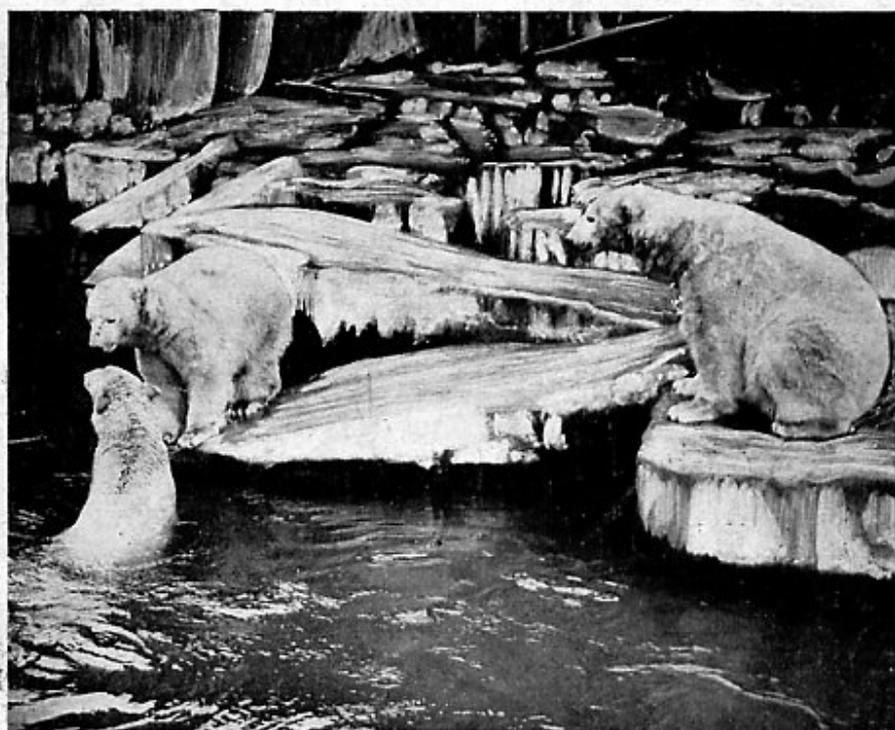


# l'Aérophile

LA REVUE D'AÉRONAUTIQUE LA PLUS ANCIENNE DU MONDE

VULGARISATION ET PRATIQUE

AÉRONAUTIQUE



Qu'est-ce qu'une polaire ?

VOIR ARTICLE PAGE 26

Photo archives Aérophile

MARS 1941

CE NUMÉRO : 7 FRANCS

— 49<sup>e</sup> ANNÉE —

# VULGARISATION AERONAUTIQUE

## QUEST-CE QU'UNE POLAIRE ?

**L**a polaire, dont nous allons nous occuper n'a aucun rapport avec les zones glaciales, ni avec aucune artiste renommée. Il s'agit, simplement d'un procédé graphique pour représenter les qualités d'une aile.

Nous savons déjà qu'une aile, soumise à l'action d'un vent, produit une réaction  $R$  généralement inclinée en fonction de la direction du vent, et en conséquence susceptible de se décomposer, en règle générale, suivant trois forces :

L'une perpendiculaire à la direction du vent et à l'envergure (portance)  $R_z$  ;

La deuxième également perpendiculaire à l'envergure, mais en formant le plus petit angle possible avec la direction du vent (traînée)  $R_x$  ;

La troisième parallèle à l'envergure et en conséquence perpendiculaire aux deux autres (composante transversale)  $R_y$  (fig. 65).

L'intensité de chacune de ces forces et la position de leur point d'application sur l'aile, et surtout l'angle formé par la réaction totale  $R$  avec la direction du vent, sont des données de la plus haute importance pour solutionner le problème du vol mécanique. Elles doivent être déterminées le plus exactement possible pour chaque forme et pour chaque grandeur d'aile, de même que pour toutes les vitesses et positions relatives de l'aile et du vent.

On a essayé, par différents procédés, dont nous nous occuperons plus loin, d'appliquer les mathématiques à la détermination de ces quantités. Mais les résultats obtenus, plutôt que d'utilité pratique, peuvent être considérés uniquement comme des efforts faits par les mathématiciens qui ne veulent pas céder aux expérimentateurs un terrain d'investigation qui, malgré son apparence simple, est trop compliqué pour l'emploi du calcul comme seul moyen de détermination. Dans la lutte éternelle entre les deux sources des connaissances humaines, le calcul mathématique et l'expérience, c'est-à-dire entre la théorie et la pratique, chacun des rivaux a son propre rayon d'action parfaitement délimité, qu'il ne devrait quitter que pour aider l'autre, lorsque cela devient nécessaire. Il serait amusant, mais tout à fait inutile, de construire un petit modèle de système planétaire pour déterminer expérimentalement les ellipses qui, étant soumises à des lois parfaitement définies, permettent l'application des mathématiques en donnant des résultats

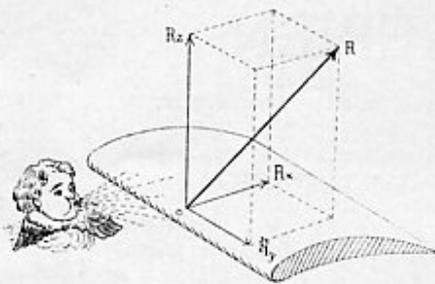


FIG. 65

Dans le cas général, l'action du vent sur une aile crée une force oblique, représentée par un vecteur  $OR$ , qui peut être décomposée en trois autres : verticale (perpendiculaire au vent) ; portance  $OR_z$ , horizontale (perpendiculaire à l'envergure) traînée  $OR_x$  et transversale (parallèle à l'envergure) composante de dérapage  $OR_y$ . Ces trois forces, représentées par ces vecteurs, forment un parallélépipède rectangle dont la diagonale est la force totale, ou résultante,  $OR$ .

d'une extrême précision qu'il est impossible d'atteindre par l'expérimentation. Par contre, les actions de l'air sur une surface d'aile, extrêmement compliquées, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, ne permettent l'application des mathématiques qu'en faisant des suppositions très éloignées de la réalité. Les résultats obtenus, toujours intéressants comme curiosités, n'ont pas d'utilité pour la pratique, laquelle doit se servir, dans ce cas, des résultats de l'expérience, de beaucoup plus précis. C'est une dé faite pour les mathématiques, bien méritée comme punition pour le péché d'avoir envahi un terrain qui ne lui appartenait pas encore (fig. 66).

Puisque nous n'avons pas de formules mathématiques pratiquement utilisables pour prédéterminer les propriétés d'une aile avec la précision exigée, l'emploi de procédés graphiques s'impose, qui présentent, d'un seul coup d'œil, toutes les données qu'il nous faut employer pour les applications pratiques. Il en est de même pour le médecin qui, pour faire un diagnostic et suivre le cours d'une maladie, trace une courbe représentant graphiquement la température, le pouls et autres particularités de la maladie qui ne pourraient être calculées parce qu'on ne con-

naîtrait pas suffisamment les lois naturelles qui les régissent.

Le malade, à chaque heure, a une température et une fréquence de pouls qu'on représente sur la courbe, et, de la même façon, une aile a une portance, une traînée, une position du point d'application, etc., pour chaque position déterminée par son angle d'attaque ou d'incidence avec le vent (fig. 67).

On comprend que la mesure de l'angle d'attaque soit de la plus grande importance, puisque une petite variation de position peut produire de grands changements dans les forces aérodynamiques développées.

Il faut d'abord se mettre d'accord sur la façon de mesurer l'angle d'attaque d'une aile. S'il s'agissait d'un plan, l'angle d'attaque serait parfaitement déterminé puisqu'une droite (la direction du vent) et un plan forment toujours un angle qui peut être mesuré avec toute précision. Mais il n'en est pas de même lorsqu'il s'agit d'une surface courbe telle que celle d'une aile.

Pour savoir, dans ce cas, quel est l'angle d'attaque, il faut choisir une droite de référence, fixe par rapport à l'aile, sur laquelle on mesurerait l'angle formé par la direction du vent, qui serait conventionnellement l'expression de l'angle d'attaque.

Parmi les droites infinies que l'on peut choisir ; il y en a trois qui sont les plus généralement employées : la tangente à l'intrados de l'aile, la droite passant le bord d'attaque et le bord de fuite, et celle qui, marquant la direction du vent, produit portance nulle (fig. 68). Chacune de celles-ci a ses avantages et doit être employée dans ses cas particuliers.

La tangente  $H$  à l'intrados de l'aile est la plus employée dans la pratique par les constructeurs d'avions dans la rédaction de leurs instructions pour le montage et le réglage, cette droite pouvant, en effet, être facilement réalisée en appliquant une règle à la surface inférieure de l'aile dont l'inclinaison est à mesurer.

La droite  $as$  qui passe par les bords d'attaque et de sortie ne présente d'avantages que pour les profils symétriques et est employée, dans ce cas, dans les catalogues d'ailes (1).

(1) N. D. L. R. — Les catalogues d'ailes donnent des profils étudiés dans les souffleries, susceptibles d'être utilisés pour des réalisations déterminées (Profils N. A. C. A., S. T. A. S. T. A. C., etc.)

Les données obtenues par les essais de laboratoire constituent le procédé le plus exact pour connaître les propriétés aérodynamiques d'une aile. Malgré les efforts faits par les mathématiciens pour déduire ces propriétés par le calcul théorique, dans cette lutte de l'expérience entre les mathématiques pures, c'est la première qui a eu le dessus.

Après avoir mesuré le pouls et la température du patient, le médecin trace un graphique pour en déduire le pronostic de la maladie et savoir si le malade pourra ou ne pourra pas être sauvé. De la même façon, le technicien soumet chaque aile à des expériences qu'il représente graphiquement pour déterminer d'avance comment elle va se comporter en vol et si elle pourra ou ne pourra pas soulever le poids exigé.

FIG. 66

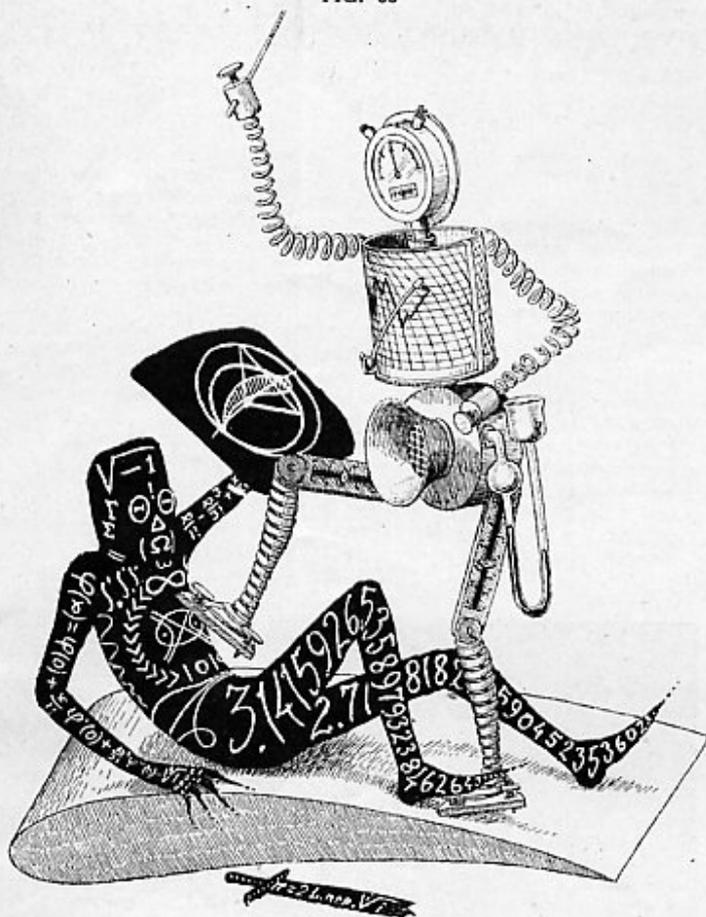


Fig. 67



Tous les efforts aérodynamiques produits ou subis par une aile dépendent surtout de l'angle d'incidence sous lequel elle reçoit le vent relatif. Il faut donc se mettre d'accord sur la manière de mesurer cet angle formé par une direction (le vent) avec une surface courbe (l'aile), en choisissant une droite de référence conventionnelle fixée à l'aile. Pour cela, trois droites différentes sont employées, la  $T$  tangente à la surface inférieure (intrados) de l'aile, qui peut être matérialisée par une règle : la  $a$  passant par les points les plus éloignés des bords d'attaque et de fuite et la  $Rz = 0$  représentant la direction du vent qui produirait une portance nulle.

La direction du vent à portance nulle  $Rz = 0$  présente enfin l'avantage de ce que, pour les petits angles d'attaque, les portances sont proportionnelles aux angles, ce qui facilite les calculs. Elle est en conséquence employée dans les avant-projets et projets d'avions pour la détermination mathématique de la portance à partir des données déduites des graphiques. Dans les profils symétriques, cette dernière droite de référence coïncide naturellement avec celle passant par les deux, qui serait l'axe de symétrie du profil.

Ordinairement, on suppose le vent soufflant normalement vers la largeur ou « envergure » de l'aile, en formant un angle  $\alpha$  d'incidence ou d'attaque avec la droite de référence choisie, mais il y a des cas où il faut envisager un vent soufflant de côté et qui, outre l'angle d'incidence  $\alpha$ , formerait un autre angle dit de dérapage, avec le plan de symétrie de l'aile.

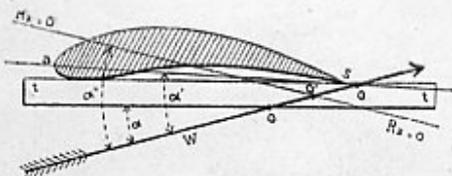
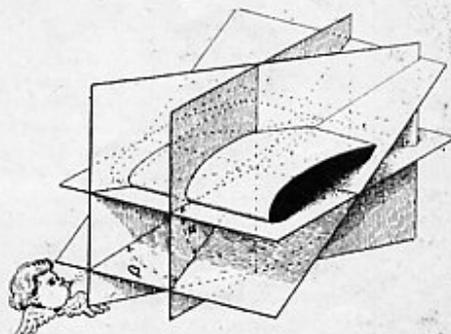
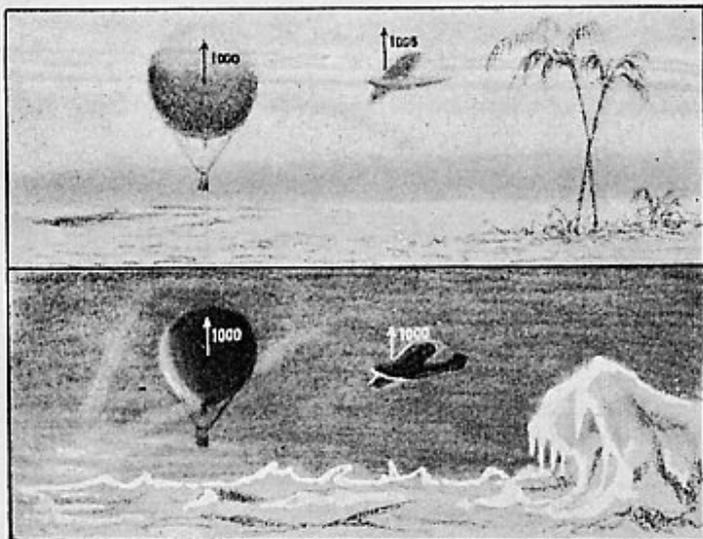


FIG. 68

En réalité il faudrait connaître, outre l'angle d'attaque ou d'incidence ( $\alpha$ ) formé par la direction du vent avec des droites de référence, l'angle de dérapage  $\beta$  formé aussi par la direction du vent avec le plan central ou de symétrie de l'aile (fig. 69), mais c'est le premier qui a la plus grande importance dans le calcul de l'avion ; le dernier correspondant uniquement à des positions anormales de vol.

FIG. 69





**Influence de la pesanteur dans la portance.**

Pour calculer la force ascensionnelle d'un ballon donné, il suffit de connaître le poids du mètre cube d'air, mais il n'en est pas de même pour la détermination de la portance d'une aile, où il faut connaître aussi l'intensité de la gravité (accélération  $g$ ) du lieu. Un ballon et un avion produisant chacun une portance d'une tonne au pôle terrestre, transportés à l'équateur, en les supposant dans un air de poids égal au mètre cube, produiraient pour le ballon une tonne également et, pour l'avion, 5 kilogs de plus qu'au pôle, puisque la gravité est de 0,5 0/0 plus petite à l'équateur, l'air d'un même poids doit donc être plus dense en masse qu'au pôle.

(à gauche)

FIG. 70

Le poids de l'air déplacé produit la portance aérostatique d'un ballon, en même temps que l'effort de son matériel ; tandis que ce même poids crée, dans un avion, sa portance en quantité de matière à transporter, mais ne crée pas l'effort que cette portance fait subir à son matériel, effort qui sera d'autant plus grand (à égalité de poids de l'air) que la pesanteur sera faible. Le poids peut être mesuré par une balance romaine et l'effort par un dynamomètre à ressort.

Si nous avons un dynamomètre et une balance romaine chargés tous les deux d'un poids de un kg à la surface de la terre et si nous les supposons transportés sur la Lune (dessin supérieur) la romaine continuera à marquer un kilogramme sous les yeux des sélénites, mais le dynamomètre n'accusera que 160 grammes (vrai poids d'un kilog terrestre sur la Lune) tandis que si elles sont transportées sur le compagnon de Sirius où une boîte d'allumettes pèse une tonne, les habitants trapus de ce monde étrange (s'il y en a) verraient les deux appareils se casser sous le poids énorme des 30 tonnes marquées par le dynamomètre, alors que la romaine continuerait à marquer 1 kg.

Supposons, maintenant, le même ballon naviguant dans l'atmosphère de Mars, à la vue des Martiens imaginés par Wells, ou parmi les protubérances du Soleil et admettons qu'il ne brûle pas, sa force ascensionnelle serait toujours d'une tonne, si le gaz où il était plongé avait le même poids par mètre cube, mais l'avion, dans des conditions égales, donnerait une portance de 2.700 kilogs sur Mars et de 36 kilogs sur le Soleil, la pesanteur étant 2,7 fois plus faible sur Mars et 27,5 fois plus forte sur le Soleil, par rapport à celle de la Terre.

FIG. 71

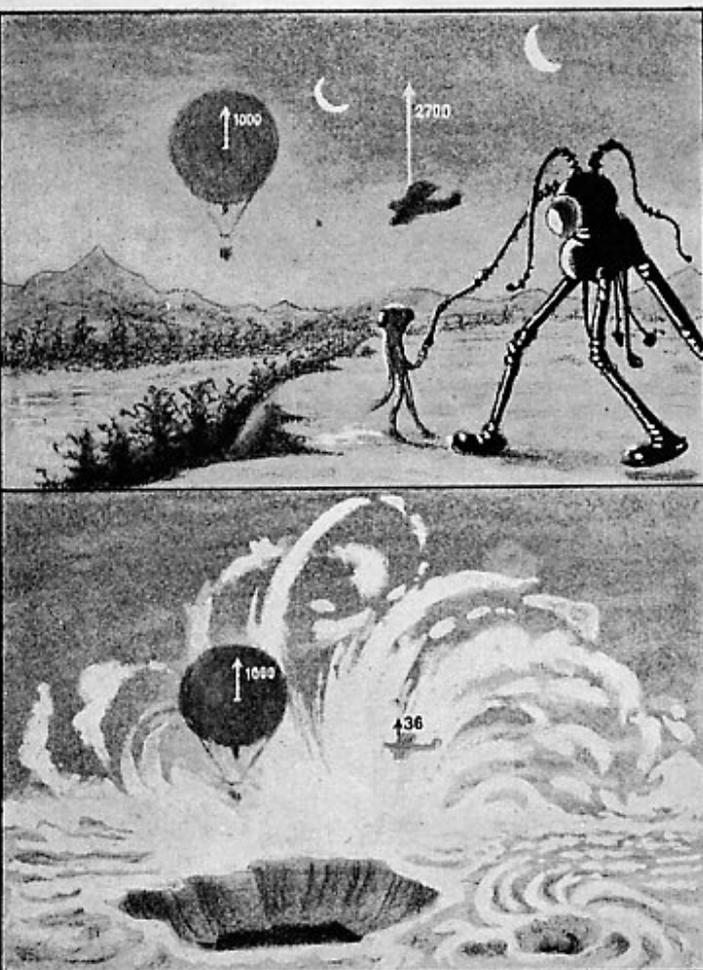


FIG. 72

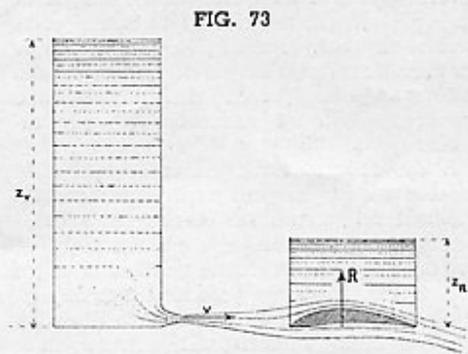


Etant donné l'impossibilité de trouver une formule mathématique applicable pour l'obtention des différentes composantes de la réaction du vent sur chaque aile, il faudrait, pour la représentation graphique de ces composantes, dessiner un graphique pour chaque forme et chaque grandeur de l'aile, pour chaque vitesse: du vent et pour chaque densité de l'air. Mais bien qu'une formule générale n'existe pas, on peut établir quelques suppositions de proportionnalité qui, même en n'étant pas rigoureusement exactes, ont une précision suffisante dans les cas les plus courants et simplifient considérablement le problème.

Les composantes de la réaction du vent sur une aile dépendent, ainsi que nous l'avons vu, de l'angle d'attaque et de la forme de l'aile. Elles dépendent aussi de la grandeur de l'aile, mais on peut les supposer proportionnelles à la surface; elles dépendent en même temps de la vitesse du vent, mais on peut admettre la proportionnalité au carré de cette vitesse. Il est également, de toute évidence, que les composantes de la réaction de l'air sur l'aile ne sont pas les mêmes au niveau de la mer qu'à une grande altitude, non plus dans une atmosphère glaciale, que dans une chaleur torride, mais la proportionnalité à la densité de l'air est presque exacte (fig. 70). Enfin, et contrairement à ce qui arrive aux forces aérostatiques dépendant uniquement du poids du mètre cube d'air déplacé, les forces aérodynamiques dépendent aussi de l'accélération de la gravité. Par exemple, une aile volant dans un air dont le poids par mètre cube serait le même,

En admettant la proportionnalité des forces aérodynamiques à la surface de l'aile, au poids du mètre cube de l'air, au carré de la vitesse et inversement à l'accélération de la gravité, le coefficient de proportionnalité,  $c$ , serait constant pour chaque angle d'attaque.

Ce même coefficient  $c$  peut être considéré comme le rapport entre les hauteurs de deux colonnes d'air d'égale densité: une  $Zc$  qui produirait par sa base un écoulement d'une vitesse égale à celle du vent agissant sur l'aile, et une autre  $ZR$  produisant sur la surface de l'aile une pression égale à celle produite par l'action du vent.



avec angle d'attaque égal et même vitesse, donnerait à l'équateur terrestre un demi pour cent de plus de portance qu'au pôle; à la planète Mars la portance serait 2,7 fois plus grande qu'à la Terre, et au Soleil 27,5 fois plus petite (fig. 71). Ceci peut être expli-

qué ainsi: si le poids de l'air est égal dans deux lieux dans lesquels la gravité est différente, l'air soumis à une gravité moindre doit contenir une plus grande masse et réciproquement.

Des ballons d'un même cubage auraient cependant la même force ascensionnelle quelle que soit la gravité du lieu, si le poids de l'air par mètre cube était le même, puisque le poids de l'air déplacé, qui est égal à la force ascensionnelle, serait constant.

Il faut tenir compte que toutes ces forces aérodynamiques, comme n'importe quelle force, peuvent être mesurées avec une balance à poids ou avec un dynamomètre à ressort et les résultats seront différents si la gravité du lieu n'est pas la même. C'est le deuxième procédé qui donne la vraie mesure de l'effort produit, telle que celui que les matériaux doivent subir, le premier dépendant de l'attraction avec laquelle les poids employés sont attirés vers la terre.

Une balance, une bascule à poids ou une balance romaine équilibrée à un kilo, par exemple, continuerait à marquer le même poids si elle était transportée sur la lune, bien que le poids ne serait plus en cet endroit que de 160 grammes; si elle était transportée sur une étoile, compagne de Sirius, elle se briserait sous le poids de 30 tonnes que ses leviers devraient supporter sur chaque plateau (fig. 72), et qu'un dynamomètre à ressorts aurait marqué comme véritable effort subi, par suite de la plus grande intensité de la pesanteur, ou gravité, du lieu de l'expérience.

Une fois que la proportionnalité est admise, il suffit de représenter graphiquement les valeurs des coefficients  $c$  pour chaque angle d'incidence  $\alpha$ . Si sur deux axes perpendiculaires gradués en valeurs des coefficients  $C_z$ , de la portance et  $C_x$  de la traînée nous prenons les points correspondants à chaque angle  $\alpha$  et signalons le sommet du rectangle formé sur eux, nous obtiendrons une suite de points, numéroté chacun avec le nombre de degrés de l'angle  $\alpha$  correspondant, et, en unissant tous ces points par une ligne continue on aura une courbe. C'est la polaire du profil d'aile choisi. L'axe des  $C_x$ , généralement horizontal, marque la direction du vent, censée être constante, tandis que l'aile changerait de position pour former chaque angle d'incidence.

La droite tracée de l'origine à un point de la polaire représenterait, en valeur, le coefficient  $c$  de la résultante totale, et, en direction, celle de cette force.

FIG. 74

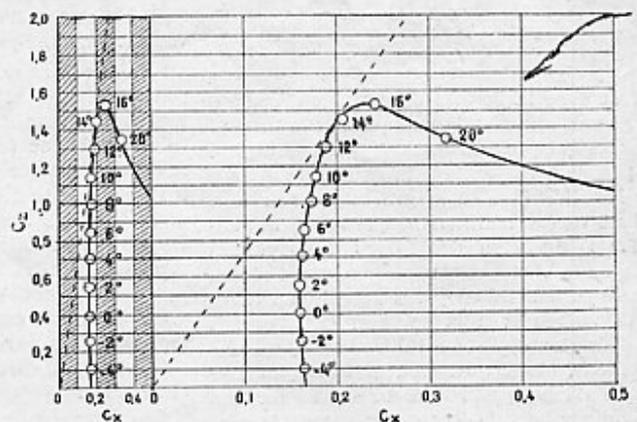
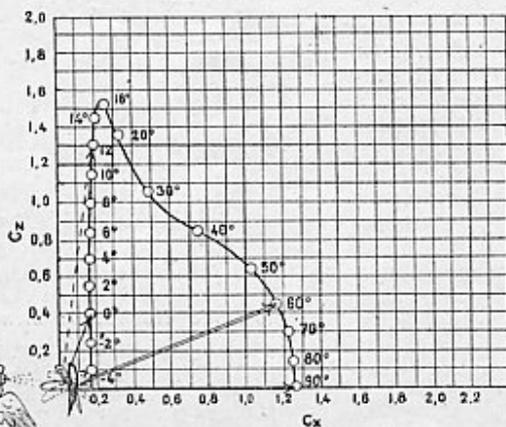
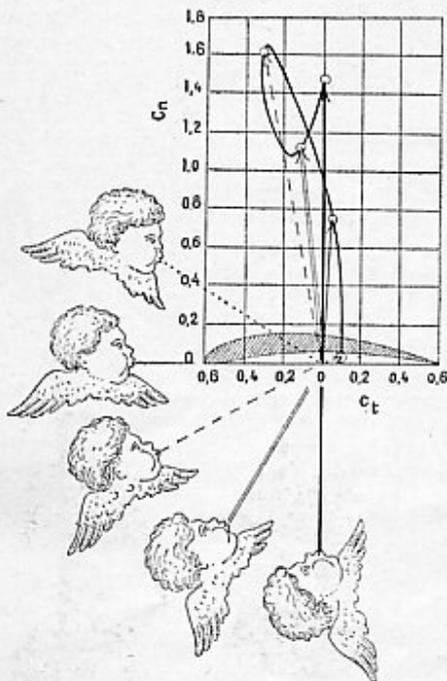


FIG. 75

Les deux graduations des axes de la polaire sont à échelles égales, mais cette condition, nécessaire pour que le vecteur tracé de l'origine (ou pôle) à un point de la courbe, représente la résultante  $R$  cependant l'inconvénient de ce que la courbe, dans les ailes à bon rendement, est, à son commencement et pour les angles d'incidence inutilisables, trop de l'axe  $C_z$ , et ses coefficients de traînée  $C_x$  sont difficiles à déterminer avec une précision suffisante. Pour éviter cet inconvénient, on emploie, pour la graduation de l'axe  $C_x$  une échelle 5, ou même 10 fois plus grande que celle de l'axe  $C_z$ , tel qu'il en adviendrait si la courbe était dessinée sur un papier plié en accordéon qu'on développerait 5 fois sur sa largeur. Naturellement, la courbe obtenue n'est plus une polaire parce que son origine ne peut être considérée comme pôle, les vecteurs qui partent de ce point n'ayant aucune signification, mais, par habitude, on l'appelle, quand même, polaire.

Les valeurs des coefficients  $c$  pour chaque angle d'incidence, peuvent être aussi représentées en supposant l'aile fixe et le vent soufflant dans toutes les directions, et en traçant à partir du point choisi comme pôle, des vecteurs correspondants. C'est la polaire dite de Lilienthal, très employée dans les projets d'autogyres et appareils à voilure tournante. Les composantes de ces vecteurs ne sont plus la portance et la traînée, mais les composantes normales et tangentielles à l'aile.

FIG. 76



C'est donc la densité de masse qui compte pour les efforts aérodynamiques, et la densité de poids qui produit les forces aérostatiques. La première est égale à la deuxième divisée par l'accélération de la gravité de l'endroit.

Nous voyons maintenant que l'on peut simplifier l'expression des forces aérodynamiques en admettant sa proportionnalité directe à la densité en poids de l'air, au carré de la vitesse et à la surface, et inverse à l'accélération de la gravité du lieu. Il ne restera donc, alors, qu'à trouver le moyen graphique d'exprimer la valeur de la force à déterminer lorsque toutes ces quantités sont égales à l'unité. Cette valeur s'appelle le coefficient aérodynamique de l'aile, ou du corps en général, dont la forme est donnée, et relativement à la portance, la traînée, la composante latérale, la position du point d'application de la force (centre de pressions), etc., pour chaque angle d'incidence ou de dérapage.

Nous avons ainsi une force qui correspond à une surface et à une densité en poids de l'air, ce qui détermine une certaine hauteur (la hauteur d'une colonne fluide de cette densité qui produirait en bas une pression, sur cette surface, égale à la force trouvée) et, en même temps, intervient la vitesse de l'air : l'accélération de la gravité, ce qui correspond à une autre hauteur : celle de la

colonne d'un fluide qui aurait cette vitesse en s'écoulant par le bas (cette hauteur étant égale au carré de la vitesse sur le double de l'accélération de la gravité). Le coefficient aérodynamique peut donc être considéré comme le rapport entre ces deux hauteurs, celle de la pression produite par l'air sur l'aile et celle qui produirait la vitesse de l'air (fig. 73).

Ce coefficient aérodynamique est représenté (suivant l'accord de la Commission Internationale de Navigation Aérienne) par la lettre  $c$  minuscule avec l'indice  $x$  pour la portance, et  $x$  pour la traînée, et sa valeur serait égale à la force trouvée divisée par la surface de l'aile, le carré de la vitesse et la densité de l'air, et multipliée par le double de l'accélération de la gravité  $g$  qui, comme valeur moyenne, possède sur la terre une valeur égale à 9,8 mètres-seconde par seconde.

Il est donc suffisant, en conséquence, de trouver un moyen pour représenter graphiquement les valeurs des coefficients aérodynamiques  $c$  pour chaque angle d'attaque et des formes de profil d'ailes que l'on croit les plus intéressantes. Un procédé serait de supposer que le vent souffle dans une direction fixe, par exemple l'horizontale, et l'aile, en le recevant, sous différents angles d'incidence, produirait des réactions dont les directions peuvent être marquées par des droites à partir d'un point fixe (pôle) en prenant sur chacune une longueur proportionnelle au coefficient  $c$ . Les extrémités de ces droites (vecteurs) seront placées sur une courbe, c'est la polaire du profil d'aile (fig. 74). Sur cette courbe on marque une graduation pour indiquer les angles d'incidence correspondant au vecteur passant par chaque point.

Si, dans le même graphique deux axes perpendiculaires sont tracés, l'un horizontal correspondant à la direction du vent, et l'autre vertical, chaque vecteur représentant  $c$ , pourra être décomposé dans ses deux composantes  $c_x$  coefficient aérodynamique de traînée, et  $c_z$  coefficient aérodynamique de portance. Le rendement aérodynamique ou finesse  $f$  du profil, qui est le rapport entre la portance et la traînée, peut être déduit aussi de la polaire, puisqu'il est d'autant plus grand que l'angle formé par le vecteur avec l'axe vertical est petit (il est égal à la cotangente de cet angle).

Les deux axes perpendiculaires portent des graduations pour mesurer les valeurs de  $c_x$  et  $c_z$  de chaque point de la polaire. Ces graduations peuvent être égales, mais pour les ailes de bonne finesse, la polaire deviendrait trop près de l'axe vertical, et généralement, on fait la graduation des  $c_x$  5 fois et même 10 fois plus grande que celle des  $c_z$  (fig. 75). La courbe, dans ce cas, n'est plus une polaire, parce qu'elle ne correspond pas à des coordonnées polaires qui doivent avoir la même échelle dans toutes les directions, mais on l'appelle quand même polaire.

On peut suivre un procédé inverse, c'est-à-dire, supposer l'aile fixe et le vent soufflant dans toutes les directions, et tracer également, à partir d'un pôle, des vecteurs représentant les directions des réactions aérodynamiques et les valeurs des coefficients  $c$

(fig. 76). La courbe ainsi obtenue s'appelle la polaire de Lilienthal et a une très grande application pour le calcul des autogyres et les autres appareils à voilures tournantes.

Dans ce système de polaire, les composantes mesurées sur les axes perpendiculaires ne sont plus les valeurs des  $c_x$  et  $c_z$ , mais les coefficients aérodynamiques des réactions normales et tangentielles sur l'aile,  $en$  et  $et$ , c'est-à-dire des forces agissant normalement à la corde ou profondeur de l'aile, et dans le sens de cette corde, quel que soit son angle d'incidence.

Ces procédés n'indiquent pas la position du centre des pressions, qui peut être marqué au moyen d'autres graphiques. Si, sur le graphique du profil de l'aile on trace les droites correspondant aux directions du vent soufflant dans les différentes directions, ces droites passant chacune par leur point d'application (centre des pressions), et si on les limite, à partir de la corde de l'aile, à une distance proportionnelle à la valeur de  $c$ , nous aurons deux courbes (fig. 77), l'une  $m m m$  enveloppante des droites et l'autre marquée par les extrémités des vecteurs,  $c c c$ . Cette dernière sert à mesurer les coefficients  $c$  de chaque direction du vent par la longueur  $oc$  de la droite correspondante comprise entre la corde et la courbe, et la première est appelée la courbe métacentrique de l'aile, par analogie à celle des bateaux (fig. 78).

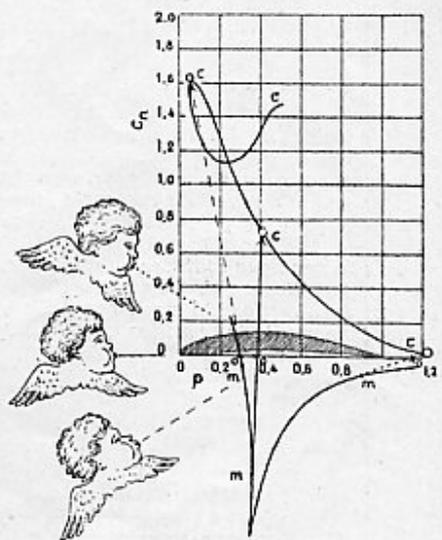


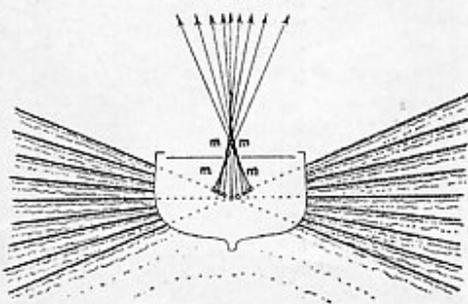
FIG. 77

Les polaires décrites ci-dessus ne donnent pas d'indication sur la position du centre de poussées (point d'application de la résultante). Pour la déterminer, on emploie le graphique métacentrique tracé sur le même principe que la polaire de Lilienthal, mais en faisant partir chaque vecteur de son point d'application en rapport avec le profil d'aile dessiné, ou bien en les faisant partir tous du même point (pôle).

Les extrémités de ces vecteurs sont sur une courbe  $c c c$  des coefficients, et tous les vecteurs, prolongés si cela est nécessaire, ont une enveloppe qui est la courbe métacentrique,  $m m m$ .

Le nom de courbe métacentrique des ailes est employé par analogie avec celle des bateaux, ou corps flottants, enveloppe de tous les vecteurs représentant les forces hydrostatiques de l'eau dans les différentes inclinaisons de la surface liquide avec le corps.

FIG. 78



Cette construction peut être généralisée dans le cas d'un vent qui ne souffle pas dans le plan de symétrie de l'aile, mais en formant avec lui un angle  $\beta$  de dérapage, et nous obtiendrons une surface métacentrique et une surface des coefficients, au lieu des courbes déjà trouvées (fig. 79). Sur ces surfaces seraient tracées des courbes indiquant les valeurs des angles  $\alpha$  d'incidence et  $\beta$  de dérapage, correspondant à chaque point. Généralement, tous ces graphiques sont li-

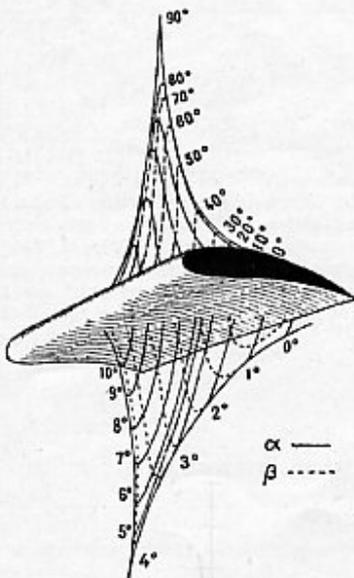


FIG. 79

Si l'on considère aussi les vents soufflant de côté, en plus des vents normaux à l'envergure, la courbe métacentrique devient une surface métacentrique, chaque point de celle-ci correspondant à un vecteur qui lui est tangent et qui, à son tour, correspond à un angle d'incidence  $\alpha$  et à un angle de dérapage  $\beta$ .

La surface métacentrique des plans et ailes à très faible courbure se trouve sur l'extrados, tandis que celle des autres est du côté de la concavité.

mités, comme nous les avons présentés, à des angles d'incidence compris entre quelques degrés négatifs jusqu'à un angle dépassant un peu celui produisant le maximum de portance, qui sont les plus utilisés dans la pratique, mais il y a des cas, comme dans les appareils à voilures tournantes, dans lesquels il faut connaître les réactions sous tous les angles d'incidence possibles. Il faut, alors, tracer la polaire complète, pour les angles d'incidence de 0° à 360°, qui a une forme pareille à celle de la figure 80.

Dans les polaires que nous avons présentées, les deux axes perpendiculaires pour mesurer les composantes de portance  $c_z$  et de traînée  $c_x$ , sont gradués en échelle naturelle, mais il y a des cas, que nous verrons plus loin, où l'emploi d'une échelle logarithmique est nécessaire. La différence est la suivante : l'accroissement d'une quantité peut être mesurée en unités de la même quantité (accroissement absolu) ou en pourcentage de la quantité qui croît (accroissement proportionnel) ; si un enfant passe dans un an de 120 cm. de hauteur à 132, son accroissement absolu sera de 12 cm. et son accroissement proportionnel sera de 10 %.

L'échelle naturelle croît comme les accroissements absolus des quantités représentées, et l'échelle logarithmique comme les accroissements proportionnels. Entre les numéros 2 et 3, ou entre les 4 et 5 il y aurait, sur l'échelle naturelle, un écartement d'une unité, tandis que, sur l'échelle logarithmique, l'écartement serait de 0,50 et 0,25 respectivement, puisque les numéros auraient crû de 50 % et 25 %.

Quelques exemples pourront éclaircir cette différence et les avantages de l'emploi des échelles logarithmiques dans certains cas.

Louis et Pierre ont hérité, chacun, d'un gros billet de leur père. Louis emploie cet argent à installer un atelier où il gagne un billet semblable chaque année, qu'il garde dans sa caisse. Son frère, Pierre, place son billet à intérêt composé dans une banque, intérêt si productif que son capital est doublé chaque année.

Au commencement Louis n'avait pas d'argent, car il avait tout dépensé dans un atelier, et Pierre avait un billet. Dans un an, Louis avait un billet et Pierre en avait deux.

Un an plus tard Louis avait deux billets et Pierre quatre. Toujours Pierre avait doublé son capital d'autant de fois que Louis avait de billets.

Lorsque Louis avait quatre billets Pierre en avait 16 ; quand Louis en avait cinq, Pierre en avait 32, et lorsque Louis en avait neuf (quatre plus cinq) Pierre en avait 512 (égal à 16 fois 32). Donc, l'argent de Louis croît en s'ajoutant et celui de Pierre en se multipliant (fig. 81).

Eh bien ! le nombre de billets de Louis est le logarithme de celui des billets de Pierre. Lorsque Pierre a un billet, son logarithme (Billets de Louis) est zéro, et si l'on multiplie deux nombres des billets de Pierre, le logarithme du nombre obtenu (billets correspondants de Louis quand Pierre aurait ce nombre de billets) sera égal à la somme des logarithmes correspondants.

Généralement, les polaires et autres graphiques d'ailes sont limités aux angles d'incidence utilisés pratiquement dans l'aviation, mais il y a des cas (appareils à voilure tournante) dans lesquels il faut prolonger la polaire même jusqu'à tous les angles de 0° à 360°. C'est la polaire complète.

FIG. 80

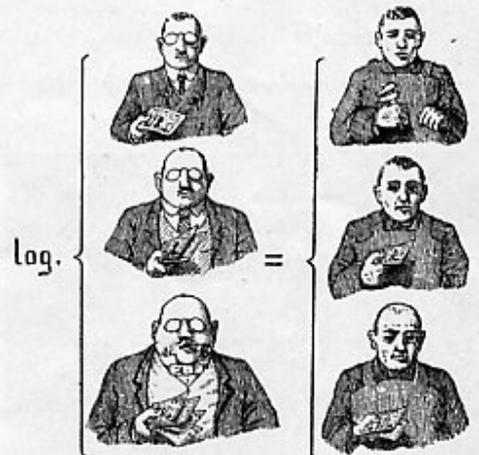
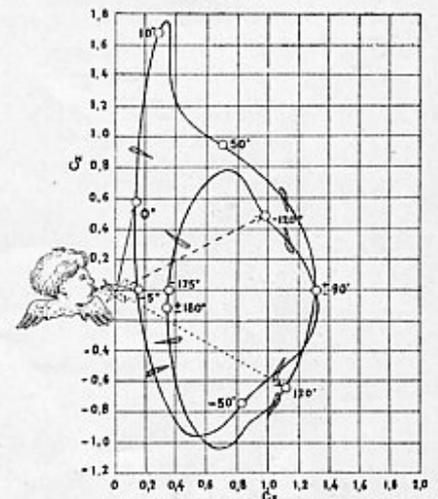
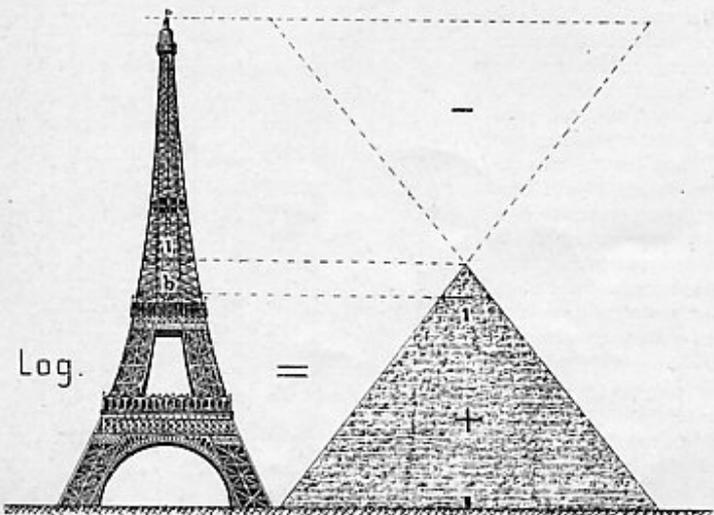


FIG. 81

L'emploi de l'échelle logarithmique au lieu de l'échelle naturelle, offre certains avantages pour les polaires. Dans l'échelle naturelle une longueur constante, chaque centimètre (p. e.), marque la croissance d'une unité de la quantité représentée, tandis que, dans l'échelle logarithmique, chaque centimètre marquerait (p. e.) la croissance de 10 pour cent de la quantité. Entre les nombres 10 et 11 de ces deux graduations, il y aurait un centimètre, mais entre les nombres 100 et 110 il y aurait 10 cm. dans la graduation naturelle et un dans la graduation logarithmique. La figure représente deux frères, Pierre et Louis, dont le premier place son argent (un billet) à intérêts composés et le second l'emploie à installer un atelier. Le premier Pierre, double son capital chaque fois que le second, Louis, épargne un billet. Le capital de Pierre a, en échelle logarithmique, la même représentation graphique que le capital de Louis en échelle naturelle. On peut dire que l'argent de Louis est le logarithme de l'argent de Pierre à chaque moment.

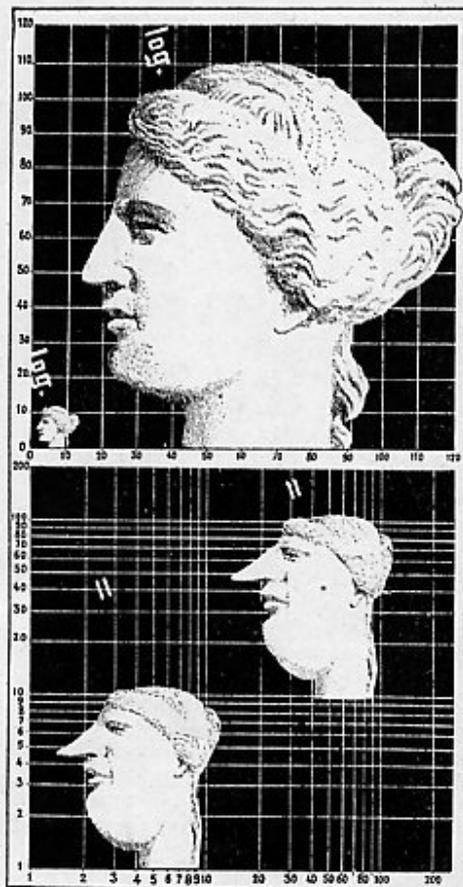
La largeur de la Tour Eiffel diminue de moitié et celle de la pyramide de Khéops de  $94'25'' (30\pi)$  m., pour chaque tranche de 60 m., de hauteur. La pyramide représente donc le logarithme de la Tour Eiffel, en rapport avec ses largeurs respectives à des hauteurs égales. Certainement, le Pharaon constructeur, sur les bords du Nil, de la Grande Pyramide, cette matérialisation en pierre de la valeur de  $\pi$  et des autres connaissances mathématiques et astronomiques de l'époque, ne soupçonnait pas qu'il bâtitait en même temps le logarithme d'un autre monument, en fer, cette fois, d'une hauteur double, qui serait dressé 56 siècles après, sur les bords de la Seine.

FIG. 82



Voici la Vénus de Milo dessinée en échelle naturelle, en deux grandeurs différentes et ses transformations à l'échelle logarithmique. La figure transformée est toujours la même, la différence de grandeur se traduisant uniquement par un transport de la figure vers le haut et la droite pour l'agrandissement et vers le bas et la gauche pour la diminution.

FIG. 85



(à gauche)

FIG. 84

Le poids supplémentaire qu'on peut ôter ou ajouter à un autre poids soutenu par un homme qui ne le voit pas, sans qu'il s'aperçoive du changement d'effort, est proportionnel au poids total soutenu, ce qui indique que les sensations sont les logarithmes des impressions (Loi de Weber).

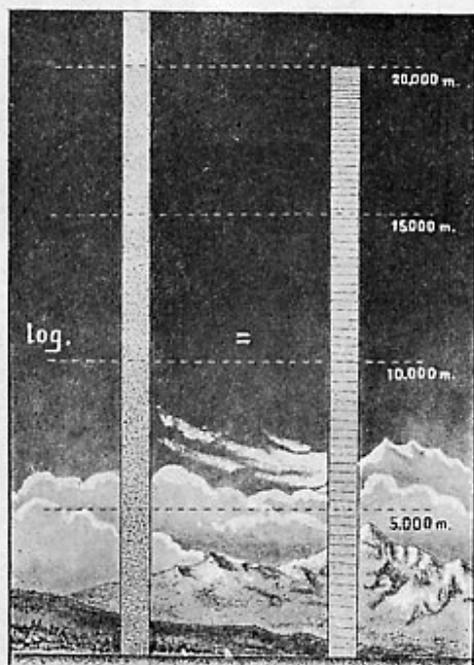


FIG. 83

La pression dans une colonne d'air diminue de moitié par tranche de 5,000 m. de hauteur et celle d'une colonne d'eau perd 5,000 tonnes par mètre carré pour chaque tranche de 5,000 m. de hauteur. Les pressions de la colonne d'eau sont donc les logarithmes de celles de la colonne d'air à la même hauteur.

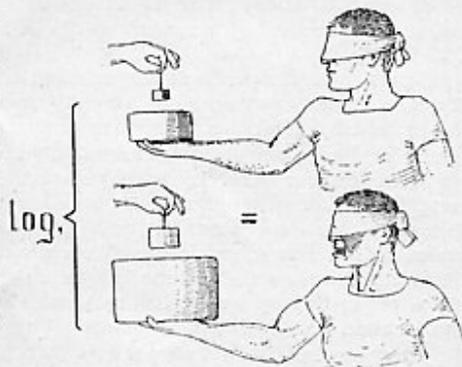
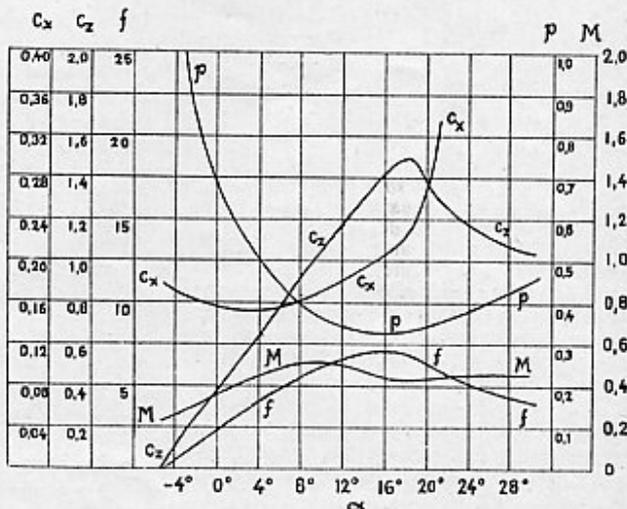


FIG. 87

Un autre procédé graphique de représentation des qualités d'un profil d'aile est de tracer les courbes correspondantes à la portance  $C_z$ , trainée  $C_x$ , finesse ou rendement  $f$  (rapport entre  $C_z$  et  $C_x$ ), position du centre des pressions  $p$  en pourcentage de profondeur de l'aile, et coefficient de moments  $C_m$  (produit de  $P$  par  $C_z$ ), chacun avec sa graduation différente sur des axes verticaux, pour chaque valeur de l'angle d'incidence représentées dans un axe horizontal. C'est le procédé employé dans les catalogues des profils d'ailes.



Maintenant on voit l'avantage de l'emploi des logarithmes lorsqu'il est nécessaire de faire des multiplications, parce que à ces opérations sont substituées des additions, et aux divisions sont substituées des soustractions.

Le nombre de billets de Pierre, lorsque Louis a son premier billet (nombre dont le logarithme est égal à 1) s'appelle *base* du système de logarithmes. Dans l'exemple que nous avons présenté, la base est 2. Les logarithmes employés généralement ont leur base égale à 10, mais on peut employer une base telle que le gain de Louis et de Pierre, au commencement, seraient égaux ; cela se produirait si, lorsque Louis a son premier billet, Pierre avait une quantité d'argent égale à 2,71828 fois la valeur d'un billet. Dans ce cas, les logarithmes s'appellent *naturels* ou *népériens*, dont la base, égale au numéro ci-dessus, est représentée par la lettre *e*.

On peut citer plusieurs autres cas de la vie courante, où les logarithmes peuvent être employés. Nous pouvons, par exemple (fig. 82) comparer la forme de la Tour Eiffel avec celle de la pyramide de Khéops (fig. 81). La première diminue sa section en réduisant son côté de la moitié tous les 60 mètres environ de hauteur (décroissement proportionnel constant) tandis que les côtés de la pyramide décroissent de 94 m. 25 (1) à chaque 60 mètres de hauteur (décroissement absolu constant). Les côtés de la grande pyramide seraient donc les logarithmes de ceux de la Tour Eiffel. Ces logarithmes seraient népériens, si à la hauteur du sommet de la première, la pente de la Tour Eiffel était égale à celle de la pyramide.

Une colonne d'air et une colonne d'eau ont des pressions à accroissements différents. Dans la première, la pression se réduit à la moitié tous les 5.000 mètres de hauteur (décroissement proportionnel constant) mais, pour la colonne d'eau la pression diminue de 5.000 tonnes au mètre carré, aussi pour chaque 5.000 mètres de hauteur (décroissement absolu constant). Les pressions dans la colonne d'eau sont les logarithmes de celles de la colonne d'air (fig. 83).

Un homme, sans possibilité de voir, soutient sur sa main un poids de un kilogramme (fig. 84). Si ce poids vient à être augmenté d'un autre poids supplémentaire moindre de 50 grammes, il ne s'aperçoit pas de l'accroissement de l'effort, mais il s'en apercevra si le poids ajouté est plus fort. Répétons la même expérience avec le même homme soutenant 5 kilos au lieu d'un kilogramme, et nous verrons que la limite des poids supplémentaires ajoutés, sans que l'homme s'en aperçoive, est aussi de cinq fois plus grande que dans le premier cas. Cela vous indique que les sensations croissent avec accroissements absolus égaux lorsque les impressions ont des accroissements proportionnels égaux, c'est-à-dire que *les sensations sont les logarithmes des impressions* (Loi de Weber).

Le service téléphonique est établi dans une

(1) 94 m. 25 est égal à 30 fois  $\pi$ . On sait que la pyramide de Khéops est une pétrification de la valeur de  $\pi$ , dont le périmètre de chaque section est égal à celui du cercle à rayon égal à la hauteur du sommet sur cette section.

ville. Le nombre des abonnés croît d'autant plus vite que l'utilité du service est plus grande, mais l'utilité est, à son tour, d'autant plus grande que les abonnés sont plus nombreux. Le temps écoulé depuis l'installation du service téléphonique serait donc le logarithme du nombre des abonnés.

De même, nous trouverions que le temps écoulé est le logarithme de la température d'un corps qui s'échauffe ou se refroidit, ou de la déformation d'un ressort sous l'action d'un poids, que l'épaisseur d'un verre est le logarithme de la quantité de lumière qui la

ment, parce que ces graphiques ne sont plus des polaires, les vecteurs partant de l'origine n'ayant aucune signification. D'ailleurs, il n'y a pas d'origine dans les échelles logarithmiques parce que le zéro est toujours placé à une distance infinie.

Finalement, il y a un autre procédé graphique de représentation des qualités des ailes, c'est l'ensemble des graphiques rectangulaires (fig. 87).

En prenant les différentes valeurs des angles d'incidence  $\alpha$  sur l'échelle naturelle de l'axe horizontal, on prend dans quelques

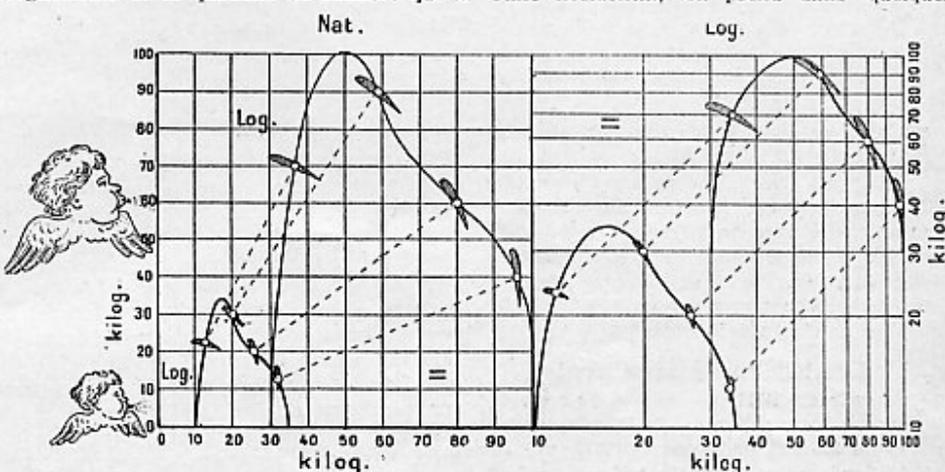


FIG. 86

Lorsqu'on fait la polaire d'une aile donnée pour obtenir les forces réelles de portance, traînée, etc., il faut multiplier les valeurs des coefficients de la polaire, par les valeurs : surface, carré de la vitesse, densité de l'air, etc., c'est-à-dire agrandir au diminuer la polaire des coefficients dans le rapport des unités choisies. Cette opération serait pénible à réaliser dans l'échelle naturelle, mais très facile dans l'échelle logarithmique, les changements de grandeurs se réduisant à un transport de la même

traverse, et, enfin, que le nombre de tirages où l'on joue est le logarithme de la chance d'avoir le gros prix à la Loterie Nationale.

L'emploi de l'échelle logarithmique dans les polaires d'ailes donnant les deux composantes  $c_x$  et  $c_z$  du coefficient aérodynamique est avantageux parce que, pour obtenir les forces de portance et de traînée il faut multiplier et diviser ces coefficients par les différentes quantités que nous avons signalées ci-dessus, et ces opérations se réduisent à des additions et des soustractions, c'est-à-dire à transporter vers le haut et vers la droite, ou vers le bas et vers la gauche, la courbe tracée sur le graphique rapportée à des axes gradués en kilogs, tout en lui conservant sa forme et sa grandeur (fig. 85 et 86).

Le graphique obtenu en employant les échelles logarithmiques, au lieu des échelles naturelles dans les polaires d'ailes, s'appelle *polaire logarithmique*, quoique impropre-

échelles verticales les autres données : portance, traînée, rendement ou finesse (portance sur traînée), position du centre des pressions mesurée par sa distance au bord d'attaque en pourcentage de la profondeur, moment de la portance (produit de cette force par sa distance au bord d'attaque), et autres qui pourraient être utiles dans certains cas. Toutes ces quantités sont réduites à leurs coefficients respectifs  $c_x$ ,  $c_z$ ,  $f$ ,  $p$ ,  $cM$ , qu'il faut multiplier par la surface, la densité massique de l'air, et le carré de la vitesse, dans les deux premiers, par ces quantités et la profondeur de l'aile pour le coefficient des moments  $cM$ , et par la profondeur seulement pour la position du centre des pressions  $p$ .

C'est ce système qui est employé dans les catalogues des profils d'ailes publiés par les laboratoires aérodynamiques.

Em. Herrera.

## VULGARISATION AÉRONAUTIQUE

La série de chapitres, dont le premier a paru dans l'*Aérophile* de juin-juillet et les suivants paraîtront dans les numéros successifs de l'*Aérophile*, jusqu'à former un résumé complet des connaissances actuelles concernant l'aviation à la portée de tous les lecteurs, sera la suivante :

1. Qu'est-ce que l'air ? (N° 6-7) ;
2. Qu'est-ce qu'un tourbillon ? (N° 8-9) ;
3. Qu'est-ce que la résistance de l'air ? (N° 10-11) ;
4. Qu'est-ce que la portance ? (N° 12) ;

5. Qu'est-ce qu'une aile ? (1-2-41) ;

6. Qu'est-ce qu'une polaire ? (3-41) ;

7. Qu'est-ce que l'induction aérodynamique ? ;

8. Qu'est-ce que le nombre de Reynolds ? ;

9. Qu'est-ce qu'une hélice ? ;

10. Qu'est-ce qu'un moulinet ? ;

11. Qu'est-ce qu'un aéronef ? ;

12. Qu'est-ce d'une cellule portante ? etc., etc...

N.-B. — Les numéros entre parenthèse indiquent le numéro correspondant de l'*Aérophile*.