant en sens contraire l'une de l'autre, il n'y a pratiquement plus de couple et les effets du souffle hélicoïdal, qui affectent les avions équipés d'une seule hélice, disparaissent. La disposition contrarotative permet ainsi d'absorber une plus grande puissance pour un diamètre d'hélice réduit.

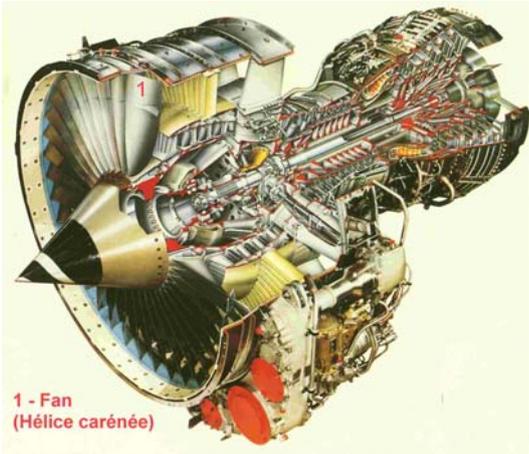
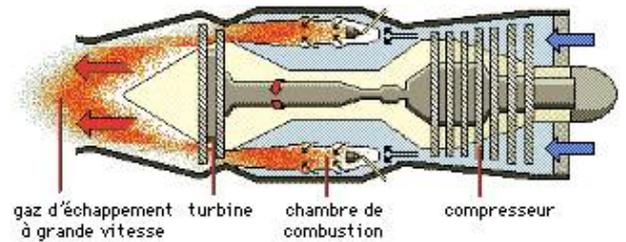
Supermarine Spitfire Seafang F Mark 32 à moteur Rolls-Royce Griffon 89, hélices contrarotatives et ailes repliables vers le haut. Entre 1946 et 1947, six furent achevés. Vitesse maximale à 6400 m : 764 km/h. Vitesse ascensionnelle initiale : 23,5 m/s. Plafond : 12500 m. Autonomie : 632 km. Poids à vide 3629 kg. Poids en charge : 4740 kg. Envergure : 10,67 m. Longueur 10,39 m. Surface alaire : 19,51 m<sup>2</sup>.





← Dans les années soixante, l'hélice a été supplantée par le réacteur simple flux. Mais ce type de réacteur consommait beaucoup de carburant, générait du bruit et de la pollution. →

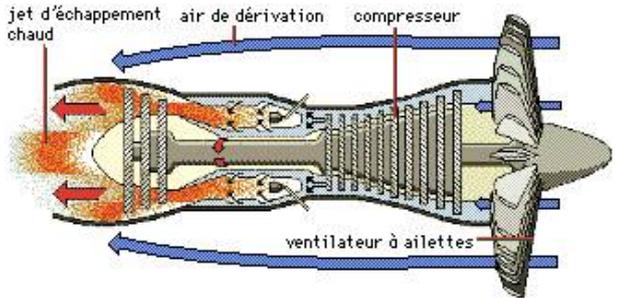
Les motoristes, au fil des années, améliorèrent le réacteur pour en arriver au moteur (réacteur) double flux moderne qui, avec l'agrandissement du premier étage du compresseur basse pression devient, en fait, un moteur qui entraîne une gigantesque hélice carénée :



← le fan ou soufflante ↓

Le générateur de gaz ne consomme qu'une petite partie de l'air brassée par le fan, moins de 20 %.

Les quatre cinquièmes de l'air aspiré sont rejetés autour du réacteur sans participer à la combustion.



Le jet, considérablement ralenti par la turbine basse pression à plusieurs étages, ne procure que moins de 20 % de la poussée, tandis que plus de 80 % de celle-ci sont produits par le fan. Ce moteur est également appelé « turbo-fan ». Afin d'augmenter le débit de la soufflante (fan) sans en augmenter le diamètre, Rolls-Royce a conçu des aubes en forme de cimenterre. L'hélice est toujours présente, mais sa forme a évolué. →

Le rapport entre la masse d'air éjectée par la soufflante et celle des gaz brûlés est appelée « taux de dilution », ou « taux de dérivation ». En augmentant ce taux, on augmente la poussée sans augmenter beaucoup la consommation, d'où amélioration du rendement global et diminution de la consommation spécifique. Sur le GE 90, le taux de dérivation est de 9 ce qui correspond à presque 90 % de la poussée assurée par la soufflante (fan) c'est-à-dire l'hélice carénée, dont les aubes sont réalisées en matériaux composites afin de diminuer leur masse. Poussée totale de 40 tonnes soit 36 tonnes pour la soufflante.

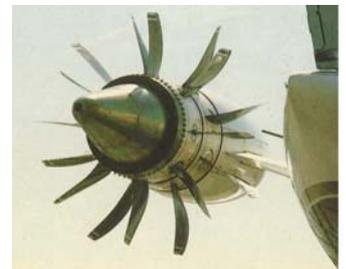


Alors qu'un turbo-fan comporte une grande hélice carénée devant le réacteur, un moteur UDF (Unducted Fan) ↓ dispose d'au moins deux hélices contrarotatives et non carénées placées derrière le réacteur. Connue en France sous l'appellation de Turboréacteur à hélice rapide (THR), ce système est au stade des essais en Europe, chez la Snecma, et aux Etats-Unis, chez General Electric et Pratt & Whitney. Des moteurs UDF ont déjà été testés sur banc d'essai volant à des vitesses supérieures à Mach 0.85.



← Un UDF est un turbomoteur qui entraîne deux turbines contrarotatives, chacune de ces turbines entraînant une hélice. →

Légères et résistantes, celles-ci disposent de nombreuses pales courtes, larges et coudées.



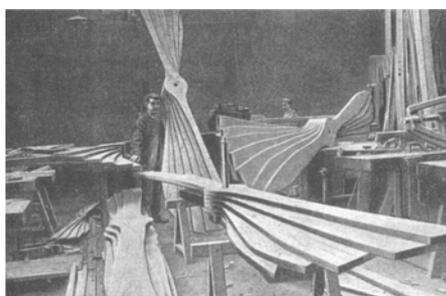
Les principaux avantages du système UDF sont : Consommation inférieure de 20 % à celle des meilleurs réacteurs actuels, résistance aux chocs et pilotage facile et rapide par action sur le pas des hélices.

En outre, l'UDF permet de faire l'économie en poids et traînée d'un carénage, et son diamètre (3,6 m pour un moteur de 10 t de poussée) est du même ordre de grandeur que celui d'un réacteur actuel. De plus, les pales tournant beaucoup moins vite que celles d'un turbo-fan, l'UDF est moins sensible à la rupture d'une pale.

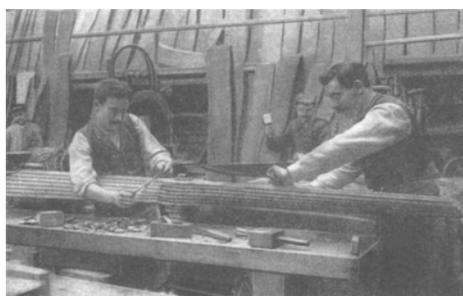
Les premières hélices aériennes furent des assemblages de tiges métalliques sur lesquelles des palettes de bois ou d'aluminium étaient fixées, puis on passa aux hélices étudiées rationnellement et fabriquées en bois.

À poids égal, le bois, dans le sens des fibres, résiste à la traction mieux que les meilleurs aciers ; Pas de rupture à craindre par la force centrifuge. La faible densité du bois permet de l'employer sous une plus grande épaisseur, dans laquelle on pourra aisément façonner les pales au profil donnant le meilleur rendement. Cette épaisseur augmente en outre la résistance à la flexion et empêche l'hélice de vibrer. L'inconvénient des hélices en bois provient de leur construction longue, difficile et coûteuse.

Ces hélices en effet ne sont pas taillées dans un seul morceau, mais faites de plusieurs épaisseurs de bois superposées et collées, le sens des fibres étant contrarié pour les différentes couches. Les avantages de cette pratique sont nombreux. D'abord elle permet de n'employer que du bois parfaitement sain, bien droit Fil et sans nœud, qu'il serait à peu près impossible de se procurer en madriers d'une certaine épaisseur. En second lieu, une pièce de bois d'un seul morceau travaille toujours sous l'action des agents atmosphériques ; avec plusieurs planches collées, les déformations se détruisent les unes les autres et l'ensemble ne travaille plus. Enfin, dans un arbre, le bois est plus dense au pied qu'à la tête, en sorte que les deux pales d'une hélice d'un seul morceau ne pèsent jamais le même poids même si elles sont parfaitement identiques. Pour équilibrer l'hélice, ce qui est indispensable, il faut faire une pale plus mince que l'autre. Dans les hélices en plusieurs épaisseurs, on a soin de faire alterner, en collant les planches, les parties prises dans le pied et celles que l'on prend dans la tête de l'arbre. Ceci permet d'obtenir, du premier coup, une hélice à peu près équilibrée.



Assemblage et collage des planches



Taillage à la gouge et à la plane.



Vernissage avant entoilage.

Fabrication d'une hélice « intégrale » chez Lucien Chauvière.

Dès la fin de la première guerre mondiale, les hélices furent fabriquées en métal léger (Duralumin) forgé plein puis, à cause de l'augmentation des puissances et des dimensions et afin de diminuer le poids, les pales deviennent creuses. Reed puis Levasseur et Gnome & Rhône ont fabriqué des hélices métalliques dans le courant des années vingt, elles se généralisèrent à partir de 1926. Les années soixante-dix ont vu l'apparition des premières pales en matériaux composites, beaucoup plus légères et permettant de diminuer les niveaux de vibration et de bruit.



Hélice métallique  
Gnome & Rhône  
(1928)



Hélice Hamilton  
Hydromatic sur P-51D  
Mustang (1943)



Hélice à 5 pales en  
composite



Hélice McCaulay sur Continental



Il existe toujours des fabricants d'hélice en bois, par exemple Hélice Production Évra, 4 Avenue Forêt d'Halatte, 60100 Creil <http://www.helice-evra.fr.st> ou les Hélices Alain Léger, Le Bourg, 17520 Saint-Ciers-Champagne <http://www.cortix.fr/helices-leger>.

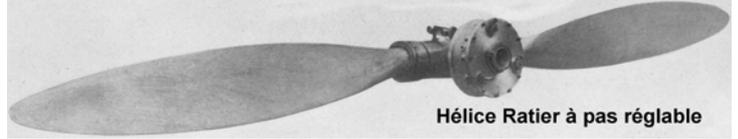
Les hélices en bois sont toujours fabriquées sur les mêmes principes que Lucien Chauvière, à partir de planches de hêtre d'épaisseur de 20 mm, soigneusement sélectionnées et séchées, mais avec des outillages et des colles plus modernes.

Le site des hélices Evra explique le procédé de fabrication.

## Les Gonfleurs d'Hélice

Enfin la vérité, corroborée par quatre vieux de la vieille, sur l'origine du terme "Gonfleur d'hélice".

Les premières hélices à pas variable Ratier<sup>x</sup> étaient mises en position "petit-pas" avant le décollage, au sol par le mécano qui branchait une pompe pneumatique (genre pompe à vélo améliorée) sur une valve en bout du cône d'hélice. La pression générée déplaçait un piston (repoussé par un ressort) jusqu'à la position « petit-pas » à laquelle il était alors bloqué par un cliquet. Après le décollage, le pilote tirait sur une manette qui déclenchait le cliquet ; le piston poussé par le ressort revenait vers la position « grand-pas » progressivement grâce à une fuite calibrée dans le cylindre. Cette hélice n'avait de "pas variable" que le nom puisque seules deux positions existaient et qu'il était impossible au pilote de revenir vers petit pas.



### Contribution française à une victoire britannique

Scott, vainqueur avec Campbell Black de Londres-Melbourne, regonfle la vessie incorporée, au mécanisme d'orientation des pales, dans l'une des hélices Ratier à pas variable qui équipaient son avion De Havilland « Comet ».

Le pilote ou le mécano "gonflait" réellement l'hélice.

Les premiers "Gonfleurs d'hélice" d'avion commerciaux firent leurs armes sur le Caudron C440 "Goéland" équipé de 2 moteurs Renault de 220 ch et des "fameuses" hélices Ratier - 260km/h - 6 passagers ou "poste". Premier vol le 1er mars 1935. En exploitation à Air France entre 1937 et 1950.



Produit à 1702 exemplaires, il inaugura la postale de nuit le 10 mai 1939 (Caudron 449 piloté par Raymond Vannier) pour Air Bleu.

## Bibliographie, photographies et gravures

- Rapport sur le Premier Salon de l'Aéronautique – Paris – Grand Palais – Décembre 1908.
- L'Illustration – 17 novembre 1934 – Spécial Aéronautique.
- L'Illustration – 14 novembre 1936 – Spécial Aéronautique.
- Histoire de l'Aéronautique - L'Illustration – 1938.
- Erection and Maintenance Instructions for P51-D British Model Mustang IV – AN 01-60JE-2 – 14 January 1943
- Aviation - Les Premières Années de l'Aéronautique. The Hulton Getty Picture Collection - ISBN 3-89508-682-7
- Aviation 1913-2001 - Science & Vie - ISBN 2-84567-068-0
- Le Grand Livre des Chasseurs - William Green - Gordon Swanborough - ISBN 2-86535-302-8
- Chronique de l'Aviation - Édouard Chemel - ISBN 2-905969-51-2
- Les Avions - Patrick Facon- Larousse - ISBN 2-03-505273-4
- Nouveau Larousse Illustré en 7 (gros) volumes, édition de 1903.
- Bibliothèque Nationale de France - Comptes-Rendus des séances de l'Académie des Sciences – Tome CXLVI
- Musée Air France – Aérogare des Invalides.
- Musée du Conservatoire National des Arts et Métiers
- Un siècle d'aviation avec Air France - Musée Air France – Gallimard - ISBN 2-74-240786-3
- Air France et son histoire - 1933-1983 - Tome 1 Icare, Revue de l'aviation française n° 106
- Les Mathématiques – Bibliothèque du CEPL – Les Dictionnaires du Savoir Moderne
- Le guide des Arbres et Arbustes de France – Sélection du Reader Digest – ISBN 2-7098-0799-8
- Les Forêts Tropicales – Institut International pour la Protection de la Nature
- Props – Aris Multimedia Entertainment – CD-Rom
- Sentimental Wings – Walnut Creek – ISBN 1-57176-009-1 – CD-Rom

<sup>i</sup> La définition mathématique de l'hélice est :

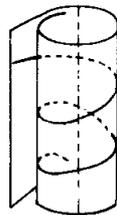
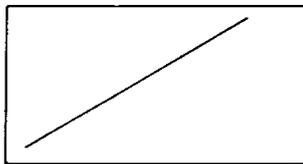
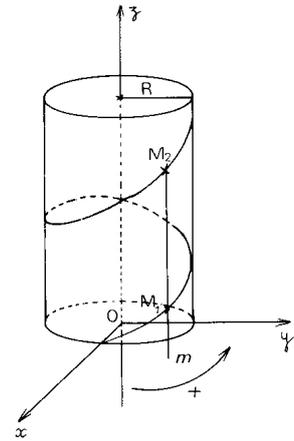
Courbe gauche dont toutes les tangentes font un angle constant avec une direction donnée.

Une hélice circulaire est une courbe tracée sur un cylindre de révolution, telle qu'en chacun de ses points sa tangente forme avec l'axe de rotation du cylindre (Oz) un angle de mesure constante. Les équations paramétriques d'une telle courbe sont :

$$x=R \cos t, y= R \sin t, z = ht$$

Où R est le rayon du cylindre et h un nombre constant plus grand que zéro. Le point m, projection sur xOy du point M de l'hélice, décrit le cercle de centre O et de rayon R. Lorsque le paramètre t augmente de  $2\pi$ , le point m fait un tour complet du cercle dans le sens positif. Le point M s'est déplacé sur l'hélice de la position  $M_1$  à la position  $M_2$ . La droite  $M_1M_2$  est parallèle à Oz et la longueur de  $M_1M_2$  est égale à  $2\pi h$ . Cette distance est appelée le pas de l'hélice.

Remarques : si  $h > 0$ , l'hélice s'enroule dans le sens direct ; il arrive qu'on parle d'hélice directe (ou sinistrorsum). Si  $h < 0$ , l'hélice s'enroule dans le sens rétrograde ; il arrive alors qu'on parle d'hélice rétrograde (ou dextrorsum).



On peut obtenir aisément une hélice circulaire : il suffit de tracer sur un rectangle de papier une droite (non parallèle aux côtés du rectangle) puis d'enrouler ce rectangle sur lui-même de manière à former un cylindre.

<sup>ii</sup> Étude biomorphique de l'asymétrie des graines du frêne ou de l'érable dont le fruit est placé à l'extrémité d'une aile, parfois hélicoïdale. Le centre de gravité étant éloigné du centre de pression, la semence tombe avec un mouvement en hélice.



Érable Champêtre



Érable de Montpellier



Érable Plane



Érable Sycomore

Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences Tome CXLVI - Séance 23 mars 1908

Zoologie Appliquée. - Études anémométriques des hélices zooptères. Note de M. Paul Amans, présentée par M. Alfred Giard.

Si l'on place un anémomètre en arrière d'une hélice aérienne propulsive, avec l'axe du moulinet parallèle à l'axe de l'hélice, on observe des vitesses variables avec la position du moulinet. Dans de précédents Mémoires (Congrès aéronautique de Milan, 1906 ; Académie des Sciences et Lettres de Montpellier, 1906-1907 ; Congrès de l'Association française pour l'avancement des Sciences, Reims, 1907), j'ai étudié la forme de la rivière aérienne, sa pression sur des disques plans, ainsi que la courbe des vitesses à différentes distances de l'équateur. La comparaison des vitesses et des pressions m'a conduit aux mêmes résultats qu'en 1889 (Congrès international aéronautique, Paris, 1889) et en 1892 (Congrès de l'Association française pour l'avancement des Sciences, Marseille, 1892), à savoir que les palettes animales ou zooptères sont plus efficaces que les palettes rigides basées sur l'hélice géométrique.

Je rappellerai (voir à titre d'exemple une épure de palette Vespa (3) dans Aéro-Revue (Lyon)) les caractères principaux des hélices animales : nervures élastiques, courbes, divergeant à partir de la base (l'épaisseur des nervures va en diminuant du proximum au distum et d'avant en arrière ; la face antérieure est concave ; la concavité diminue du proximum au distum) ; la torsion est positive, celle de l'hélice géométrique est négative, etc. Les autres facteurs à considérer, non spéciaux aux hélices zooptères, sont la déclinaison ou angle de la palette avec l'équateur (1) et l'inclinaison ou angle de l'axe proximo-distal avec l'axe de rotation de l'hélice. On ne m'a pas suivi (2) en France, mais on commence à expérimenter des hélices animales dans l'armée anglaise (Baden-Powell) et italienne (Bertelli).

Ceci posé, et c'est l'objet principal de cette Communication, voici une formule empirique qui donne une valeur approchée de la traction, en se servant uniquement de l'anémomètre. Soit  $r$  le rayon d'une hélice formée de deux ailes. Je place le centre de l'anémomètre Richard à une distance de l'équateur égale à ce rayon et à une distance de l'axe de rotation égale à  $mr$  ; le coefficient  $m$  varie avec la forme des palettes ; il correspond au point où la vitesse est maximum. Soit  $b$  cette vitesse maximum ; soit  $a$  la vitesse mesurée, quand le centre du moulinet est sur l'axe de rotation. Si je désigne par  $R$  la traction et  $k$  un coefficient de résistance aérienne, nous avons la formule :

$$(1) \quad R = 1/6 k \pi m^2 r^2 \{a^2 + [(9-14m)/(1-m)^2] b^2 + 2ab\}$$

Soit, par exemple, une palette Perdrix de 0,50 m de rayon, tournant à 15 tours à la seconde. Les vitesses sont  $a = 11,44$  m  $b = 20,46$  m.

Dans ce cas  $m=0,46$ . Si nous prenons  $k=0,07$  kg, nous avons  $R = 8,19$  kg, chiffre peu différent de la traction mesurée au dynamomètre ; celle-ci était 8 kg. Prenons une palette orthoptère (la Mantis) plus étroite, moins concave ; à 161 tours à la seconde, et une déclinaison basilaire de  $20^\circ$  comme le Perdrix, nous avons  $a=8,63$ ,  $b=15$ . Comme ici  $m = 1/2$ , la formule devient : (2)  $R = 1/24 k \pi r^2 (a^2 + 8b^2 + 2ab)$ ,  $R = 4,77$  kg.

A la vitesse de 15,5 tours et une déclinaison de  $12^\circ$ , nous avons  $a=8,13$ ,  $b=15,96$ ,  $R=,76$  kg.

Dans les deux cas (à  $12^\circ$  et à  $20^\circ$  de déclinaison basilaire) la traction mesurée au dynamomètre était de 5kg.

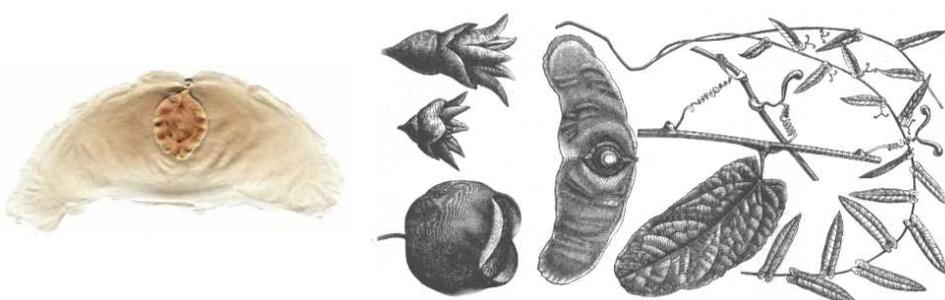
Les deux palettes ont même torsion ( $20^\circ$  environ) et même élasticité ; mais la flexion et les changements d'envergure sont bien différents, ainsi que le montrent les photographies prises à différentes vitesses de rotation. Les nervures ont bien même substance et même épaisseur à distance égale de l'axe de rotation ; elles n'ont pas mêmes courbures, et, en outre, à même distance de l'axe, les sections de profil sont dissemblables et, par suite, les résistances aériennes qui déterminent la flexion. La photographie me paraît être la meilleure méthode d'étudier l'élasticité des hélices aériennes. Les expériences ont été faites avec une dynamo multipolaire, montée sur un tricycle très léger, très roulant ; un ressort à boudin mesurait la traction. Je n'ai pas expérimenté de palettes hélicoïdales de même envergure de 0,50 m ; j'ignore si la formule (1) donne une valeur approchée de la traction. Cette formule est du reste tout à fait empirique ; mais, avec les paramètres  $a$ ,  $b$ ,  $m$ , on a une idée comparative des rivières aériennes, tandis que la formule habituelle  $R = \varphi(n^2 r^2)$  est muette à ce sujet. Le rapport  $a/b$  est intéressant à étudier lorsqu'on fait varier la déclinaison. D'après les observations sur Mantis (3), le rapport  $a/b$  augmente avec la déclinaison ; si ce rapport pouvait s'exprimer par une fonction trigonométrique, on aurait la traction en fonction de la déclinaison et de la vitesse anémométrique maxima.

(1) Les palettes s'implantent sur le moyeu par un manche, une sorte d'humérus, dont l'axe prolongé rencontrerait l'axe de rotation. J'appelle équateur le plan passant par le point de rencontre, perpendiculaire à l'axe de rotation.

(2) Il faut excepter toutefois le colonel Renard ; dans les Comptes rendus de 1903, on trouvera une allusion aux sections de profil courbe.

(3) Vespa : Aile de guêpe ; Mantis : Aile de Mante religieuse.

D'autres fruits ont une forme symétrique et, à l'instar de Clément Ader, l'Autrichien Igo Etrich utilisa une approche biomorphique. Subjugué par le lent vol plané des graines de Zanonía Macrocarpa (\*) lorsqu'elles se détachent de leur arbre, il conçut un planeur qui peut être considéré comme la première aile volante réussie. Cette graine possède en effet quelques-unes des caractéristiques importantes d'une aile volante, à savoir que la charge utile (la graine elle-même) est noyée dans l'aile, que les extrémités de l'aile se situent très en arrière du centre de gravité de la graine, et que la tendance à piquer de l'ensemble est contrée grâce à un bord de fuite des extrémités recourbé vers le haut. En octobre 1906, le planeur d'Etrich baptisé Zanonía (Zanonía Gleiter), qui mesurait quelque 12 mètres d'envergure pour une surface de 36 mètres carrés, réalisa avec succès plusieurs vols planés, dont l'un de deux cent cinquante mètres. Il fut suivi en 1908 d'une variante motorisée avec un Antoinette de 24 ch qui préfigurait déjà les monoplans Taube qui allaient se rendre célèbres pendant la Première Guerre mondiale.



Fruit et graine de Zanonía

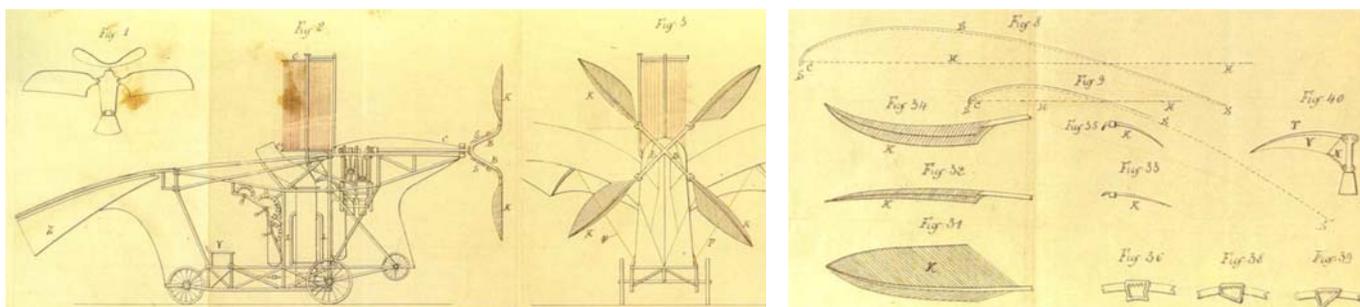
(\*) C'est aussi le cas des fruits de l'orme, du bouleau, de la spergule, de l'angélique. Le record de taille est détenu par une liane de l'Insulinde, Macrozanonía, dont la graine ailée peut atteindre 15 cm sur 7.

<sup>iii</sup> L'hélice de Clément Ader sur l'Éole.

Loin des controverses sur le premier vol d'un engin autopropulsé, les hélices inventées par Clément Ader pour son « avion » étaient-elles suffisantes pour faire décoller l'Éole ? Déjà, les essais du moteur, après reconstitution, furent effectués au banc du Centre d'essais des propulseurs, à Saclay ; ils indiquent qu'Ader pécha plutôt par modestie : on a trouvé à 476,5 t/m et 14,5 kg de pression, 26 ch ; l'inventeur n'avait donc pas bluffé en annonçant une puissance de 20 ch.

Cette puissance chèrement acquise, il fallait éviter de la gaspiller. C'est pourquoi Ader travailla beaucoup au rendement de l'hélice ; il en étudia huit modèles différents avant d'arrêter son choix. Celui-ci porta sur un modèle à quatre pales (il disait « plumes », et tout son vocabulaire dérive de l'ornithologie), chacune composée d'un longeron auquel sont fixées des « barbes ». Le longeron est fabriqué de deux semelles de bambou refendu entre lesquelles se trouve une couche de liège ; les « barbes » sont en mousseline de coton collée sur du papier de Chine ; il y en a 230 de chaque côté de chaque pale. L'ensemble vise à obtenir la plus grande légèreté possible.

De plus, le profil de chaque plume varie tout au long du longeron : il est plus creux au départ qu'à l'extrémité. Observateur de l'anatomie et du vol des oiseaux, Ader en a tiré un principe, visible dans le fait que les barbes ne sont pas perpendiculaires aux longerons, mais obliques. Lors d'essais effectués sur une pale remise en état et bloquée par son attache au pied, on peut constater qu'en chargeant le longeron, celui-ci fléchissait en avant (dans le sens de la marche), et en même temps que la courbure des profils se creusait davantage. Ainsi cette hélice est également à profil variable.



Ader a adopté pour ses pales un profil creux qu'il appelle "logarithmique", car il se construit comme une spirale logarithmique, par un procédé graphique qu'il indique. En fait, Ader a reconnu les qualités de sustentation de ce type de profil, grâce à des expériences conduites à l'aide d'un manège, comme l'ont fait d'autres chercheurs. Ader qui a présenté ce profil dans son brevet de 1890 et l'appelle "courbe universelle de sustentation", car elle lui semblait être utilisée dans la nature par tous les êtres volants. Plus tard, Odier fera remarquer, dans un article publié en 1911 dans l'Aérophile, que le meilleur des profils présentés par Eiffel dans le premier compte rendu de ses travaux du Champ de Mars, ressemblait de façon étonnante à un profil logarithmique d'Ader.

Pour Ader, la formule de la résistance de l'air variait au carré de la vitesse, alors qu'on en a discuté jusqu'en 1908 dans les milieux scientifiques ; il avait fait ses propres expériences et obtenu ce résultat par lui-même. Comme s'il connaissait l'effet d'un nombre de Reynolds réduit, il a corrigé, en l'agrandissant, la longueur de corde près du bout de pale. Ader, après étude de la morphologie des oiseaux, savait que leur charge alaire est d'autant plus élevée que la taille de l'animal est grande. Il a tenu compte de cet effet pour le choix de la surface de l'Éole (10 kg/m<sup>2</sup>, alors que le vautour s'arrête à 7 kg/m<sup>2</sup>) et aussi pour peaufiner son hélice. Dans ses calculs, il écrit : "Mais il faut tenir compte de la petite progression des pressions qui croissent avec les grandes surfaces".

C'est toujours par des essais aérodynamiques, évoqués dans les notes d'Ader, et dont, quelques notes plus précises donnent des résultats, qu'Ader a pu déterminer, pour son profil, le déplacement du centre de poussée en fonction de l'angle d'attaque, à une époque où le monde savant discutait encore du même problème, mais en s'en tenant aux plaques planes qui lui causaient déjà bien du souci. Les hélices en bois ou en métal des nombreuses générations d'avions qui ont suivi sont soumises au même phénomène. Ader voulait obtenir une traction qui fut, sur l'Éole, à peu près du huitième de la masse au décollage, ce qui représentait 35 kg de traction pour chaque hélice. Ayant reconstitué des éléments de pale, le Musée de l'Air et de l'espace put prédire les performances de l'hélice : elles auraient été en fait de 65 kg de traction pour 20 ch à la vitesse de 10 m/s, qui était la vitesse d'avancement en vol (36 km/h). Mais la marge d'erreur de ces calculs théoriques (faits à partir de la puissance du moteur, de la forme des hélices, etc., et non à partir d'expériences réelles) était trop importante pour que l'on acceptât de tels résultats sans les discuter. On refit des essais, à Saclay et à l'Atelier industriel de l'air, à Clermont-Ferrand. Au premier essai, avec une hélice originale simplement restaurée, les mesures donnèrent, au point fixe (moteur et hélice fixés sur un bâti au banc d'essai), donc sans vitesse d'avancement, une traction de 47 kg à 350 t/m, pour une puissance de 5,9 ch absorbée sur l'arbre. La puissance maximale du moteur était de 20 ch à 450 tr/min, mais la preuve était faite : l'hélice aussi donnait bien ce que le constructeur en attendait.

Modèle	Diamètre	Pas	Commentaires
Farman N°1	2,30 m	1,40 m	Branches acier, pales aluminium en prise directe.
Ferber IX	2,20 m	1,10 m	Deux palettes en prise directe.
Blériot IX	2,10 m	1,40 m	Quatre palettes d'aluminium en prise directe.
Blériot X	3 m	3 m	Quatre palettes en bois croisé entoilé. Démultipliée de 30 à 12 par chaîne.
R.E.P. 2 bis	2 m		Quatre palettes en prise directe.
Antoinette	2,20 m	1,30 m	Deux palettes en prise directe. Le pas peut être changé par orientation des palettes.
Demoiselle XIX Santos-Dumont	1,35 m	1,05 m	Deux palettes en prise directe.
Demoiselle XX Santos-Dumont	1,80 m	1 m	Hélice à deux pales en bois en prise directe.

<sup>v</sup> Le mach ou nombre de Mach (Du nom d'un physicien Autrichien Ernst Mach) est le rapport entre la vitesse d'un objet dans un certain milieu et la vitesse du son dans ce même milieu.

Mach 1 signifie 1 fois la vitesse du son ; Mach 2 signifie 2 fois la vitesse du son ; Mach 0,80 signifie 80% de la vitesse du son. Dans l'air, en atmosphère normale et à 0 °C, mach 1 correspond environ à 1 190 km/h.

### La vitesse du son dans l'air n'est pas une constante.

Cette vitesse est celle à laquelle se propage tout ébranlement de l'air, qu'il soit périodique (son musical) ou non périodique (bruit). Elle n'est pas fonction de la pression atmosphérique, mais, comme elle est liée à l'agitation moléculaire, elle dépend de la température : 340 m/s (soit 1224 km/h) à 15°C et 1270 km/h à 40°C, mais 1190 km/h à 0°C et seulement 1060 km/h à - 56°C, température qui règne dans la stratosphère à 11 000m.

Une formule permet de calculer la vitesse du son en m/s dans l'air :

$$V \text{ (m/s)} = 20,1 \sqrt{\text{Température absolue } T^{\circ}\text{K}}$$

Ce qui donne pour différentes températures dans l'air :

Temp °C	Mach 1 m/s	Mach 1 km/h	Mach1 kt	Temp °C	Mach 1 m/s	Mach 1 km/h	Mach1 kt	Temp °C	Mach 1 m/s	Mach 1 km/h	Mach1 kt
-55	296,88	1069	577	-50	300,26	1081	584	-45	303,61	1093	590
-40	306,91	1105	597	-25	316,63	1140	615	-20	319,81	1151	622
-15	322,95	1163	628	-10	326,06	1174	634	-5	329,15	1185	640
0	332,20	1196	646	5	335,23	1218	657	5	335,23	1207	652
10	338,23	1218	657	15	341,20	1228	663	20	344,15	1239	669
25	347,07	1249	675	30	349,97	1260	680	35	351,91	1267	684

<sup>vi</sup> En juin et juillet 1905, Alphonse Tellier, Louis Blériot et Gabriel Voisin se livrent sur la Seine à de curieuses expériences, à la demande de l'Aéro-Club de France et de son président, Ernest Archdeacon. Grâce à un biplan tiré par le canot La Rapière de Tellier, un canot de vitesse à moteur Antoinette de 120 ch, ils parviennent en premier lieu à déterminer de façon expérimentale la force nécessaire au vol d'un planeur pilote à bord. Ils démontrent qu'un moteur de 28 ch est nécessaire à la propulsion d'un aéroplane de 350 kg et qu'il faut 50 ch pour propulser une machine volante de 550 kg, ceci au moyen d'un dynamomètre monté sur le câble de remorque du planeur. Cette importante découverte permet de calculer la puissance motrice nécessaire à faire décoller dans les airs un aéroplane dont la masse est connue. Lors de ces expériences, Gabriel Voisin capote et manque de se noyer, et il met fin définitivement à sa carrière de pilote.

Toujours à la demande de l'Aéro-Club de France, Tellier et Blériot déterminent ensuite scientifiquement avec l'aide de l'ingénieur Lucien Chauvière la forme idéale d'une hélice. Montées sur La Rapière piloté par Alphonse Tellier, différentes hélices aériennes sont testées : bipales, tripales, de différents pas et différents diamètres. Blériot, Tellier et Chauvière déterminent dès 1905 que le meilleur rendement d'une hélice est obtenu avec une bipale en bois de 2,5 mètres de diamètre tournant à 1 000 tours par minute possédant un pas de 1,30 m, ce que confirmeront quatre années plus tard l'ingénieur Gustave Eiffel dans sa soufflerie d'Auteuil et les ingénieurs des Services Techniques de l'aéronautique de Chalais-Meudon par des essais en soufflerie ; ils démontreront que le diamètre de l'hélice est étroitement lié à sa vitesse de rotation : plus son diamètre est faible, plus elle doit tourner vite. Pendant quatre années, ce secret n'est détenu que par les trois compères.

<sup>vii</sup> L'angle de calage d'une pale d'hélice est l'angle entre la corde de référence de la partie de pale considérée et le plan de rotation de l'hélice.

Le calage est un angle alors que le pas est une distance :

- Pas géométrique : Avancement théorique pour un tour d'hélice.
- Pas réel : Avancement réel par tour de l'hélice.
- Recul : Différence entre le pas géométrique et le pas réel.

Le recul, qui pourrait être considéré comme un défaut, est nécessaire ; il crée l'angle d'incidence et donc la résultante aérodynamique qui donne la traction. Vers la tête de pale, là où la vitesse linéaire est la plus élevée,

---

l'angle de calage est le plus faible. En pied de pale, là où la vitesse linéaire est la plus petite, l'angle de calage est beaucoup plus élevé. Cette différence d'angle est nécessaire pour que la pale exerce une pression uniforme sur toute sa longueur.

L'angle de calage  $\beta$  dépend donc du rayon  $r$  : il est grand à  $r = Rb$  ( $Rb$  est le rayon du moyeu) et diminue vers l'extrémité de la pale. La torsion spécifique de la pale est définie par le rapport :  $(\beta.Rb - \beta.R)/R$  et est de l'ordre de 1 à 2 degrés par mètre.

Le pas d'une section de rayon  $r$  est défini par la relation :  $Hr = 2\pi.r \tan \beta.(r)$ .

Le pas conventionnel géométrique de l'hélice est le pas de la section de rayon  $r=0,7R$  et, par convention, cette section est dénommée section de base.

Un grand diamètre et un faible nombre de tours produisent un meilleur rendement qu'un petit diamètre et un nombre de tours élevés. L'augmentation du diamètre peut conduire à des vitesses soniques en bout de pale, ce qui diminue drastiquement le rendement.

La résultante aérodynamique de la rotation d'une hélice se décompose en deux forces :

- Une force de traction ( $t$ ) suivant l'axe d'hélice dans le sens de l'avancement,
- Une force de couple ( $f$ ) dans le plan de l'hélice et en sens inverse du mouvement de l'hélice. Elle donne un couple résistant qu'il faut compenser en régime stabilisé par un couple moteur égal et opposé ( $r$ ).

*Effets secondaires moteur hélice, observés avec une hélice tournant en sens antihoraire (vu depuis le poste de pilotage), un sens inverse entraînera des effets inversés.*

- Couple de renversement : Couple de réaction de sens opposé à celui de l'ensemble moteur hélice. Rotation autour de l'axe de roulis à chaque forte variation de puissance.
- Mouvement à cabrer - Couple gyroscopique : L'avion cabre et s'écarte vers la gauche (Lacet à gauche)
- Mouvement à piquer - Couple gyroscopique : L'avion pique et s'écarte vers la droite (Lacet à droite)
- Mouvement de lacet vers la gauche - Couple gyroscopique : Mouvement à piquer
- Mouvement de lacet vers la droite - Couple gyroscopique : Mouvement à cabrer
- Souffle hélicoïdal de l'hélice : Roulis à gauche, Voilure ; Lacet à droite, Empennage
- Déport de la traction : La pale descendante a une incidence plus élevée que la pale montante, la pale descendante tire plus que la pale montante, et la traction est déportée du côté de la pale descendante. La portance de l'aile droite sera supérieure à la portance de l'aile gauche.

<sup>viii</sup> SPAD, Société de Production des Aéroplanes Déperdussin quand elle fut fondée par Armand Déperdussin qui rachète, fin 1911, les chantiers de Juvisy d'Alphonse Tellier. Le 1er août 1914, plusieurs industriels, dont Louis Blériot, en reprennent les activités après sa mise en faillite. Ils gardent le sigle qui signifie désormais Société Anonyme pour l'Aviation et ses Dérivés.

<sup>ix</sup> Un avion en papier traverse facilement toute une cour de récréation, mais faire le même dix fois plus grand donnerait un monstre en carton bien incapable de planer : les qualités de vol changent avec la taille, et c'est là le principal problème des essais en soufflerie. L'air est pourtant le même pour les deux, mais le grand modèle est trop lourd par rapport à sa surface ; on tombe là sur un premier problème d'échelle quand il s'agit de comparer des versions semblables d'un même modèle : si on double la longueur du modèle, on multiplie sa surface par quatre mais son poids par huit. Or la vitesse de chute dans l'air dépend de la surface et du poids ; comme les deux ne varient pas en proportion, on ne peut transposer à un grand modèle l'expérience acquise avec un petit, et réciproquement. Dans les essais en soufflerie il ne s'agit pas d'étudier la chute d'un avion, mais son vol, c'est-à-dire mesurer les contraintes subies par une maquette balayée par de l'air à la vitesse à laquelle doit évoluer l'avion réel. L'Anglais Osborne Reynolds, qui enseignait à Manchester au XIXe siècle, avait étudié les grandeurs qui régissent le passage de l'écoulement laminaire à l'écoulement turbulent. C'est lui qui donna la solution à ce problème d'échelle qui se pose en soufflerie, sous la forme suivante, dite loi de similitude : les spectres aérodynamiques de deux corps semblables et semblablement orientés sont semblables lorsque le rapport entre la résistance due aux tourbillons et la résistance due au frottement laminaire est le même. Cette loi de similitude s'exprime par la relation  $r.v.d/e = R = \text{constante}$ .

Ce nombre  $R$ , qui joue un rôle fondamental en mécanique des fluides, est le nombre de Reynolds pour un corps dont la taille est caractérisée par une longueur  $d$  (par exemple le profil d'une aile), et qui se déplace à la vitesse  $v$  dans un fluide de masse spécifique  $r$  et de viscosité  $e$ . Dans l'absolu, pour que le résultat des essais sur la maquette en soufflerie soit directement transposable à l'avion réel, il faudrait que les deux aient même nombre de Reynolds. Or la dimension linéaire  $d_m$  de la maquette est évidemment plus petite que celle  $d_a$  de l'avion ; du coup le nombre de Reynolds de la maquette est inférieur à celui de l'avion. Il existe bien sûr des facteurs correcteurs, connus depuis longtemps, qui permettent de passer des expériences en soufflerie au modèle grandeur nature,

mais elles laissent un certain facteur d'imprécision de l'ordre de 2 % à 3 % qui peuvent se traduire par une vitesse moindre ou une consommation supérieure aux prévisions.

\* Ratier Figeac fut fondé en 1904 sous la forme d'un petit atelier de menuiserie, par Paulin Ratier qui était passionné d'aviation. À ses débuts, elle fabriquait des hélices d'avions en bois, puis plus tard des hélices métalliques et à pas variable. Désormais, Ratier Figeac emploie plus de 1000 personnes. L'entreprise est à la fois équipementier et sous-traitant. Ses partenaires sont Airbus Industrie, Boeing, Dornier, de Havilland, etc. Les marchés et les programmes sont aussi bien civils que militaires. Les pièces réalisées par Ratier Figeac vont de l'hélice en matériaux composites aux vis à billes, en passant par les équipements de commande de vol. Plusieurs brevets ont été déposés dont un pour : Profils pour hélices modernes d'avion ou d'éolienne, caractérisés par des valeurs remarquables de portance maximale en condition de décollage ainsi que des valeurs très élevées de finesse dans les conditions de montée et de croisière.



Dewoitine D510 (en haut)  
Dewoitine D520 (en bas)



Latécoère Laté 521  
Lieutenant de Vaisseau Paris



ATR72

Avant d'équiper l'ATR42/72 d'hélices à six pales à pas variable, conçues en collaboration avec Hamilton Standard, Ratier Figeac avait équipé les Bréguet 940/941. Bien avant, dès août 1932, une Blériot SPAD 91-8 fut équipé d'une hélice Ratier à pas variable, puis en 1935, l'hydravion Latécoère 521 avec ses six moteurs. Ratier équipa également les Dewoitine D510 et D520 avec des hélices tripales à pas variable électriquement. Ratier, Avenue de Cahors, 46100 Figeac.