

Don de M. C. G. Bertrand.

AP 298

ASSOCIATION FRANÇAISE

POUR

L'AVANCEMENT DES SCIENCES

FUSIONNÉE AVEC

L'ASSOCIATION SCIENTIFIQUE DE FRANCE

(Fondée par Le Verrier, en 1864)

Reconnues d'utilité publique.

COMPTE RENDU DE LA 38^e SESSION

LILLE

— 1909 —

NOTES ET MÉMOIRES

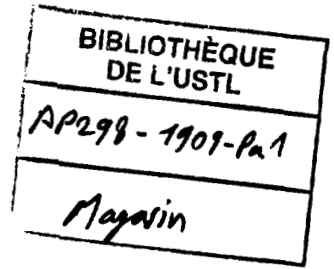


PARIS

AU SÉCRÉTARIAT DE L'ASSOCIATION

rue Serpente, 28

ET CHEZ MM. MASSON ET C^o, LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE
boulevard Saint-Germain, 120



RAPPORTS

3^e ET 4^e SECTIONS. — *Navigation, Génie civil et militaire.*

L'Aéroplane.

M. Paul Painlevé, Membre de l'Institut.

629.135.2

1. Je n'envisagerai dans cet exposé que la seule forme du plus lourd que l'air qui ait jusqu'ici permis à l'homme de voler : l'aéroplane. L'aéroplane est comparable, comme on sait, à un cerf volant propulsé. On y peut distinguer quatre parties : les surfaces sustentatrices ou voilure, l'esquif, le propulseur et le moteur. Chacune de ces parties a exigé une étude spéciale qui est loin d'être achevée. Elles ne sont point d'ailleurs indépendantes, et, dans les aéroplanes de l'avenir, elles devront être étudiées ensemble ; mais pendant quelques années encore, il faudra se borner à les perfectionner séparément.

La théorie de l'aéroplane repose sur les lois de la résistance de l'air. J'insisterai d'abord sur ces lois telles que nous les connaissons aujourd'hui et sur les recherches nouvelles qu'elles réclament.

LOIS DE LA RÉSISTANCE DE L'AIR

2. *Principe de la relativité.* — Le mouvement d'un solide dans un fluide, l'air ou l'eau par exemple, peut être étudié par le calcul quand on néglige la viscosité du fluide, la rugosité des parois et les chocs. Mais il conduit déjà à des calculs extrêmement compliqués, et, d'autre part, les influences négligées jouent, dans les phénomènes qui intéressent l'aviation, un rôle considérable. Or, si on veut tenir compte de ces influences, le problème devient inextricable. Il faut donc recourir à l'expérience. Mais, du moins, la théorie nous fournit un principe qui domine tous les phénomènes de la résistance de l'air et qu'on peut appeler *principe de la relativité*. Considérons un solide mobile dans un fluide, soit l'air, que nous supposons, pour simplifier, à une température donnée partout la même. *Les réactions de l'air sur le solide ne dépendent que des mouvements relatifs de l'air par rapport au corps.* Par exemple, imaginons une sphère animée d'une translation uniforme de vitesse V dans l'air immobile, ou, au contraire, faisons arriver vers la sphère, dans un tunnel, un courant d'air de vitesse V : dans les deux cas, la résistance exercée par l'air vers la sphère sera la même, *sous la réserve que le même régime relatif se soit établi dans les deux cas.*

Ce principe semble contredit par une foule d'expériences anciennes et récentes ; mais c'est qu'on oublie la réserve essentielle que je viens de formuler. Si l'air était entièrement dénué de viscosité et le tunnel parfaitement lisse et de très grande section, c'est le même régime qui, moyennant quelques précautions, s'établirait dans les deux cas. Mais, en réalité, quand un ventilateur

projette dans un tunnel un courant d'air de vitesse moyenne V , la viscosité, les chocs, les frottements engendrent des remous et des tourbillons ; ce n'est point un écoulement uniforme et régulier, mais bien un de ces régimes tumultueux, si bien analysés par M. Boussinesq à propos du cours des fleuves. C'est ainsi que s'expliquent bien des contradictions apparentes, notamment celle-ci : quand un solide est animé d'une vitesse V dans l'air immobile, les résistances du fluide ne sauraient avoir une composante *de sens* V ; autrement, le corps pourrait acquérir, sans dépense de travail, une vitesse indéfiniment croissante. Au contraire, en projetant un courant d'air vers un solide, on a constaté souvent que l'air, au lieu d'entraîner le solide, tend à le pousser en sens inverse du courant : l'énergie cinétique qu'acquerrait le solide s'il était libre, serait empruntée aux remous de l'air, c'est-à-dire, en dernière analyse, fournie par le ventilateur.

De tels paradoxes suffisent à faire comprendre les difficultés des expériences sur la résistance de l'air. Si on emploie la méthode du tunnel (ou du courant d'air provoqué d'une façon quelconque), on échappe difficilement aux remous et on ne peut opérer que sur de petits modèles. Or, on sait l'imprudence qu'il y a à passer, par similitude mécanique, d'un modèle à un modèle semblable beaucoup plus grand. Si on expérimente dans le vent, les remous sont capricieux et le vent souffle par rizées. Si on expérimente dans l'air immobile, la mesure des forces que subit le solide (alors mobile) devient délicate : il faut employer des appareils enregistreurs bien réglés ou des méthodes chronophotographiques. En outre, pour opérer sur de grands modèles, de vastes espaces bien clos (comparables à l'ancienne galerie des machines) seraient indispensables. Suivant qu'on emploiera une des méthodes ou l'autre, il faut s'attendre à des résultats assez divergents. C'est la comparaison des résultats fournis par une méthode uniforme qui sera surtout instructive. D'où la nécessité d'expériences poursuivies dans des conditions analogues, sur un vaste plan d'ensemble. Chaque méthode une fois élucidée, on pourra les comparer entre elles. Seul un laboratoire spécial peut réaliser un tel plan systématique, à condition d'être doté de ressources annuelles considérables.

C'est ce qui explique pourquoi, malgré tant de recherches isolées et tant d'expériences coûteuses, nous possédons si peu de résultats bien établis sur la résistance de l'air. Résumons-les.

3. — *Résistance de l'air à la translation d'un plan mince.*

— Les réactions de l'air sur un plan sont sensiblement normales à ce plan. En fait, elles admettent, à cause de la viscosité et des frottements, des composantes tangentielles qui s'opposent au glissement de l'air sur le plan. Mais ces composantes sont faibles, et nous les négligeons tout d'abord.

Deux cas sont à distinguer suivant que la translation du plan, dans l'air supposé immobile, est normale ou oblique au plan.

PREMIER CAS. — *La translation est normale au plan.* — Un raisonnement fort imparfait de Newton conduit à cette conclusion que la résistance totale de l'air, soit R , est égale à $\frac{\sigma}{2g} A V^2$, σ désignant le poids du cube d'air construit sur l'unité de longueur, g l'accélération de la pesanteur, A la surface du plan, V sa vitesse. D'après d'autres théoriciens (notamment von Iössl), R serait deux fois plus grand. Les expériences modernes, notam-

ment celles d'Eiffel, ont montré que, toutes choses égales d'ailleurs, R dépend non seulement de l'étendue mais de la forme de la surface ; elle est maxima pour les formes rectangulaires dont la longueur égale cinq ou six fois la largeur. Pour de telles formes, la résistance est sensiblement égale à $0,64 \frac{\sigma}{g} AV^2$, plus voisine par conséquent de la valeur de Newton que de celle de von Lössl.

Si on mesure (comme nous le ferons ici) les forces en *kilogrammes poids*, les longueurs en *mètres*, le temps en *secondes*, on a, dans les conditions ordinaires de température et de pression :

$$(1) \quad R = 0,082 A V^2$$

Un rectangle d'un mètre carré qui se meut normalement à lui-même avec une vitesse de 1 m. par seconde, rencontre une résistance de 82 grammes. Mais à 5.500 mètres d'altitude, où la densité de l'air est deux fois moindre, cette résistance serait seulement de 41 grammes.

La formule (1) n'est d'ailleurs qu'une formule approchée. R croît, en fait, un peu plus vite que proportionnellement à A. Tatin propose d'affecter A de l'exposant 1, 1, mais cette correction semble trop élevée. D'autre part, d'après Eiffel, quand V croît, $\frac{R}{V^2}$ varie très lentement et passe par un minimum pour V = 33 m. (130 kil. à l'heure). Toutefois, ce sont là des nuances auxquelles il ne faut pas trop s'arrêter quand il s'agit d'un phénomène aussi complexe.

DEUXIÈME CAS. — *La translation est oblique au plan.* — Soit *i* l'angle de V et du plan (*angle d'attaque*), R_{90} la résistance que rencontrerait le plan s'il se mouvait normalement à lui-même, avec la même vitesse V

On a longtemps admis d'après Newton la formule :

$$(2) \quad \frac{R_i}{R_{90}} = \sin^2 i.$$

C'est la fameuse loi du \sin^2

Euler est le premier qui ait proposé la formule ;

$$(3) \quad \frac{R_i}{R_{90}} = \sin i$$

L'expérience a confirmé, en gros, les vues d'Euler. Il importe toutefois de préciser.

Quand un plan attaque l'air, sous un angle *i*, la résistance qu'il rencontre ne dépend pas seulement de V et de *i* : par exemple, si le plan est rectangulaire, R est plus grand (pour V et *i* donnés) quand le plan attaque l'air par le grand côté (c'est-à-dire quand V est normal au grand côté) que quand il l'attaque par le petit côté.

Bornons-nous, dans ce qui suit, au cas d'un rectangle cinq ou six fois plus long que large, et qui attaque l'air par son grand côté.

L'expérience montre alors que R varie proportionnellement à $\sin i$ (ou à i)

tant que i ne dépasse pas 30° , puis reste à peu près constant. Si l'angle i est mesuré en degrés, on a approximativement :

$$\frac{R_i}{R_{30}} = \frac{i}{30} \text{ pour } i < 30^\circ$$

et $R_i = R_{30} \cdot 0 = R_{90} \cdot 0$ pour $i > 30^\circ$

Dans les conditions ordinaires de température et de pression, on aura donc pour les petites valeurs de i :

$$R = 0,16 A V^2 \sin i.$$

Cette valeur est double de celle que donnait la loi d'Euler (équation 3).

Force sustentatrice et résistance nuisible. — Supposons que la vitesse V du plan rectangulaire soit horizontale : la composante verticale de R , soit N (*force sustentatrice*), est $R \cos i$; sa composante horizontale, soit F , est de sens opposé à V et est dite *résistance à l'avancement ou résistance nuisible*. Si i est petit, on peut écrire :

$$N = 0,16 A V^2 i$$

$$F = 0,16 A V^2 i^2 = N i$$

i étant désormais mesuré en radians.

En réalité, à cause des frottements, il faut ajouter à R une force, soit $f A V^2$, directement opposée à la projection de V sur ce plan ; la composante verticale de cette force est négligeable, la composante horizontale $f A V^2 \cos i$ s'ajoute à F , d'où (pour i petit) les formules :

$$(4) \begin{cases} N = 0,16 A V^2 i, \\ F = A V^2 (0,16 i^2 + f) = N i + f A V^2. \end{cases}$$

Remarque historique. — Au point de vue historique, il est intéressant de remarquer que la loi du sinus (pour les petites valeurs de i) a été établie expérimentalement dès la fin du XVIII^e siècle par Borda, et ce, à l'instigation de l'Académie des Sciences de Paris, désireuse de trancher entre Euler et Newton. Dans son mémoire sur l'aéroplane (1805), le mécanicien Anglais G. Caytey s'appuie sur cette loi « établie, comme il est bien connu, dit-il, par les expériences de l'Académie des Sciences de Paris. » Dès 1875, Pénaud et les membres de la Société Française de navigation aérienne admettaient des lois de la résistance de l'air fort voisines numériquement de celles qu'emploient les aviateurs d'aujourd'hui. Ils connaissaient également l'heureuse influence de l'incurvation des plans sustentateurs dont nous allons maintenant parler, ainsi que la variation des vents de pression. S'il avait eu le moteur, Pénaud était donc en état de construire un aéroplane.

4. *Influence de la courbure de la surface incurvée.* — Laissant rectilignes et horizontaux les grands côtés du rectangle, imaginons que nous incurvions légèrement les petits côtés de façon à former une sorte de berceau cylindrique, qui tourne sa concavité vers le bas, et qui accueille l'air à peu près tangentiellement. On conçoit qu'en supprimant ainsi presque

complètement le choc entre l'air et la voilure, on diminue la résistance à l'avancement. Il importe que la courbure ne soit pas trop reculée à l'arrière (Fig. 1); autrement, une trop grande partie de la surface serait assimilable à un plan horizontal, donc peu efficace. Il ne faut pas non plus qu'elle soit trop prononcée à l'avant (Fig. 2); autrement le choc ne serait pas évité. Il faut accentuer la courbure à l'avant autant qu'il se peut, sans que le phénomène tourne au choc.

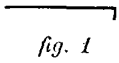


fig. 1

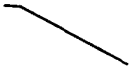


fig. 2

Les voilures employées ont un profil qu'on peut assimiler à une parabole, ayant son sommet à l'avant et une flèche de $\frac{1}{12}$ environ. L'expérience montre que pour A

et V donnés, on peut acheter ainsi la même force sustentatrice par une résistance à l'avancement deux, trois et même, d'après certains, quatre fois moindre que dans le cas de la voilure plane.

Précisons ce résultat. Pour une certaine inclinaison de la voilure, la force sustentatrice N est nulle. Comptons les inclinaisons i à partir de cette position: l'angle i sera donc l'angle avec la vitesse horizontale V d'une certaine droite $b a'$ liée invariablement au profil $a b$ de la voilure, mais qui diffère en général de la corde $a b$.

N s'annulant avec i , on peut écrire :

$$(5) \quad N = AV^2 i [K + l i + \dots];$$

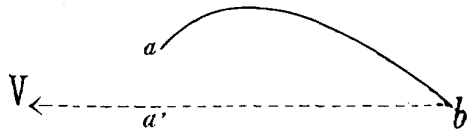
d'autre part

$$(6) \quad F = AV^2 [h + m i + n i^2 + \dots],$$

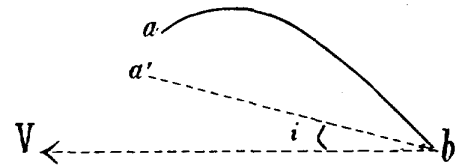
les termes non écrits étant négligeables pour i petit.

Soreau a montré que les expériences de Lilienthal s'interprètent assez bien en faisant $l = 0$, $m = 0$, $n = K$, d'où les formules :

$$(7) \quad \begin{cases} N = K AV^2 i \\ F = AV^2 [K i^2 + h] = N i \\ \quad + h AV^2, \text{ avec } K = 0,33, \\ \quad h = 0,03. \end{cases}$$



Position où $N = 0$



Les formules (7) ont exactement la même forme que dans le cas du plan. D'après cela, on peut, dans toute la théorie de l'aéroplane, remplacer la voilure cylindrique par un plan fictif qui lui est invariablement lié, mais K a une valeur au moins double de sa valeur dans le cas du plan.

Il convient toutefois de remarquer que c'est là une induction plutôt téméraire; car, d'une part, les mesures de Lilienthal prêtent à la critique; d'autre part, il n'a opéré, ainsi d'ailleurs que la plupart de ses successeurs, que sur de petites surfaces (1/2 m. q.). Nous pratiquons donc une extrapolation par similitude, entre deux échelles dont le rapport est de 50 à 1.

Quant aux expériences sur les grandes voilures, elles ne peuvent guère être effectuées qu'en enregistrant la marche ordinaire et la chute planée d'un aéroplane (méthode de Ferber): pour interpréter les mesures ainsi faites, et sur lesquelles nous revenons plus loin, il convient de partir des formules (5) et (6) et de vérifier si les valeurs de m et n sont bien zéro et 1. S'il n'en était

pas ainsi, il faudrait substituer les formules (5) et (6) aux formules (7); mais cette substitution n'entraîne aucune modification essentielle dans la théorie de l'aéroplane.

Lors même qu'on admet d'avance les formules (7), la détermination de K pour un aéroplane donné est difficile: l'observation fournit aisément V et l'angle de la corde ba avec l'horizon. Si cet angle était l'angle i , on aurait K immédiatement; mais i est l'inclinaison du plan fictif ba' , et c'est ce plan qui est mal connu. D'où les énormes divergences (au premier abord incompréhensibles) entre les appréciations de K déduites des mêmes observations par des auteurs différents.

Ce qu'on peut dire actuellement, c'est que K , pour les voilures des aéroplanes existants, semble notablement supérieur à 0,33, et que la résistance nuisible de ces voilures est inférieure au tiers de celle qu'introduirait un plan de même surface qui soutiendrait l'appareil à même vitesse.

Pour une aire A , une vitesse V et une résistance nuisible données, on peut appeler voilure *optima* celle qui a la plus grande force sustentatrice. C'est là un sujet qui appelle des nouvelles recherches. Chaque aviateur a apporté aux ailes de ses appareils des perfectionnements particuliers. Certains expérimentateurs (Bréguet, Rateau) ont attiré l'attention sur l'influence de l'épaisseur de la voilure: ils pensent avoir mis en évidence l'existence d'une force sustentatrice dans le cas d'une surface épaisse dont la face inférieure est horizontale et la face supérieure fortement convexe à l'avant. Ils justifient ainsi la forme de l'avant de l'aile des oiseaux.

5. *Variation du centre des pressions.* — Revenons au cas du plan; nous connaissons la résultante des réactions de l'air: mais en quel point du plan (*centre de pressions*) cette résultante est-elle appliquée? Si le plan se meut normalement à lui-même, ce centre de pressions coïncide avec le centre de figure; mais si le plan s'incline vers la vitesse, la pointe vient en avant du plan et, pour les petits angles d'attaque, il est à une distance du bord antérieur comprise entre le cinquième et le quart du petit côté. De nombreuses formules ont été proposées pour représenter cette variation (Joëssel, Avanzini, lord Rayleigh, Kummer, Soreau).

Quand le plan rectangulaire est un peu incurvé, appelons encore centre de pressions le point c où la résultante rencontre le plan fictif ba' ; quand i est positif et petit, les variations de c sont sensiblement les mêmes que si la voilure était la projection de la voilure vraie sur le plan fictif. Mais quand i devient négatif, le point c pour une certaine inclinaison, recule brutalement très en arrière (Wright): on s'explique le fait aisément par l'influence grandissante des filets d'air qui attaquent l'avant de la voilure par en dessus. Il convient de remarquer que l'inclinaison $i = 0$ ne doit jamais être dépassée ni même atteinte; car la force dite sustentatrice changerait de signe et accélérerait la chute.

Dans les limites usuelles entre lesquelles i doit varier, la théorie est donc la même que si la voilure était remplacée par la voilure plane fictive (aux valeurs numériques près des coefficients).

Remarquons que, dans le cas d'une voilure curviligne, la définition du centre de pressions est assez arbitraire. Ce qui nous intéresse d'ailleurs, c'est la position de la résultante elle-même: peu importe le point de cette résultante qu'il nous plait d'adopter comme point d'application.

6. *Essais théoriques sur la résistance de l'air.* — De nombreux auteurs, depuis Newton, et notamment dans ces dernières années, ont essayé de justifier théoriquement les lois de la résistance de l'air que je viens de résumer. Mais, presque tous ces essais ne sont qu'une élaboration facile d'hypothèses simplistes qui n'ont aucun rapport avec les faits.

Par exemple, une des hypothèses les plus communes pour retrouver la loi du sinus, c'est que la hauteur de la colonne d'air déviée par le plan incliné est indépendante de l'inclinaison du plan. C'est là une hypothèse gratuite et tout à fait invraisemblable. De plus, ces théories ne tiennent, pour la plupart, aucun compte de la dépression qui se forme à l'arrière du plan et qui joue un rôle important.

D'une manière générale, toutes les formules sur la résistance de l'air, sur les variations du centre de pressions, etc., doivent être regardées comme purement empiriques, et n'ont d'intérêt que si elles traduisent bien les résultats expérimentaux.

7. *Surfaces minces animées d'un mouvement quelconque.* — Les lois précédentes s'appliquent à une surface rectangulaire, plane ou incurvée, qui se meut perpendiculairement à son grand côté : il existe un plan de symétrie de la voilure et de tout le phénomène ; les résistances de l'air admettent sûrement alors une résultante unique, située dans ce plan et que nous venons d'étudier. Mais, qu'arrive-t-il quand la surface se meut dans une direction quelconque, par exemple, dévie à droite de son plan de symétrie ? Les réactions de l'air équivalent, dans ce cas, à une force et à un couple, mais non point en général à une résultante unique. Toutefois, quand la surface est plane et quand on néglige viscosité et frottements, les réactions de l'air admettent encore une résultante unique. Mais, où sera le nouveau centre de pressions ? Si la surface dévie à droite, on voit aisément, par raison de continuité, que ce point *c* vient sur la droite du rectangle, mais ce n'est là qu'un renseignement qualitatif.

Quand la surface est légèrement incurvée, on peut admettre que les conclusions précédentes subsistent approximativement en négligeant un couple peu appréciable, les réactions de l'air peuvent être remplacées par une force unique appliquée en un certain point situé sur la droite de la surface.

Pour discuter avec précision la stabilité latérale des aéroplanes, il y aurait le plus grand intérêt à multiplier les expériences dans le cas où l'air prend de côté une voilure rectangulaire incurvée. Lengley n'a fait qu'annoncer la question. Par exemple, pour la stabilité latérale, vaut-il mieux que les ailes forment un V très ouvert vers le haut (Système Lengley) ou un Δ très ouvert vers le bas (Système Esnault-Peltre), ou qu'elles ne forment pas de dièdre du tout ? Voilà un type de problème qu'on ne peut trancher sans nouvelles expériences.

8. Considérons maintenant un plan mince animé d'un mouvement plus compliqué qu'une translation. Un procédé, jadis classique, pour calculer les résistances qu'il éprouve de l'air, consistait à décomposer le plan en éléments, et à admettre que chaque élément subit la même résistance que s'il était seul et animé d'une translation définie par sa vitesse actuelle. On croyait, en un mot, à une loi *élémentaire* de la résistance de l'air permettant de calculer la résistance intégrale, comme les lois de l'attraction universelle entre éléments de matière permettent de calculer l'attraction intégrale entre deux corps

quelconques. On sait, depuis longtemps d'ailleurs, que la recherche d'une telle loi est chimérique. Si on applique le calcul indiqué au cas simple de la translation d'un plan mince, on arrive à cette conclusion que la résultante des réactions de l'air serait toujours appliquée au centre de figure, ce que nous savons tout à fait inexact.

Néanmoins, à défaut d'expériences directes, le procédé de calcul en question peut, manié avec prudence et notamment pour calculer des forces correctives, donner des indications utiles. Reprenons le cas du plan rectangulaire dont le grand côté est horizontal et qui est animé d'une vitesse de translation V horizontale et perpendiculaire au grand côté, le plan étant légèrement incliné vers le haut : nous connaissons la résistance R que l'air lui oppose. Imaginons qu'on anime le plan d'une rotation assez lente autour d'une parallèle au grand côté ; il faudra ajouter à R des forces correctives ; ces forces correctives diffèrent assez peu de celles qu'on calculerait en appliquant à chaque élément du plan la loi du sinus. On rend compte ainsi, d'une façon satisfaisante, du rôle amortisseur de la queue.

Mais il faut se garder de trop se fier à ce mode de calcul. Par exemple, si un plan tourne autour d'un axe fixe avec une très grande vitesse, les résistances vraies qu'il subit diffèrent très notablement de celles qu'indiquerait le calcul classique.

9. *Résistance de l'air à un corps quelconque. Fuselage.* — Les lois de la résistance de l'air à la translation d'un corps de forme quelconque, ont également une grande importance en aviation, car c'est la résistance de l'air sur l'esquif et les organes non sustentateurs qui s'oppose à l'accroissement indéfini de la vitesse d'un aéroplane. Les mémorables travaux du Colonel Renard ont fait ressortir d'une façon éclatante l'importance du fuselage non seulement à l'avant, mais à l'arrière, pour diminuer la résistance que rencontre un corps de section donnée. Mais c'est là une question que traitera M. le Commandant Renard avec une compétence toute spéciale. J'insiste seulement sur l'intérêt qu'il y a à poursuivre dans cette voie les travaux du regretté Colonel : il est certain qu'on peut abaisser encore considérablement les résistances nuisibles par des fuselages bien adaptés. D'après un théorème d'Hydrostatique bien connu sous le nom de paradoxe de d'Alembert, un corps qui se meut uniformément, sans choc, dans un liquide parfait indéfini n'en éprouve aucune résistance : en supprimant les chocs, on ne laissera donc subsister que les résistances provenant de la viscosité ; en réduisant au minimum les déplacements inévitables du fluide, on atténuera ces dernières résistances jusqu'à une limite que nous sommes encore incapables de préciser, mais qui est sûrement beaucoup plus basse que nous ne l'imaginons d'après les expériences actuelles.

LE MOTEUR ET LE PROPULSEUR

10. *Le Moteur.* — Les progrès immédiats des moteurs d'aviation doivent viser non pas un allègement plus accentué mais la constance et la durée de marche. Ces progrès, suivant toute vraisemblance, viendront non pas d'une découverte nouvelle, mais d'une multitude de tâtonnements minutieux, où la théorie ne jouera qu'un faible rôle. Par le nombre des ingénieurs et constructeurs qui s'y attachent, par la facilité et la variété des essais, la mise au point du moteur léger est le type de problème que l'industrie est capable de résoudre sûrement.

Mais les relations qui doivent exister entre un moteur et l'aéroplane qu'il anime constituent un tout autre problème, où l'expérimentation est singulièrement difficile. C'est de ce problème que je m'occuperai uniquement ici.

La plupart des moteurs légers pour une avance à l'allumage donnée, exercent sur leur arbre un couple assez constant, soit C , tant qu'on ne dépasse pas une certaine vitesse de marche. Au delà de cette vitesse, le couple tombe très brusquement à zéro. Soit n le nombre de tours par seconde que l'arbre du moteur ne peut dépasser ; la puissance maxima du moteur est $2\pi n C$. Le problème qui se pose est donc le suivant : le moteur exerçant sur son arbre un couple connu C et sa vitesse de marche ne pouvant dépasser n tours à la seconde, est-il capable de faire voler un aéroplane donné ? Et si oui, quel propulseur lui adapter.

11. *Les Propulseurs hélicoïdaux.* — Ce sont les seuls qui aient été employés jusqu'ici avec succès. Considérons une hélice de pas h , animée dans l'air immobile d'une vitesse V parallèle à son axe et qui tourne en même temps, sous l'action d'un moteur, autour de son axe, à n_1 tours par seconde. Si l'hélice se vissait dans l'air indéformable comme dans un écrou, son axe, pendant un tour d'hélice, glisserait sur lui-même dans un certain sens OZ d'une longueur égale à un pas : pour que l'hélice soit effectivement propulsive (et non retardatrice), il faut qu'elle avance effectivement dans le sens OZ mais d'une longueur $\frac{V}{n_1}$ moindre que h ; autrement dit, hn_1 doit être plus grand que V ; sinon l'air attaquerait l'hélice du mauvais côté.

Admettons d'autre part que les réactions de l'air soient normales à la surface de l'hélice (ce qui est assez exact) : il en résulte aussitôt que la force propulsive Φ de l'hélice et le couple moteur C_1 qui s'exerce sur l'axe de l'hélice sont liés par la relation :

$$C_1 = \frac{\Phi h}{2\pi} ;$$

le travail moteur par seconde est donc par kilogrammètres) $\Phi hn_1 > \Phi V$. La quantité $\frac{\Phi V}{\Phi hn_1} < 1$ est appelée, comme on sait, le rendement de l'hélice.

Les expériences où, en projetant sur une hélice immobile, un courant d'air de vitesse V , on a constaté que ΦV dépassait un peu Φhn_1 s'expliquent par les remous de l'air comme le paradoxe analogue rencontré à propos de la résistance des plans minces.

On peut embrayer directement l'hélice sur l'arbre du moteur, ou au contraire, interposer entre cet arbre et l'hélice un multiplicateur ou démultiplificateur composé de transmissions convenables (chaînes, engrenages, etc.). Entre n et n_1 (nombre des tours par seconde de l'arbre du moteur et de l'hélice), on a la relation

$$n = mn_1,$$

m étant une constante > 1 ou < 1 suivant que l'hélice tourne moins vite ou plus vite que l'arbre moteur. Si on néglige les frottements des transmissions, les couples moteurs C et C_1 sur les deux arbres vérifient l'équation :

$$C_1 = mC.$$

Quand on veut que la force de propulsion ou *poussée* de l'hélice soit Φ à un

régime de translation V , la chose n'est possible que si ΦV est inférieur à la puissance maxima du moteur, et $\frac{h}{m}$ est donné par l'égalité :

$$(1) \quad C = \frac{h}{m} \frac{\Phi}{2\pi}$$

12. Pour aller plus loin, supposons que l'hélice soit composée de pales symétriques deux à deux par rapport à l'axe et de dimensions petites par rapport à leur distance r à l'axe.

Chacune d'elles peut être regardée comme animée d'une translation instantanée. Admettons que la résistance qu'elle subit soit la même que si elle était animée d'une translation uniforme de même vitesse. Cette hypothèse s'écarte notablement de la vérité, à cause de l'agitation de l'air provoquée par la rotation des pales, agitation qui peut provoquer de véritables phénomènes de cavitation si l'hélice tourne trop vite. Mais les formules *schématisques* qui vont suivre donnent pourtant des indications utiles et font bien ressortir la nature des relations qui existent entre le moteur et le propulseur.

Nous nous plaçons dans le cas (qui est celui des applications) où la vitesse des pales due à la rotation, à savoir $2\pi r n_1$, l'emporte beaucoup sur V , en sorte que $\left(\frac{V}{2\pi r n_1}\right)$ est négligeable devant l'unité ; nous supposons en outre $\frac{h}{r} < \frac{1}{2}$

L'angle d'attaque (dont la tangente diffère peu de $\frac{h}{r}$ est alors plus petit que 30° . La formule du sinus appliquée à chaque pale donne, approximativement, si A désigne l'aire totale des pales :

$$(2) \quad \Phi = \lambda 2\pi r A n_1 (h n_1 - V)$$

λ étant égal à 0,16 si l'air est aux conditions ordinaires de température et de pression.

Les remarques faites à propos des voilures incurvées montrent qu'on améliorera l'hélice en incurvant les pales de façon à recueillir l'air à peu près tangentiellement ; autrement dit, on fera croître le pas de l'hélice de l'avant à l'arrière ; à l'avant, le pas devra être à peu près égal à $\frac{V}{n_1}$. L'hélice devra donc

être construite pour fonctionner à vitesses données de translation et de rotation.

En appliquant aux pales incurvées les lois de la résistance des surfaces cylindriques, on voit que les formules (2) subsistent, mais α a une valeur au moins double, donc supérieure à 0,33 et h désigne le pas d'une hélice fictive liée invariablement au propulseur.

13. Ceci posé, soit C le couple exercé par un moteur sur son arbre, qui ne peut dépasser ν tours à la seconde. Proposons-nous de construire une hélice qui, à la vitesse de régime V , exerce une poussée donnée Φ ,

Ceci n'est possible que si ΦV est inférieur à $2\nu \nu = 75\Pi$, Π désignant la puissance maxima du moteur. Cette condition remplie, on pourra d'une infinité de manières déterminer des hélices répondant aux conditions exigées et absorbant soit toute la puissance, soit, seulement, une fraction de cette puissance, mais supérieure à $\frac{\Phi V}{75}$,

Pour que toute la puissance soit absorbée, on doit avoir ;

$$(4) \left\{ \begin{array}{l} h n_1 = \frac{2\pi v C}{\Phi}, \quad 2\pi n_1 A r = \frac{1}{\lambda [2\pi v C - V\Phi]} \\ m = \frac{v}{n_1}, \quad n = v. \end{array} \right.$$

Si ΦV est très voisin de $2\pi v C$, la quantité $n_1 A r$ doit être très grande, $h n_1$ diffère peu de V ; on peut, soit prendre n_1 très grand et alors h petit, soit prendre $A r$ très grand, c'est-à-dire amplifier l'hélice ; dans ce dernier cas, il y aura avantage à prendre h grand afin de diminuer n_1 et les forces centrifuges.

Pour produire la même poussée, à même vitesse V , en absorbant le même travail, on aura donc le choix entre des hélices de petits pas, tournant très rapidement, et des hélices de grandes dimensions et de grands pas, tournant lentement.

Ainsi, la théorie ne nous fournit aucune raison de préférer un des genres d'hélice à l'autre : mais nous avons négligé complètement les considérations d'encombrement, de poids et surtout de rigidité. Il est bien certain notamment qu'une hélice donnée ne peut dépasser une certaine vitesse de rotation sans se rompre. Il faut en outre éviter les phénomènes de cavitation. D'autre part, les moteurs légers tournant très vite, on aura avantage à se contenter de cette vitesse maxima de façon à éviter les transmissions. D'où deux systèmes : hélices rapides, de petit pas, embrayées directement sur l'arbre moteur, hélices plus lentes, plus grandes et de plus grand pas, reliées au moteur par un démultiplicateur. Dans le cas de l'embrayage direct, les formules (4) où on fait $m = 1$, $n_1 = v$ donnent h et $A r$.

14. MM. DRZEWIECKI et RATEAU ont développé une théorie analogue à la théorie sommaire qui précède, mais en tenant compte des composantes tangentielles des réactions de l'air : ils ont tiré de cette théorie des conséquences ingénieuses. Mais, il convient de remarquer qu'on introduit ainsi des quantités sûrement beaucoup plus faibles que l'erreur commise en appliquant la loi du sinus à l'hélice, comme si elle était animée d'un mouvement de translation. L'avantage de la théorie ainsi modifiée c'est, au fond, de comporter une nouvelle constante arbitraire, ce qui permet de la faire mieux cadrer avec l'expérience. Mais, une théorie toute différente, qui introduirait deux constantes arbitraires, s'accorderait mieux encore avec les faits.

J'estime que, dans l'état actuel de nos connaissances, il n'y a point d'avantage à compliquer la théorie simpliste indiquée ci-dessus. Il faut retenir, comme indications qualitatives les quelques résultats énoncés. Diminuer le pas de l'hélice à l'avant pour qu'elle reçoive l'air sans choc ; il faut encore incliner un peu les pales sur les rayons pour que la composante normale de la force centrifuge détruise la poussée de l'air et pour que les pales ne travaillent plus ainsi qu'à la traction. Le reste est affaire d'expériences.

Là encore le Colonel Renard a ouvert la voie ; mais il s'est limité à l'étude expérimentale des hélices au point fixe. Il faut poursuivre, par des méthodes analogues, l'étude des hélices en mouvement. Cette étude, plus encore que celle des grandes voilures, présentera d'énormes difficultés. Les différences entre les diverses méthodes (méthodes du tunnel, du manège, de l'air libre) seront sûrement plus marquées que dans le cas de la translation des surfaces minces. Là encore l'intervention d'un vaste laboratoire spécial apparaît comme indispensable.

Ces expériences une fois effectuées, des formules empiriques, précises remplaceront les formules schématiques employées plus haut. Mais la marche du calcul, dans les applications à l'aéroplane, restera la même.

15. *De l'hélicoptère.* — Les considérations de ce chapitre s'appliquent notamment au cas où V est nul, donc à l'hélicoptère. Le travail moteur dépensé par seconde pour soutenir en l'air un hélicoptère de poids P et P/n_1 ; d'autre part, les formules du n° 12 donnent :

$$\Phi = \lambda 2\pi r A h n_1$$

Ce travail sera donc très petit si $Ar n_1$ est très grand. On ne peut songer à la solution n_1 très grand, car h serait alors extrêmement petit. Mais on peut prendre $r A$ très grand, c'est-à-dire donner d'énormes dimensions à l'hélice (*gynoplans*).

Les aéroplanes actuels rencontrent une résistance à l'avancement, soit Φ , qui varie entre le $1/4$ et le $1/8$ de leur poids; mais la puissance du moteur ne peut être inférieure à $\frac{\Phi V}{75}$. L'hélicoptère exige une poussée égale à son poids, donc beaucoup plus grande, mais la théorie n'impose aucun minimum à la puissance de son moteur.

Les hélicoptères et gyroplans n'ayant point encore réussi à soutenir un homme, d'une façon permanente, certains auteurs ont pensé démontrer que la solution du plus lourd que l'air par l'hélicoptère était chimérique; mais leurs raisonnements reposent sur des hypothèses plus que contestables.

16. *L'étude d'ensemble de l'aéroplane.* — Nous avons considéré les quatre éléments constitutifs de l'aéroplane: voilure, esquif, moteur, propulseur. Jusqu'ici, ces quatre éléments ont été étudiés séparément: on a cherché à déterminer la meilleure voilure, le meilleur fuselage, la meilleure hélice, etc., et on a réuni ces éléments en les coordonnant. Mais c'est la difficulté même du problème qui contraint à cette division. En réalité, l'aéroplane est un tout comme l'oiseau; toutes ses parties réagissent les unes sur les autres. La voilure, qui isolée est optima, n'est peut-être plus la meilleure quand elle est accompagnée de l'esquif et surtout suivie ou précédée de l'hélice; et des remarques analogues s'appliquent aux trois autres éléments.

Par exemple, on donne à la voilure et à l'esquif les formes qui laissent derrière elles le plus faible sillage, et on s'efforce de faire travailler l'hélice en air calme. En réalité, l'appareil laisse toujours derrière lui un sillage d'air animé de remous. Mais imaginons qu'on réalise un fuselage tel qu'un courant d'air très calme accompagne l'arrière de l'aéroplane; on pourra faire travailler l'hélice dans ce courant comme au point fixe; $h n_1$, ne sera plus astreint à être plus grand que V , et la puissance absorbée par l'hélice sera inférieure à $\frac{\Phi V}{75}$.

C'est ce qui a été constaté déjà sur certains navires: l'hélice semble avoir alors un recul négatif par rapport à l'ensemble de l'Océan, en réalité, conformément à la théorie, elle a un recul positif par rapport au courant d'eau où elle se meut. En un mot, une partie de l'énergie communiquée à l'eau par l'avant du navire est récupérée au profit de l'hélice. Un tel résultat, s'il pouvait être systématisé, aurait la plus grande importance pour l'accroissement de la vitesse des aéroplanes.

J'ai cité ce problème pour montrer la répercussion l'une sur l'autre des diverses parties de l'aéroplane. Mais de tels problèmes, qui exigent une étude de l'aéroplane *intégral*, ne sauraient être abordés que dans un avenir encore éloigné; pendant des années encore, il faut, comme je le disais au début, perfectionner séparément les divers organes de l'aéroplane.