

Titre : Les Nouvelles recherches expérimentales sur la résistance de l'air et l'aviation faites aux laboratoires du Champ de Mars et d'Auteuil

Auteur : Eiffel, Gustave

Mots-clés : Aérodynamique ; Tourbillons (mécanique des fluides)

Description : 1 vol. (37 p.) ; 29 cm

Adresse : Paris : [Société des ingénieurs civils de France], 1912

Cote de l'exemplaire : CNAM-BIB 8 Ca 440

URL permanente : <http://cnum.cnam.fr/redir?8CA440>

Sp. Ca 440

SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS CIVILS DE FRANCE

FONDÉE LE 4 MARS 1848

Reconnue d'utilité publique par décret du 22 décembre 1860

19, rue Blanche, PARIS

LES NOUVELLES RECHERCHES EXPÉRIMENTALES

SUR

LA RÉSISTANCE DE L'AIR ET L'AVIATION

FAITES

AUX LABORATOIRES DU CHAMP DE MARS ET D'AUTEUIL

PAR

M. G. EIFFEL

EXTRAIT DES MÉMOIRES DE LA SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS CIVILS DE FRANCE

(Bulletin de juillet 1912.)

1-2

PARIS

19, rue Blanche, 19

1912

Hommage de
G. Eiffel
SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS CIVILS DE FRANCE

FONDÉE LE 4 MARS 1848

Reconnue d'utilité publique par décret du 22 décembre 1860

19, rue Blanche, PARIS

LES NOUVELLES RECHERCHES EXPÉRIMENTALES

SUR

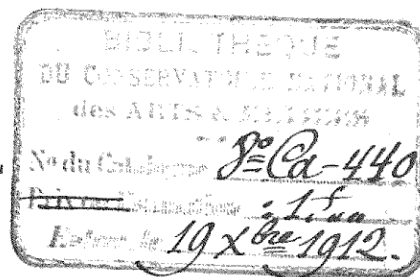
LA RÉSISTANCE DE L'AIR ET L'AVIATION

FAITES

AUX LABORATOIRES DU CHAMP DE MARS ET D'AUTEUIL

PAR

M. G. EIFFEL



EXTRAIT DES MÉMOIRES DE LA SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS CIVILS DE FRANCE

(Bulletin de juillet 1912.)

PARIS

19, rue Blanche, 19

1912

LES NOUVELLES RECHERCHES EXPÉRIMENTALES
SUR
LA RÉSISTANCE DE L'AIR ET L'AVIATION

FAITES
AUX LABORATOIRES DU CHAMP DE MARS ET D'AUTEUIL ⁽¹⁾

PAR
M. G. EIFFEL

Dans mon mémoire de mars 1911, j'avais promis de faire connaître à la Société les recherches nouvelles que j'allais entreprendre, soit comme mesures de résistance sur les divers éléments d'un aéroplane, soit comme étude méthodique des hélices. C'est l'objet du présent Mémoire : je décrirai aussi l'installation du nouveau laboratoire aérodynamique que je viens de terminer à Auteuil et qui remplace, avec plus d'ampleur, celui que j'avais organisé au Champ de Mars.

Je commencerai par des observations sur les hélices propulsives, quoique leur étude ne soit qu'ébauchée : en effet, en raison des très grandes vitesses que j'ai reconnu nécessaire de donner aux modèles essayés, 3 000 à 4 000 tours, ainsi que de l'augmentation de vitesse du courant d'air par lequel le modèle était frappé, et que je voulais porter de 15 à 30 m/s, j'ai dû attendre la construction de mon nouveau laboratoire. Je suis déjà, néanmoins, arrivé à certains résultats intéressants que je vais résumer aussi rapidement que possible.

I. — Hélices propulsives.

Nous faisons tourner, à l'aide d'un moteur électrique, des modèles réduits d'hélices au sein d'un courant d'air régulier

(1) Voir Procès-verbal de la séance du 17 mai 1912, page 641.

animé d'une vitesse déterminée. Le principe du mouvement relatif ne permet pas de douter que les choses se passent comme si c'était l'hélice elle-même qui se déplaçait dans l'air calme. Avec ce procédé, on a toutes facilités pour déterminer la vitesse du courant d'air, le nombre de tours de l'hélice, la poussée et le couple résistant, c'est-à-dire tous les éléments du fonctionnement de cette hélice.

L'appareil qui a servi à ces mesures au Laboratoire du Champ de Mars se compose essentiellement d'un moteur électrique de 2 ch dont l'arbre horizontal porte l'hélice. Cet ensemble repose sur deux couteaux disposés parallèlement à l'arbre et suspendus par des fils à des points fixes ; le déplacement horizontal que tend à lui donner l'hélice est empêché par une tige reliée au bras vertical de notre balance aérodynamique, ce qui permet de mesurer la poussée. Le couple résistant produit une inclinaison du système autour de l'axe des couteaux et se mesure à l'aide d'une aiguille mobile devant une échelle courbe préalablement tarée à l'aide de poids. Le nombre de tours est donné par un indicateur de vitesse instantanée. La vitesse du courant d'air est, suivant notre habitude, mesurée par un tube de Pitot. Cette vitesse a varié entre 5 et 18 m/s, et pour chacune des vitesses essayées on a fait tourner la dynamo à des nombres de tours compris entre 400 et 1 600.

Pour représenter les résultats, nous employons, depuis janvier 1911, la méthode suivante, qui permet, en principe, de représenter par deux courbes tout le fonctionnement de l'hélice et même de toutes les hélices de forme géométriquement semblable. On sait que le plus souvent on portait en abscisses la vitesse de translation, et en ordonnées soit la puissance, soit la poussée, et cela pour chaque nombre de tours réalisés dans l'essai, ce qui donnait lieu pour une seule hélice à une nombreuse série de courbes ; tandis que par la méthode que nous avons proposée, on remplace par deux courbes, au moins en principe, toute cette série de diagrammes. Cela réalise une simplification considérable qui rendra, je crois, de grands services à ceux qui s'occupent de la question des hélices et qui semblent maintenant l'avoir adoptée.

En admettant, par analogie avec les surfaces fixes, que les efforts exercés par l'air sur un élément d'hélice sont proportionnels à la surface de cet élément et au carré de la vitesse relative, on est conduit aux formules que nous allons établir.

Considérons (*fig. 4*) une hélice ayant pour diamètre l'unité de longueur et possédant la vitesse V parallèle à son axe. Si, pour l'extrémité de la pale, les vitesses de rotation et de translation

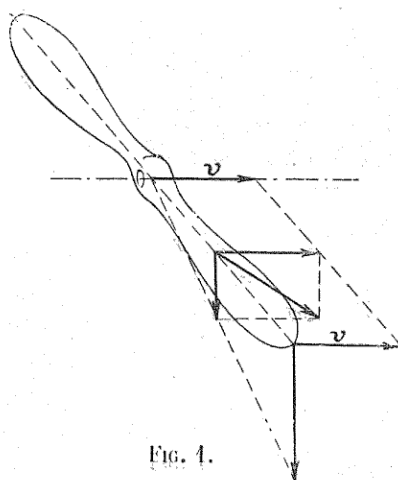


Fig. 4.

varient en restant proportionnelles, la figure montre que pour un point quelconque la vitesse relative, qui est la résultante des deux vitesses varie dans la même proportion, et que sa direction ne change pas. Autrement dit, pour une même direction de la vitesse relative à l'extrémité de la pale, la vitesse relative à un point quelconque de l'hélice est invariable en direction et son intensité est proportionnelle à V . Dans ces conditions, les efforts sur la

pale ont une résultante fixe en position et en direction et d'intensité φ proportionnelle à V^2 .

$$\varphi = AV^2.$$

Dans une hélice géométriquement semblable, de diamètre D , et dont les vitesses à l'extrémité de la pale ont encore le même rapport, la résultante sera placée sur la droite homologue et son intensité Φ sera multipliée par le rapport des surfaces, soit $\frac{D^2}{1}$:

$$\Phi = AV^2D^2,$$

expression dans laquelle A est un coefficient ne dépendant que de la direction de la vitesse relative à l'extrémité des hélices, c'est-à-dire du rapport de la vitesse de translation, à la vitesse périphérique, soit de $\frac{V}{\pi nD}$ ou $\frac{V}{nD}$, n étant le nombre de tours par seconde. On a donc :

$$\Phi = V^2D^2 \left(\frac{V}{nD} \right)^4$$

ce qui, comme $V = \frac{V}{nD} \times nD$, peut s'écrire

$$\Phi = n^2 D^4 f' \left(\frac{V}{nD} \right).$$

De là on déduit toutes les formules fondamentales.

1° L'intensité Φ projetée sur l'axe horizontal donne la poussée, dont la formule est

$$F = n^2 D^4 f \left(\frac{V}{nD} \right);$$

2° Les composantes perpendiculaires à l'axe donnent un couple dont le moment C est proportionnel à ces composantes et à leur distance de l'axe, c'est-à-dire au diamètre de l'hélice

$$C = n^2 D^5 f_2 \left(\frac{V}{nD} \right);$$

3° La puissance utile est le produit de la poussée par la vitesse

$$P_u = n^3 D^5 f_3 \left(\frac{V}{nD} \right);$$

4° La puissance motrice est le produit du couple par la vitesse angulaire $2\pi n$

$$P_m = 2\pi n^3 D^5 f_2 \left(\frac{V}{nD} \right);$$

5° Enfin, le rendement est le rapport entre P_u et P_m

$$\rho = f_4 \left(\frac{V}{nD} \right).$$

Ces cinq quantités $\frac{F}{n^2 D^4}$, $\frac{C}{n^2 D^5}$, $\frac{P_u}{n^3 D^5}$, $\frac{P_m}{n^3 D^5}$, ρ , pour une hélice donnée ou même pour une hélice semblable à un type donné, ne dépendent donc que de $\frac{V}{nD}$, de sorte qu'en prenant ces $\frac{V}{nD}$ comme abscisses et ces cinq quantités comme ordonnées, les cinq courbes correspondantes représentent tout le fonctionnement de l'hélice ou du groupe d'hélices.

Il suffirait d'ailleurs de la première et de la seconde de ces courbes, donnant la poussée et le couple, ou bien de la première

et de la quatrième, donnant la poussée et la puissance motrice, etc., puisque les autres courbes s'en déduisent (1).

Ainsi, cinq courbes, qui peuvent d'ailleurs se réduire à deux d'entre elles, figurent tout le fonctionnement de l'hélice ou du groupe d'hélices.

Mais, dans la réalité, les choses se passent moins simplement, et voici ce que je disais à ce sujet dans une récente publication.

Les travaux antérieurs supposaient, comme les formules que nous venons d'exposer, la proportionnalité de l'effort de l'air à la surface et au carré de la vitesse relative de la pale et du vent. Nous nous sommes vite aperçus que quand la vitesse éprouvait des changements notables, on ne pouvait plus considérer les points obtenus comme placés sur une seule courbe. En faisant alors varier la vitesse dans de plus larges limites, nous avons vérifié qu'il faut une courbe pour chaque vitesse relative ou pour chaque vitesse de rotation de l'hélice. Les diverses courbes, il est vrai, sont souvent voisines. On peut affirmer, cependant, que pour une même hélice les quantités telles que $\frac{F}{n^2 D^4}$ ne dépendent pas uniquement du rapport $\frac{V}{nD}$.

D'autre part, nous avons prié le commandant Dorand de nous donner les modèles de plusieurs hélices qu'il avait essayées. Les expériences faites avec ces modèles nous ont fourni, sur nos diagrammes, des courbes très différentes de celles des expériences de Chalais. Cela montre que, pour deux hélices semblables de diamètres différents, à une même valeur du rapport $\frac{V}{nD}$ peut ne pas correspondre une même valeur de $\frac{F}{n^2 D^4}$, etc.

Les remarques suivantes nous ont conduit à l'explication de ces anomalies.

La vitesse relative de la pale et de l'air est très grande dans une hélice, de façon qu'il n'est pas possible d'admettre l'exacte proportionnalité au carré de la vitesse. Cela suffirait à expliquer que nous ayons obtenu plusieurs courbes pour un même modèle,

(1) Les coefficients $\frac{F}{n^2 D^4}$ et $\frac{C}{n^2 D^5}$ de poussée unitaire et de couple unitaire sont les analogues des coefficients K_x et K_y étudiés pour les plaques; quant à la variable $\frac{V}{nD}$ qui définit l'inclinaison de la vitesse résultante des divers éléments de l'hélice, elle correspond à la variable i déterminant pour les plaques l'inclinaison sur le vent.

car pour trouver une seule courbe, il aurait fallu que la résistance fût proportionnelle au carré de la vitesse. Cela peut expliquer aussi les différences entre les résultats trouvés pour les modèles et pour les grandes hélices, qui avaient été essayées à une vitesse relative plus grande. Le sens des écarts était d'ailleurs celui qu'on pouvait prévoir en observant que la résistance, aux grandes vitesses, croît plus vite que le carré de la vitesse : on trouvait, en effet, des $\frac{F}{n^2 D^4}$ et $\frac{C}{n^2 D^5}$ plus grands aux grandes vitesses qu'aux petites, et plus grands avec la grande hélice qu'avec la petite (1). De plus, le rendement des modèles était moindre que celui des grandes hélices : ce fait peut être attribué à ce que le rapport $\frac{R_x}{R_y}$ des composantes de la réaction de l'air sur la pale diminuerait à mesure que la vitesse croît, comme nous l'avons observé notamment dans l'étude du monoplan Nieuport.

Mais l'écart avec la loi du carré de la vitesse n'est pas la seule cause de perturbation : sous l'action de la force centrifuge, l'aile subit des déformations dont l'effet est probablement sensible aux faibles incidences. Cette action est d'autant plus difficile à prévoir avec quelque précision qu'il faudrait tenir compte aussi de la déformation causée par l'effort de l'air.

Ces effets perturbateurs, loin de rendre douteux ou illusoire les essais sur les modèles, ne font qu'augmenter l'utilité de ces essais. Si, en effet, on s'arrange pour que les vitesses relatives de la pale et de l'air soient identiques, non seulement en direction, mais en intensité, pour le modèle et pour l'hélice, c'est-à-dire, par exemple, si l'on fait tourner à 3 000 tours le modèle au tiers d'une hélice tournant à 1 000 tours, il arrivera : 1° que les vitesses relatives étant les mêmes, l'écart avec la loi du carré de la vitesse sera le même aussi, et que les pressions de l'air seront sensiblement les mêmes en deux points homologues de la surface des deux hélices ; 2° que les efforts dus à la force centrifuge seront les mêmes en deux points homologues des deux hélices ; qu'en conséquence, et pourvu que les deux hélices soient formées d'une même matière, les allongements unitaires seront les mêmes pour deux éléments homologues, c'est-à-dire que les déformations de l'hélice et de son modèle seront géomé-

(1) Ce résultat n'est pas absolu, car pour certaines hélices les courbes des diagrammes se croisent. La question est donc très complexe.

métriquement semblables, ou enfin que les deux hélices ne cesseront pas, pendant la déformation, d'être géométriquement semblables. M. le commandant Dorand, dans un plus récent travail, vient d'arriver à la même conclusion.

En définitive, les courbes $\frac{F}{n^2 D^4}$, etc., en fonction de $\frac{V}{nD}$, obtenues avec un modèle, doivent s'appliquer à l'hélice en grandeur si les vitesses relatives de la pale et de l'air sont les mêmes.

Pour nous permettre de le vérifier, M. Drzewiecki a eu l'obligeance de faire construire une grande hélice et sa réduction au tiers, dans de telles proportions que l'essai pût être fait avec les mêmes vitesses du vent et de la pale, à notre Laboratoire pour le modèle et à Chalais pour l'hélice (1).

Les résultats sont représentés dans la figure 2, qui donne en même temps un exemple de notre mode de représentation. Nous avons porté sur chaque courbe la valeur nD correspondante, de manière que les diagrammes puissent s'appliquer, avec toutes leurs indications, à toutes les hélices géométriquement semblables et de diamètres différents.

On voit par ces diagrammes, dans la région correspondant aux bons rendements, c'est-à-dire aux conditions normales de fonctionnement, qu'à une même valeur de $\frac{V}{nD}$ correspondent des valeurs très sensiblement différentes de $\frac{F}{n^2 D^4}$, $\frac{C}{n^2 D^5}$, etc., ce qui met en défaut les formules que j'énonçais tout à l'heure. Comme dans nos essais la vitesse relative de l'air atteignait déjà 80 m/s pour 1 600 t/m, et comme dans la pratique on rencontre des vitesses de l'ordre de 150 m/s, l'écart avec la loi du carré suffit probablement à expliquer ces différences.

Mais ces diagrammes montrent aussi que les courbes du modèle sont peu différentes de celles de la grande hélice, quand

(1) L'hélice avait 2,715 m de diamètre ; elle a été essayée à 540 tours par minute. Le modèle avait pour diamètre 0,905 m, c'est-à-dire qu'il était à l'échelle du tiers ; le nombre de tours pour la comparaison a été de 1 600, soit trois fois plus grand. La valeur de nd était alors de $2,715 \times \frac{540}{60} = 24,4$ pour la grande hélice et de $0,905 \times \frac{1 600}{600} = 24,1$ pour le modèle. Ces valeurs, multipliées par π , sont les vitesses circonférentielles en mètres par seconde : 77 et 76 mètres. Dans les autres essais, le nombre de tours du modèle a été de 600, 942 et 1 260 par minute.

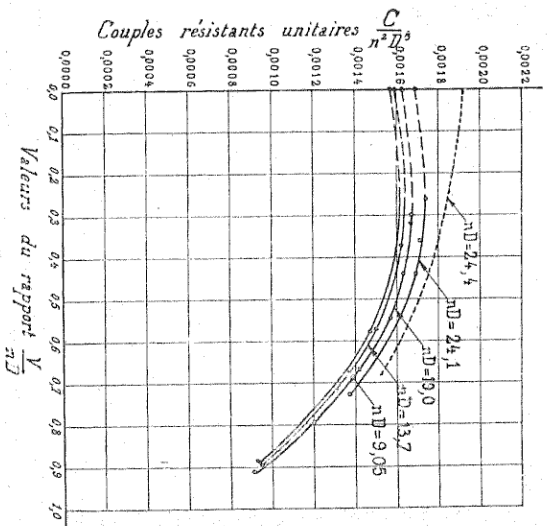
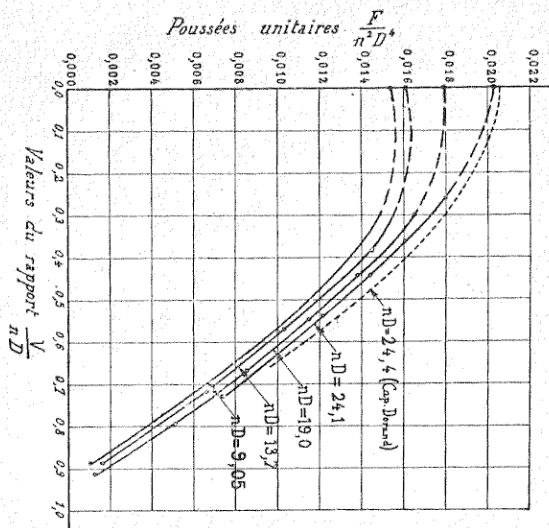
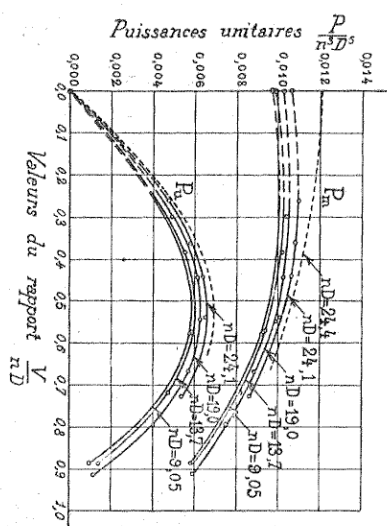
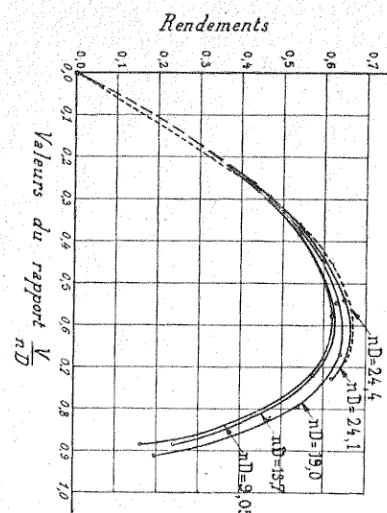


Fig. 2. — Diagramme de l'hélice « Normale » de 2,715 m de diamètre (trait pointillé) et de son modèle au tiers (trait plein).

les produits nD sont les mêmes, c'est-à-dire quand les vitesses relatives sont les mêmes (1).

Cette confirmation de nos prévisions nous permet de conclure que :

1° La résistance des hélices ne peut pas être regardée comme exactement proportionnelle au carré de la vitesse relative. Les diagrammes représentant $\frac{F}{n^2 D^4}$, etc., en fonction de $\frac{V}{nD}$, doivent généralement comporter plusieurs courbes : nous pensons que, malgré cela, ils sont encore très utiles : ils remplacent en effet toute une série d'autres diagrammes, puis leurs courbes sont le plus souvent voisines, et enfin ils mettent en évidence l'effet des perturbations dues aux deux causes que nous avons indiquées ;

2° De l'étude d'un modèle d'hélice on peut déduire tout le fonctionnement de l'hélice elle-même. La seule condition à remplir est de réaliser, dans l'essai du modèle, la même vitesse relative, en grandeur et direction, que celle à laquelle est soumise l'hélice réelle, ce qui conduit, comme nous l'avons dit, à prendre pour les essais la même vitesse de vent V et des vitesses de rotation inversement proportionnelles aux diamètres de l'hélice et du modèle.

C'est pour cette raison que dans mon nouveau laboratoire, où la vitesse du vent atteint 144 km, j'ai fait construire un nouvel appareil permettant de donner aux hélices des vitesses de rotation dépassant 4 000 tours.

Ce nouvel appareil (*fig. 3*) est établi sur un autre principe que le premier. Car la puissance absorbée par l'hélice étant de 12 à 15 ch, au lieu de 2 seulement, la dynamo placée derrière l'hélice aurait été, au point de vue de l'écoulement de l'air, d'un encombrement beaucoup trop fort. Aussi l'arbre reliant la dynamo a-t-il été coudé à angle droit, de telle manière que la dynamo, complètement en dehors du courant, a pu être placée sur le chariot à côté de la balance aérodynamique. L'ensemble formé par la dynamo, la transmission coudée et l'hélice repose sur le

(1) On voit sur ces diagrammes de grandes différences au point fixe, ce qui est contraire aux formules du colonel Renard, généralement admises. Aussi ai-je fait faire, pour le vérifier, des essais au Conservatoire des Arts et Métiers et à l'établissement de Chalais-Meudon, avec mes modèles en bois et en aluminium : les mêmes différences ont été retrouvées. Je dois ajouter qu'elles sont peu sensibles avec des hélices du type adopté par le commandant Dorand. Ces divergences, qui montrent combien est difficile l'étude générale du problème, n'ont pas lieu de nous préoccuper, car les essais au point fixe ne donnant aucune indication sur le fonctionnement normal de l'hélice, présentent peu d'intérêt.

chariot par une suspension à la Cardan, et se trouve maintenu dans une position invariable par deux butées en forme de pointes, qui sont fixées à la dynamo et qui appuient sur les couvercles de deux boîtes de pression. L'une de ces boîtes empêche l'hélice de

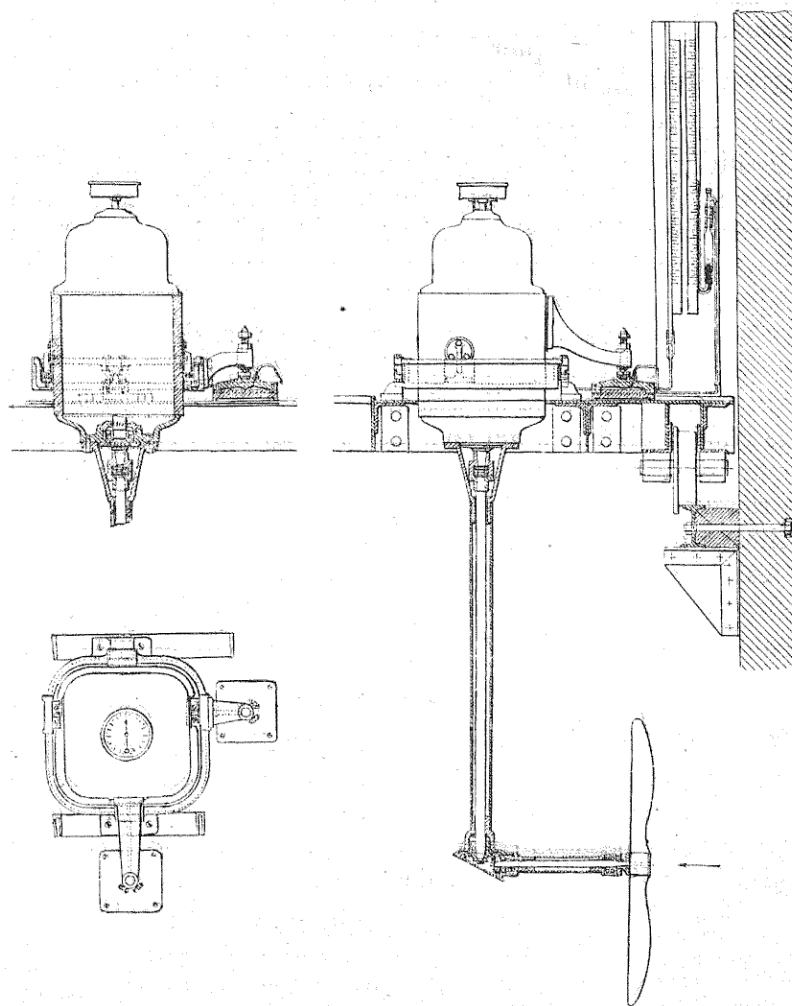


FIG. 3. — Appareil pour l'essai des hélices, au Laboratoire d'Auteuil.

se déplacer parallèlement au vent, l'autre l'empêche de se déplacer dans un sens perpendiculaire. La première s'oppose donc à la poussée de l'hélice, la seconde au couple résistant, de manière que les pressions des boîtes, transmises à des manomètres, sont

proportionnelles, l'une à la poussée, l'autre au couple de l'hélice.

Nous allons aborder ces études, qui, en raison de la grande vitesse de rotation nécessaire, de l'équilibrage rigoureux qu'il faudra réaliser, et des ruptures possibles d'hélices, ne sont pas sans difficulté pratique, ni même sans danger. Je serais heureux d'apporter une contribution à l'étude d'un problème que des savants et des praticiens de premier ordre étudient en ce moment, sans arriver à des résultats généraux bien positifs.

II. — Essais divers au Laboratoire du Champ-de-Mars.

J'arrive à des recherches sur la résistance des surfaces, que j'avais effectuées au Laboratoire du Champ-de-Mars, et qui ne figuraient pas dans mon mémoire précédent. J'en parlerai très brièvement.

POLAIRES DES PLAQUES DE DIFFÉRENTS ALLONGEMENTS.

Dans ce mémoire, j'ai donné la loi de variation des efforts totaux sur des plaques planes ou sur des plaques courbes de flèche $\frac{1}{13,5}$, suivant les différents allongements de ces plaques ; à ces diagrammes étaient jointes les positions des centres de poussée. Je complète cette étude par un diagramme d'ensemble représentant les polaires de ces plaques, ainsi que les polaires de plaques de flèche $\frac{1}{7}$ (*fig. 4*). Je rappellerai que ces polaires représentent, par une seule et même courbe, la composante horizontale, la composante verticale, la résultante, l'angle de cette résultante avec la verticale, et enfin l'inclinaison correspondante de la plaque.

L'examen détaillé de ces diagrammes serait extrêmement intéressant, parce qu'ils résument les lois de résistance des plaques, suivant leurs courbures et suivant leurs allongements.

INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DE L'AILE.

Pour une même ligne moyenne, les ailes minces sont plus avantageuses que les ailes de forte épaisseur. Notre aile n° 8

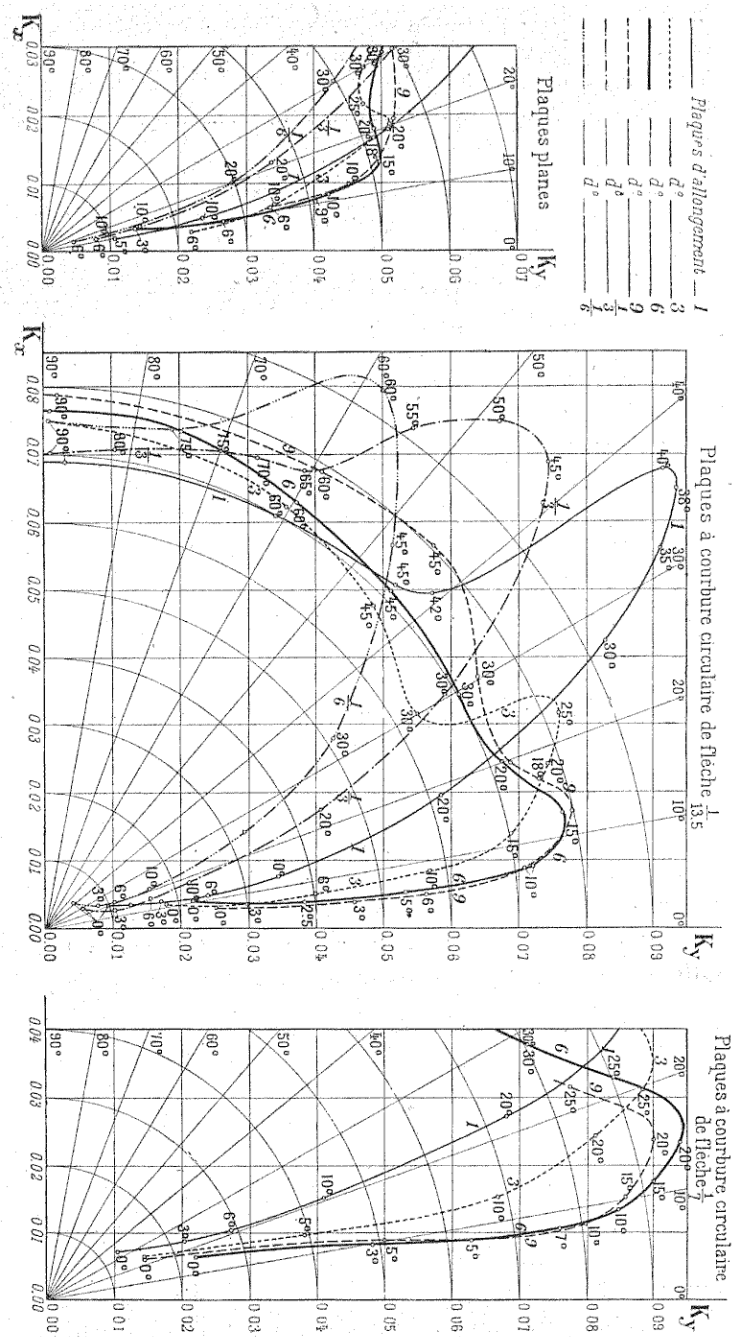


Fig. 4. — Polaires de plaques planes et courbes de différents allongements.

en croissant, que nous considérons comme la meilleure de celles que nous avons expérimentées, et dont l'épaisseur est le $\frac{1}{15}$ de la corde, est meilleure que les ailes de même ligne moyenne et d'épaisseur plus forte : pour une bonne sustentation, 0,06 par exemple, c'est celle qui donne la plus faible résistance à l'avancement.

AILES DONT L'INCIDENCE VARIE DEPUIS LE MILIEU JUSQU' AUX BORDS LATÉRAUX.

Les ailes dans lesquelles l'inclinaison de la corde des différentes tranches varie régulièrement depuis le milieu de l'aile jusqu'aux bords latéraux, comme dans les ailes déployées des mouettes par exemple, présentent une particularité très intéressante : leur centre de pression subit très peu de déplacement quand l'incidence varie, ce qui est favorable à la stabilité.

En effet, en raison de la marche particulière du centre de poussée sur les surfaces courbes, si pour certaines tranches ce centre tend à se rapprocher du bord d'attaque lorsque l'orientation de l'aile varie, pour d'autres, différemment inclinées, il peut tendre à se rapprocher du bord de sortie. Le centre de poussée de l'ensemble se déplace en somme moins que si les centres de poussée sur les tranches élémentaires de l'aile se déplaçaient tous dans le même sens, comme cela se produit sur les ailes ordinaires.

Par contre, le même raisonnement montre qu'il faut s'attendre à ce que ces ailes soient moins avantageuses au point de vue des K_x et des K_y que les ailes ordinaires, parce que, si une tranche est dans une inclinaison telle qu'elle soit dans la position la plus favorable, les tranches voisines ne le sont pas.

M. Robert Mallet nous a proposé l'essai de deux de ces ailes, qui ont donné le résultat qu'on en attendait.

BIPLANS DÉCALÉS.

Ce système de construction, dans lequel les surfaces ne se recouvrent pas entièrement, nous a paru intéressant, en raison de la diminution qu'il peut donner à la fâcheuse influence mutuelle des deux ailes. Nos premières mesures semblent

démontrer qu'il est indifférent de décaler ou non les ailes de l'une par rapport à l'autre. Il y a surtout intérêt à leur donner un grand écartement (1).

ESSAIS DE MODÈLES D'AÉROPLANES.

Divers modèles ont été étudiés, notamment les monoplans Nieuport et Balsan, la torpille Paulhan-Tatin et le biplan militaire Maurice Farman. Nous en avons déduit les caractéristiques de ces appareils.

III. — Laboratoire d'Auteuil.

J'ai tout lieu d'être satisfait des résultats que nous a fournis le laboratoire du Champ-de-Mars. On me permettra, en effet, d'ajouter que beaucoup d'entre eux sont devenus classiques et ont été enseignés dans les cours de M. Marchis à la Sorbonne, du Colonel Espitallier à l'École Supérieure d'Aéronautique et à l'École spéciale de Travaux Publics, du Commandant Paul Renard, également professeur d'aérodynamique générale à l'École Supérieure d'Aéronautique, sans compter même plusieurs cours de lycées dont de jeunes élèves m'ont rapporté l'écho. Je suis aussi très heureux de voir que dans les ouvrages les plus récents et les plus pratiques, ce sont les diagrammes d'ailes que j'ai donnés qui servent de base à l'étude de la construction et du fonctionnement des aéroplanes.

Mais je souffrais de voir notre vitesse limitée à 48 m, soit 63 km à l'heure, quand les vitesses réellement atteintes en aviation dépassent de beaucoup ce chiffre. En outre, notre diamètre de buse de 1,50 m nous conduisait à des dimensions de modèles un peu faibles.

Aussi, quand les circonstances m'obligèrent à quitter le terrain que j'occupais au Champ-de-Mars, je me décidai à poursuivre mes recherches, pour la continuation desquelles je recevais de nombreux encouragements, en me réinstallant avec plus d'ampleur.

(1) Nous ne parlons ici que des ailes isolées l'une de l'autre. Pour les ailes réunies par des montants et des entretoises, nous réservons notre opinion jusqu'à de plus amples essais.

Au Champ-de-Mars, notre buse de 1,50 m débitait 31 m³ à la vitesse de 18 m/s en employant une puissance de 50 ch. Notre programme était de porter la buse à 2 m et la vitesse du courant à au moins 30 m/s, soit environ 110 km/h, ce qui est une bonne vitesse ordinaire d'un aéroplane. Mais quelle puissance était nécessaire pour la réaliser ? Si l'on ne faisait que reproduire l'installation du Champ-de-Mars, en augmentant simplement ses dimensions, on se heurtait de suite à une quasi-impossibilité. On sait, en effet, que la puissance augmente comme le produit de la surface de la buse par le cube de la vitesse : ces produits respectifs sont représentés au Champ-de-Mars par :

$$1,50^2 \times 18^3 = 13,122,$$

et dans l'installation projetée par

$$2^2 \times 30^3 = 108,000.$$

Le rapport de ces chiffres étant de 8,30, la nouvelle puissance serait de 50 ch \times 8,30, soit environ 400 ch. Cela représentait

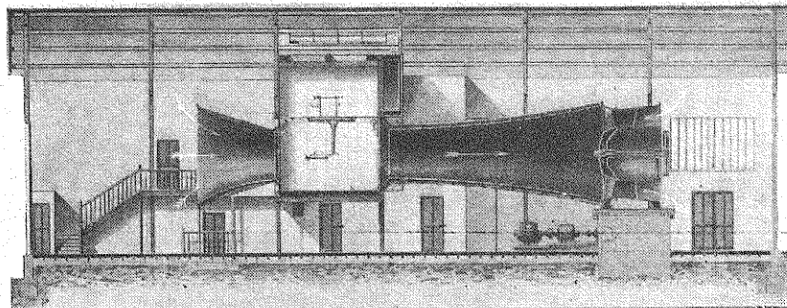


FIG. 5. — Coupe longitudinale, dans l'axe de la grande buse, du Laboratoire d'Auteuil.

une dépense considérable, non seulement d'installation, mais encore de fonctionnement.

L'emploi d'un long ajutage divergent intercalé entre la chambre d'expérience et le ventilateur (*fig. 5*), vint nous tirer d'affaire.

L'air du hall appelé par le ventilateur afflue dans l'ajutage d'entrée convergent que nous appelons le *collecteur*; la section allant progressivement en diminuant, il pénètre dans la chambre avec sa vitesse maximum obtenue aux dépens de sa pression, et il règne dans toute la chambre une dépression par laquelle on

peut mesurer la vitesse même de l'air qui la traverse. Quand cet air a frappé le modèle en essai, il pénètre dans un long ajutage postérieur divergent formant *diffuseur*, qui l'amène au ventilateur en diminuant progressivement sa vitesse et, par contre, en récupérant une partie de sa pression primitive. Cet ajutage est, en effet, un véritable récupérateur du travail absorbé par le passage de l'air dans le collecteur. On diminue ainsi, dans une très forte proportion, le travail du ventilateur pour ramener l'air

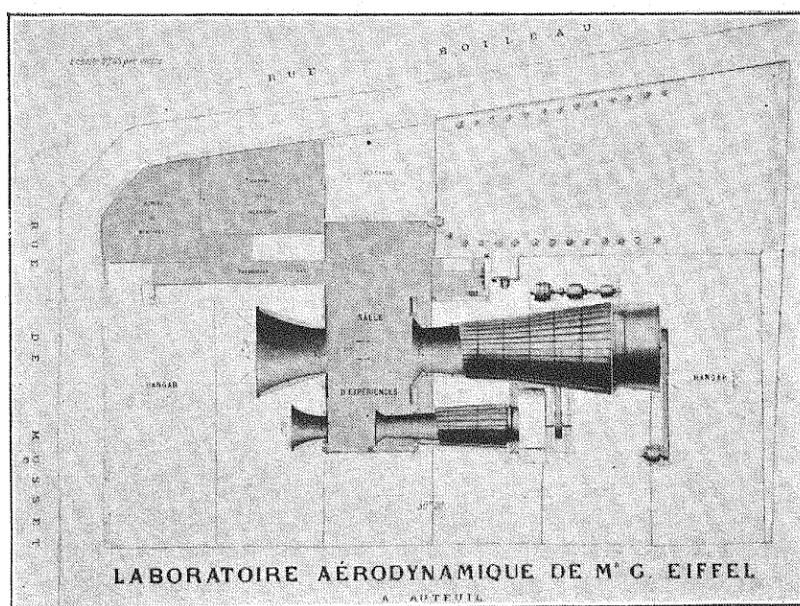


FIG. 6. — Plan général du Laboratoire.

à la pression atmosphérique. Au sortir du ventilateur, l'air revient par un courant continu dans le hall jusqu'au collecteur pour être utilisé de nouveau.

En outre, au lieu d'un ventilateur à force centrifuge, qui ne convient pas à un grand débit, nous avons pris un ventilateur hélicoïdal à grand diamètre, débouchant directement dans la halle, et dont le rendement dans ces conditions atteint 50 0/0.

Des essais préliminaires, faits avec un petit modèle, nous ayant montré les avantages de cette disposition, nous avons réalisé l'installation actuelle, dans laquelle le cône collecteur a comme diamètres extrêmes 4 et 2 m avec une longueur de 3,30 m; le diffuseur, d'une longueur de 9 m, aboutit à la couronne d'un

ventilateur hélicoïdal de 4 m de diamètre, offrant à l'écoulement de l'air une section utile de 9 m².

Le résultat est que, avec la buse de 2 m, nous avons facilement obtenu dans la chambre d'expérience une vitesse régulière que nous pouvons faire varier de 2 à 32 m, tout en n'utilisant qu'une puissance nominale de 50 ch, au lieu des 400 ch que l'on pouvait envisager au premier abord. C'est là un résultat dont on appréciera l'importance pratique.

Une installation analogue est établie à côté de la première

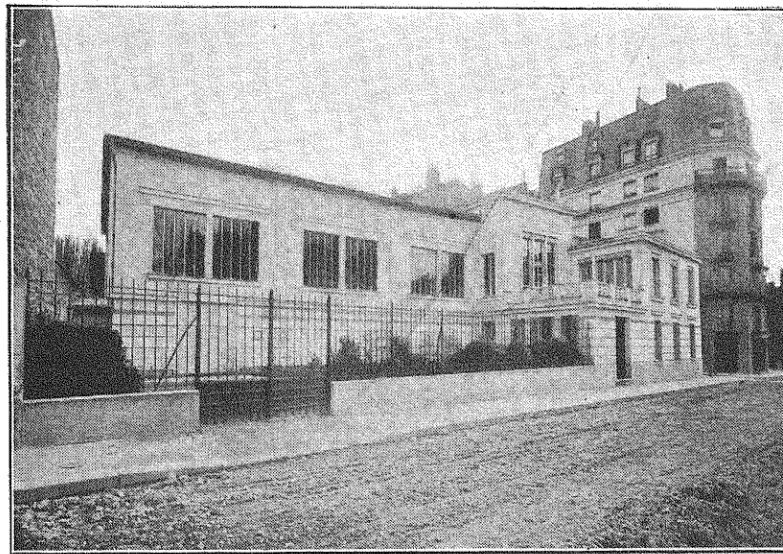


FIG. 7. — Vue du Laboratoire rue Boileau.

(fig. 6). Une colonne d'air de 1 m de diamètre traverse la chambre avec une vitesse de 40 m par seconde, soit 144 km à l'heure. Le collecteur, de 1,63 m de longueur, a pour diamètres extrêmes 2 m et 1 m. Le diffuseur a une longueur de 6 m. Il aboutit au ventilateur centrifuge type *Sirocco* (le même qu'au Champ-de-Mars), dont la couronne mobile a 1,67 m de diamètre et qui est actionné, comme l'autre, par un moteur de 50 ch. L'effet utile obtenu par la nouvelle disposition est environ cinq fois plus grand qu'au Champ-de-Mars.

Cette double installation est placée à l'intérieur d'une halle de 30 m de longueur sur 13 m de largeur et 10 m de hauteur totale. La force motrice est fournie par le courant monophasé du

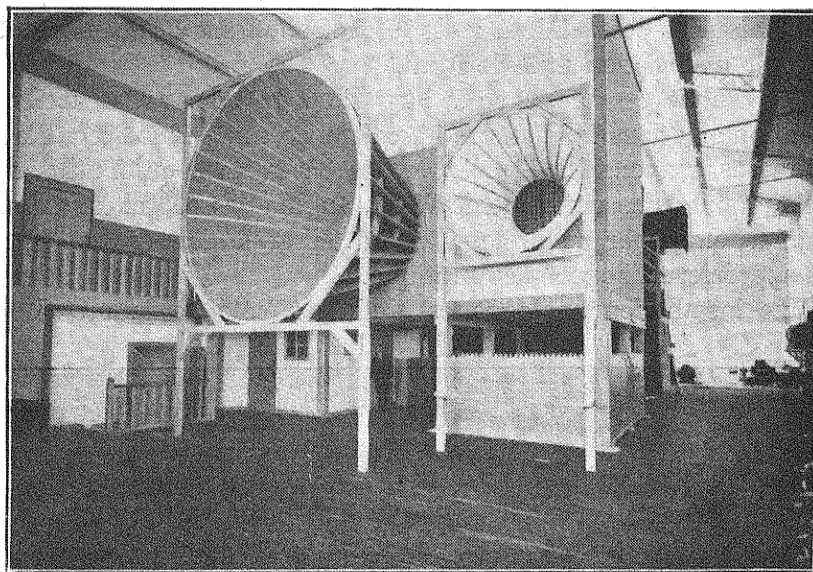


FIG. 8. — Le hangar et les collecteurs.

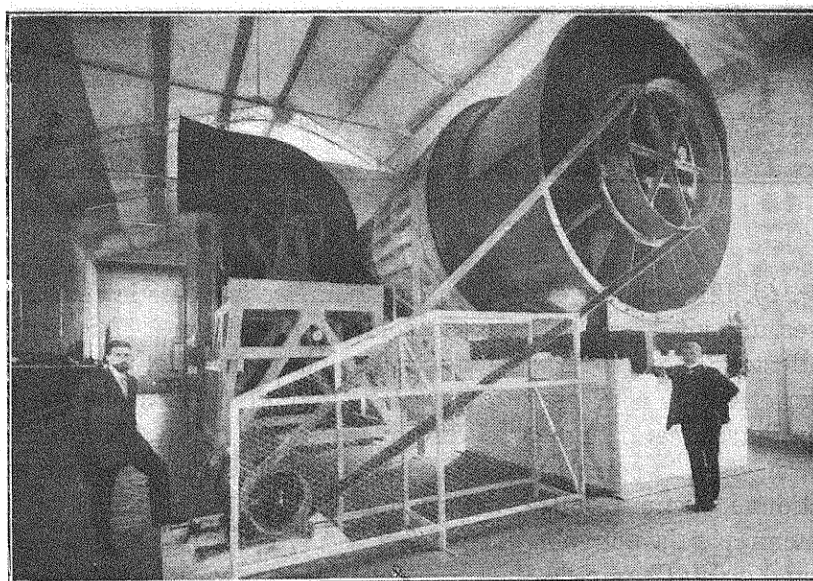


FIG. 9. — Les ventilateurs.

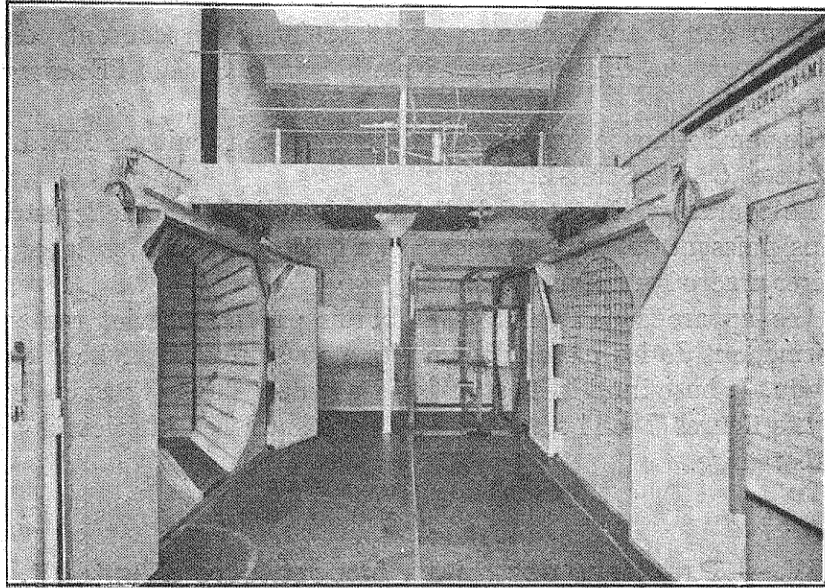


FIG. 10. — La chambre d'expériences.

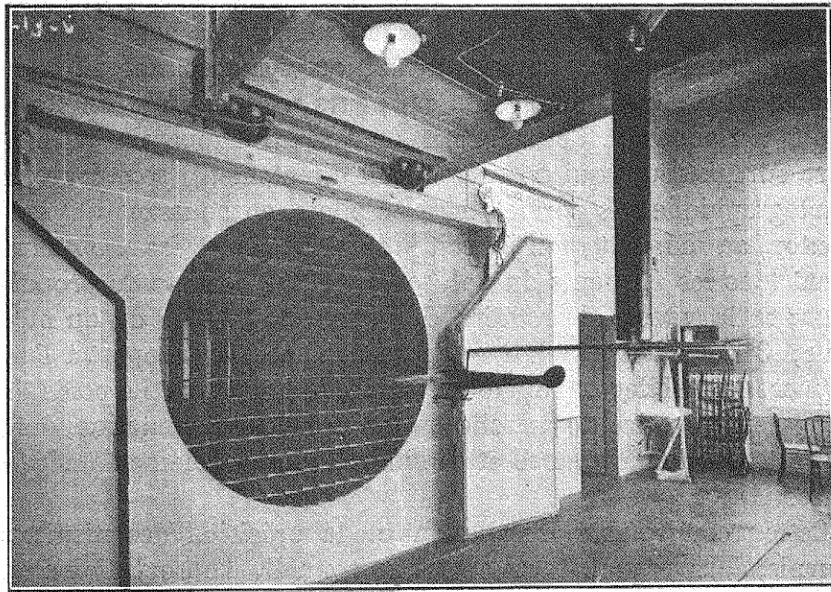


FIG. 11. — Essai d'un modèle d'aéroplane.

Secteur des Champs-Élysées, que transforme en courant continu un groupe convertisseur, installé par la Société l'Éclairage Électrique.

Le ventilateur de 4 m de diamètre a été construit par MM. Leflaive et C^{ie}, de Saint-Étienne.

Le courant d'air artificiel de notre installation actuelle est le plus puissant de ceux utilisés jusqu'à ce jour dans les laboratoires d'aérodynamique.

Les appareils de mesure sont portés par un chariot roulant permettant de les placer devant l'une ou l'autre buse. Bien entendu, la buse inutilisée est obturée par de solides portes en fer.

Les figures 7 à 11 sont des vues extérieures et intérieures du Laboratoire.

IV. — Premiers essais au Laboratoire d'Auteuil.

Après cette description, j'arrive de suite à une observation dont le résultat capital nous a causé la plus grande satisfaction.

Entrant dans la voie déjà suivie par MM. Legrand et Gaudart, M. le colonel Bouttiaux et M. le commandant Dorand, du Laboratoire Aéronautique militaire de Chalais-Meudon, construisirent un aéroplane-laboratoire avec lequel, en ayant comme pilote le lieutenant Saunier, on réalisa plusieurs vols d'étude en ligne droite par vent nul. Cet aéroplane était muni d'appareils de mesure enregistreurs qui opéraient, soit directement, soit par voie photographique. Ils permettaient au pilote, en poussant un seul bouton, au moment qu'il jugeait préférable, d'inscrire simultanément tous les éléments du vol, savoir : 1° la poussée du propulseur ; 2° la vitesse de rotation de l'arbre de l'hélice ou du moteur ; 3° la vitesse relative de l'aéroplane par rapport à l'air supposé immobile ; 4° l'angle d'attaque de l'appareil. Le poids de l'appareil en ordre de marche, représentant la sustentation, était du reste connu à l'avance et complétait tous les éléments nécessaires (1).

Cette remarquable installation et la précision des résultats fournis, dans lesquels toute erreur personnelle d'observation était éliminée, me frappèrent, et j'obtins du colonel Bouttiaux et du commandant Dorand la promesse qu'on établirait un modèle

(1) Ces appareils sont décrits dans *La Technique Aéronautique*, du 4^{er} novembre 1911.

réduit de cet aéroplane pour le soumettre à des essais comparatifs dans mon laboratoire. C'est ce qui fut fait avec un modèle très soigneusement construit à l'échelle de $1/14,5$ (fig. 43).

On vérifia tout d'abord le tube de Venturi, avec lequel était déterminée la vitesse de l'aéroplane, et qui avait été taré par des mesures directes, donnait dans notre courant d'air les mêmes résultats que notre tube de Pitot. On pouvait donc être tranquille sur l'évaluation des vitesses.

Les essais eurent lieu à des vitesses voisines de celles du vol.

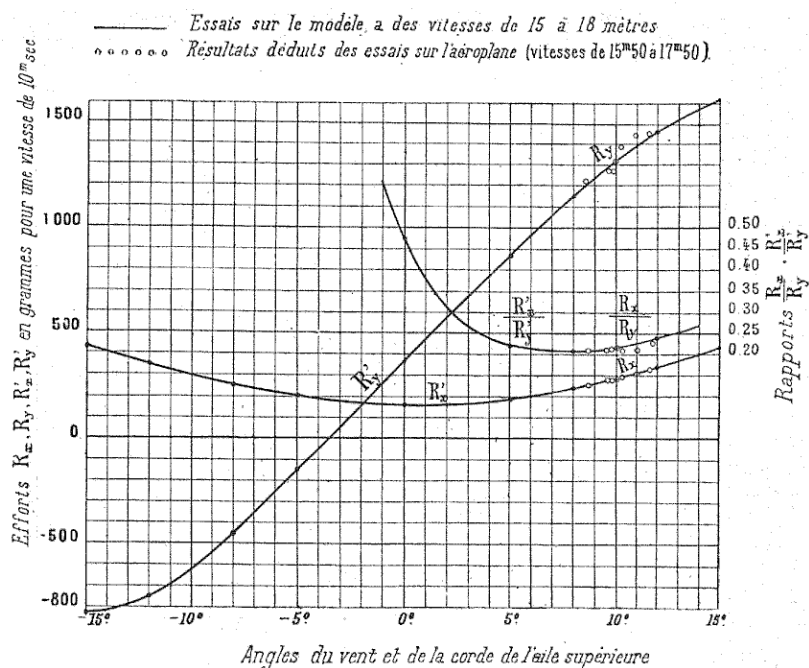


FIG. 42. — Comparaison entre l'aéroplane-laboratoire essayé à Villacoublay (R_x, R_y), et son modèle essayé au Laboratoire d'Auteuil (R'_x, R'_y).

Quand nous confrontâmes les courbes des résistances horizontales R_x et des résistances verticales R_y , en tenant compte de l'échelle du modèle, nous reconnûmes que toutes les valeurs de R_x du commandant Dorand tombaient exactement sur notre courbe et qu'il en était de même pour cinq observations sur sept des R_y ; les deux autres R_y en différaient très peu (fig. 42). Le tableau ci-dessous montre qu'en moyenne, les résultats coïncident au $1/100^e$ près :

EXPÉRIENCES SUR L'AÉROPLANE				RÉSISTANCES SUR LE MODÈLE RAMENÉES A 10 m DE VITESSE												
Angle d'incidence i	Vitesse de translation V	Résistance à l'avancement F	Poids de l'appareil Q	D'APRÈS LES EXPÉRIENCES SUR L'AÉROPLANE		D'APRÈS LES EXPÉRIENCES SUR LE MODÈLE			RAPPORT Expériences sur aéroplane Expériences sur modèle							
				$R_x = \frac{F}{14,5^2} \left(\frac{10}{V} \right)^2$	$R_y = \frac{Q}{14,5^2} \left(\frac{10}{V} \right)^2$	$\frac{R_x}{R_y}$	$R'x$	$R'y$	$\frac{R'x}{R'y}$	$\frac{R_x}{R'y}$	$\frac{R_y}{R'x}$	$\frac{R_x}{R'y}$	$\frac{R_y}{R'x}$			
degrés	m/s	kg	kg	kg	kg	kg	kg									
9,45	47,0	468	770	0,276	4,270	0,217	1,285	0,248	0,98	0,99	1,00	1,00	0,99	1,00		
9,40	47,0	468	770	0,276	4,270	0,217	4,275	0,248	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00		
10,00	46,7	465	770	0,284	4,340	0,2445	4,304	0,249	0,99	1,00	0,98	0,98	1,00	0,98		
8,40	47,3	463	760	0,252	4,209	0,208	4,493	0,244	1,00	1,01	0,99	1,00	1,01	0,99		
10,45	46,2	462	770	0,294	4,380	0,243	4,322	0,222	1,00	1,04	0,96	1,00	1,04	0,96		
11,00	45,7	460	750	0,308	4,445	0,243	4,380	0,227	0,98	1,05	0,94	0,98	1,05	0,94		
11,40	45,8	474	760	0,334	4,445	0,229	4,425	0,234	0,99	1,01	0,98	0,99	1,01	0,98		
				MOYENNES												
									0,99	1,01				0,99	1,01	0,98

Une telle conformité de résultats fait donc tomber cette objection souvent faite aux expériences de laboratoire, que dans la réalité les choses se passent tout autrement, en premier lieu, parce que c'est la surface qui est immobile, en second lieu parce que ses dimensions sont d'un ordre de grandeur différent de celui de l'aéroplane. L'idée que j'ai toujours préconisée, que l'on peut, de l'essai d'un modèle, conclure les conditions du vol d'un aéroplane, au point de vue de la sustentation et de la résistance à l'avancement, trouve là une éclatante confirmation.

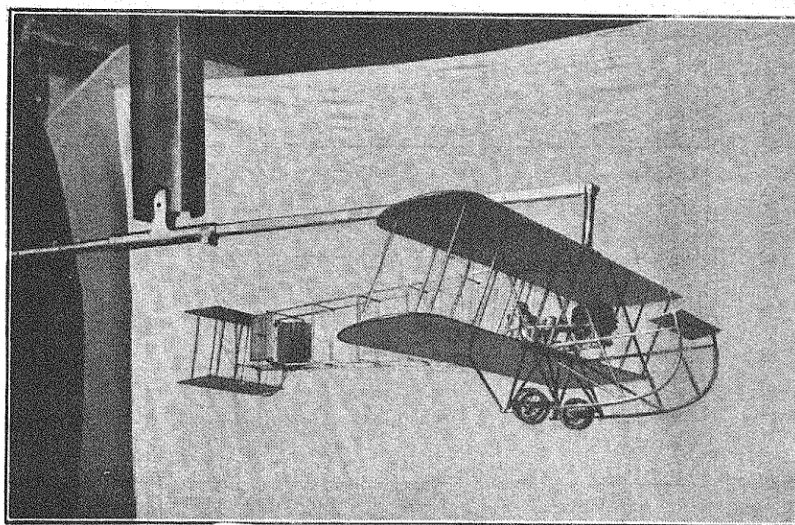


FIG. 13. — Modèle de l'aéroplane-laboratoire de l'Établissement militaire de Chalais-Meudon.

J'avais déjà fait d'assez nombreuses comparaisons de modèles avec des appareils existants, mais ces comparaisons reposaient sur des données beaucoup moins certaines et nos essais se faisaient à des vitesses inférieures à celles du vol ; j'en avais conclu qu'il convenait d'augmenter de 10 0/0 les coefficients trouvés dans les essais au laboratoire. Les résultats que je viens de donner semblent, dès maintenant, montrer que les différences entre les coefficients obtenus à *vitesse égale*, avec les modèles d'aéroplane et avec les aéroplanes en grandeur, sont encore plus faibles et peuvent même disparaître.

La même conclusion se dégage des essais que nous venons de faire sur le modèle de la torpille Paulhan-Tatin. Nous trouvons

la correspondance avec les données du vol réel, non plus en augmentant de 10 0/0 les coefficients d'expériences effectuées à une vitesse inférieure à celle du vol, mais en prenant les coeffi-

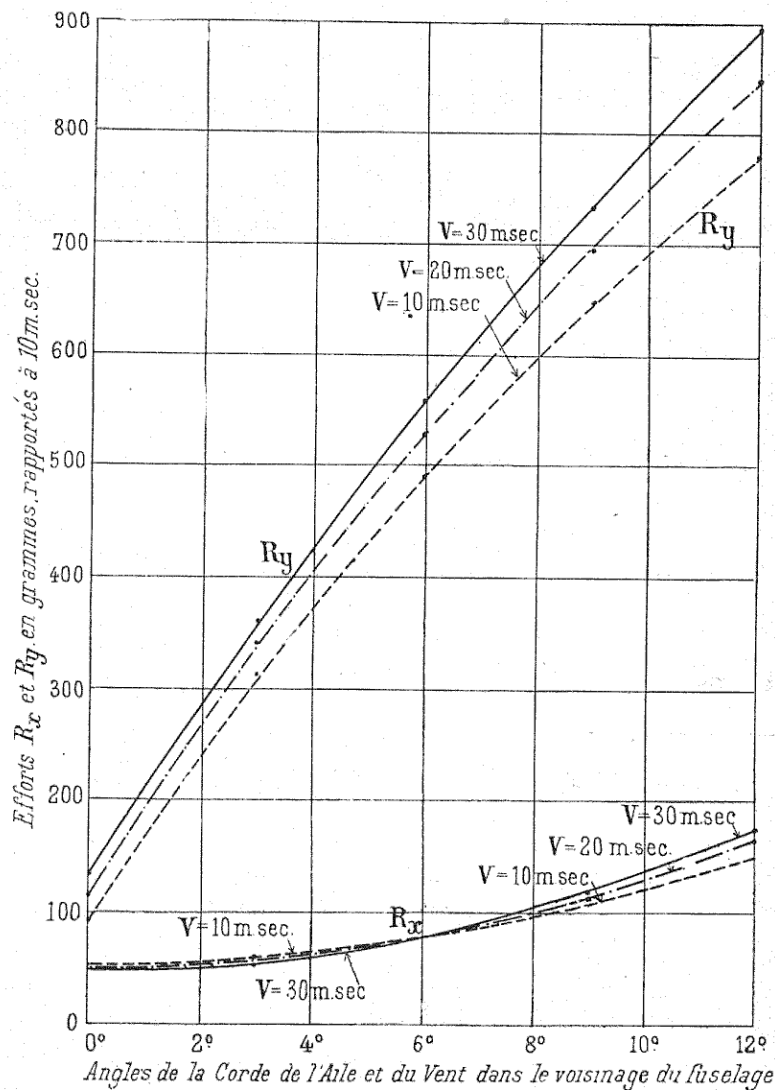


FIG. 14. — Efforts unitaires sur le modèle au dixième de la Torpille Paulhan-Tatin.

cients eux-mêmes trouvés à la vitesse de vol. Nous sommes même mieux d'accord avec les chiffres indiqués par l'inventeur

de ce remarquable appareil, ce qui tient à ce que l'accroissement relatif de la sustentation est plus grand que celui de la résistance à l'avancement : le rapport $\frac{R_x}{R_y}$ diminue, c'est-à-dire que la qualité de l'appareil s'améliore quand la vitesse augmente. Les diagrammes de ce modèle (*fig. 44 et 45*) mettent en évidence ce

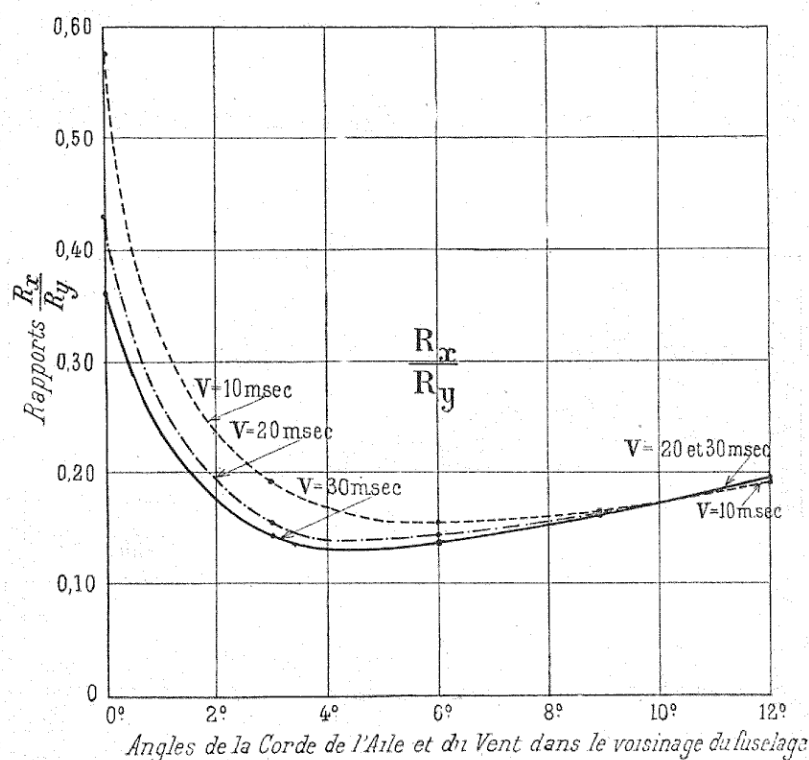


FIG. 45. — Rapports des efforts unitaires sur le modèle au dixième de la Torpille Paulhan-Tatin.

fait, que d'ailleurs nous avons précédemment constaté avec un modèle d'aéroplane Nieuport.

Indépendamment des essais comparatifs faits avec l'aéroplane Dorand, nous avons cherché à établir des comparaisons avec des surfaces portées par le chariot électrique de Saint-Cyr. Trois surfaces ont été expérimentées, et nous avons trouvé au laboratoire des valeurs inférieures à celles qui ont été données par M. Maurain. Toutefois, de nouvelles expériences faites par nous

sur un modèle représentant la surface, le chariot et même le sol, ont montré que le chariot exerçait une action verticale très appréciable sur la résistance de la surface. Celle-ci avait été cependant placée à 2,75 m au-dessus de la plate-forme. Cette action a été reconnue par une expérience directe faite par M. Maurain sur le chariot lui-même au moyen d'un plan placé bien horizontalement; il trouva pour la réaction verticale une valeur sensible, alors qu'évidemment elle devait être nulle. Si on supprimait cette réaction verticale, les résultats de Saint-Cyr se rapprocheraient des nôtres. M. Maurain se dispose à apporter au chariot les modifications propres à faire disparaître cette réaction. Il serait très désirable qu'il réussit, mais il n'en est pas moins établi qu'il est très difficile de faire des mesures exactes de

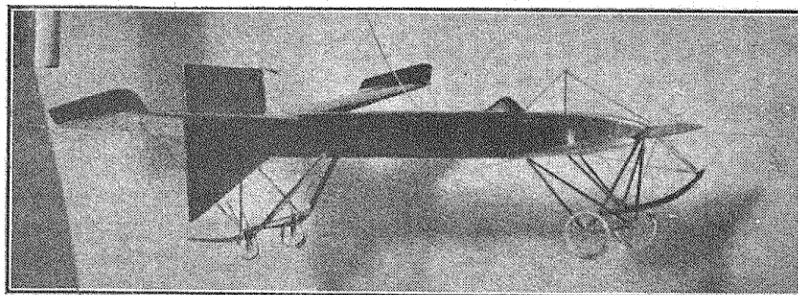


FIG. 16. — Modèle de l'aéroplane de M. Drzewiecki, porté par le courant d'air.

résistance sur des surfaces avec des chariots, même fonctionnant dans les meilleures conditions. Cela permet de penser que les expériences faites sur une simple automobile, avec une plaque beaucoup plus voisine de la plate-forme, ne présentent pas beaucoup de garantie (1).

Les essais du laboratoire peuvent aussi servir à l'étude de la question, si importante pour l'avenir de l'aviation, de la stabilité des aéroplanes. Une des premières applications en a été faite par M. Drzewiecki qui, en se basant uniquement sur les résultats de nos recherches antérieures sur les propriétés des différentes ailes, a combiné un appareil devant réaliser, suivant lui, les conditions de stabilité longitudinale automatique, appareil dont un modèle à l'échelle a été expérimenté dans le courant d'air du laboratoire (*fig. 16*). Aux deux extrémités d'un fuselage, M. Drze-

(1) Voir la note page 31.

wiecki a disposé deux paires d'ailes en tandem, la plus petite en avant. L'aile avant est notre aile n° 8 inclinée à 6°, et l'aile arrière notre aile n° 13 bis (profil Blériot) inclinée à 4° ; leurs surfaces sont dans un rapport tel que leurs sustentations soient à peu près égales. Comme le coefficient K_y de l'aile arrière croît plus vite avec l'incidence que celui de l'aile avant, il devient prépondérant si l'incidence tend à augmenter, et sa prépondérance est suffisante pour compenser le recul des résultantes sur chacune des ailes : le fuselage tend donc à s'élever à l'arrière. L'inverse a lieu pour une diminution d'incidence : il y a donc, dans les deux cas, stabilité. On a d'abord vérifié cette stabilité en rendant le modèle mobile dans le vent, autour d'un axe horizontal passant par le centre de gravité ; écarté de sa position d'équilibre, il y revient rapidement et sans oscillation. On l'a ensuite suspendu à un fil vertical, tandis qu'un fil horizontal dirigé dans l'axe de l'hélice et attaché à un point fixe, l'empêchait d'être entraîné par le fil (*fig. 46*). Quand le courant atteignait l'intensité suffisante, le modèle s'élevait tout en restant horizontal, le fil de suspension devenant alors inutile. Encouragé par ces expériences, M. Drzewiecki a immédiatement entrepris la construction de l'aéroplane, qui volera dans quelques semaines.

Je dois ajouter que, tout à fait indépendamment de l'étude de M. Drzewiecki, M. le lieutenant Blard, attaché au Laboratoire de Chalais, avait déjà résolu ce problème en se servant également des ailes 8 et 13 bis, la première inclinée à 8° et la seconde à 4°. Il a même construit, sur ce principe, un monoplan « canard » qui, le 15 avril dernier, à sa première sortie, a volé à Villacoublay, en donnant de bons résultats surtout au point de vue de la stabilité longitudinale ; un second appareil, également basé sur nos diagrammes, est en construction.

De tels essais sont encourageants et donnent lieu de penser que le problème de la stabilité n'est pas insoluble et qu'on arrivera à augmenter la sécurité en aéroplane, qui est l'objet des préoccupations les plus vives, et qui seule assurera l'avenir de l'aviation.

La confirmation de l'accord qui se produit entre les résultats des expériences faites sur un aéroplane en plein vol, avec ceux trouvés au laboratoire sur un modèle en réduction, exposé à un courant d'air artificiel, nous a causé la plus grande satisfaction. Elle nous a montré qu'en instituant nos laborieuses recherches,

nous n'avions pas fait œuvre vaine et que l'étude d'un modèle exécuté d'après l'avant-projet, pouvait à elle seule fournir, pour l'exécution définitive, des données exactes et positives, épargnant aux constructeurs bien des tâtonnements, non seulement coûteux, mais souvent dangereux. Peu à peu on pourrait donc faire entrer l'art de l'Ingénieur, basé sur des faits d'expérience, dans une étude raisonnée d'un appareil d'aviation.

Notre laboratoire du Champ-de-Mars nous a permis d'obtenir quatre à cinq mille résultats d'observation, qui ont fourni à l'aérodynamique en général, et en particulier à l'aviation, un grand nombre de documents. Je souhaite que le nouveau laboratoire, qui est plus puissant et mieux outillé, et réalise, je crois, une très bonne installation, accroisse ce domaine scientifique et industriel. En tout cas, mes efforts et ceux de mes ingénieurs, MM. Rith et Lapresle, tendront à ce but avec d'autant plus d'ardeur que j'ai l'espoir de rendre ainsi quelque service à la science française et à l'aviation.

NOTES COMPLÉMENTAIRES

1^o Essais effectués par M. de Guiche
avec une automobile.

Dans mon Mémoire (p. 28), j'ai fait allusion aux mesures, faites par M. de Guiche, des pressions sur quelques plans rectangulaires portés par une automobile. L'étude très détaillée qui en a été faite tire son principal intérêt de ce que l'auteur a pensé démontrer qu'il n'était pas indifférent de communiquer le mouvement à l'air ou à la plaque, et que les résultats trouvés au ventilateur ne sont pas applicables à l'aviation.

Il faut faire observer tout d'abord que cela est manifestement contraire au principe du mouvement relatif, d'après lequel les phénomènes sont les mêmes quel que soit le sens du mouvement. L'auteur pense que dans ces expériences ce principe n'est pas en jeu. J'ai désiré connaître l'opinion de M. Henri Poincaré, à qui j'ai posé très explicitement la question dans les termes suivants :

« J'ai étudié depuis quelque temps, dans un laboratoire aérodynamique que j'ai installé au Champ-de-Mars, les efforts exercés sur des plaques par un courant d'air très régulier. De nouvelles expériences ont été récemment faites en donnant à la plaque un déplacement rectiligne et uniforme dans un air calme. Est-il possible de supposer que les pressions sur la plaque, aussi bien sur la face antérieure que sur la face postérieure, varient suivant l'une ou l'autre manière de procéder? ou, au contraire, le mouvement relatif est-il seul en jeu? »
M. Poincaré m'a répondu : « *Il n'y a pas de raison pour que les efforts exercés sur des plaques par un courant d'air bien régulier diffèrent de ceux que subirait cette plaque en mouvement dans un air calme.* » Il ajoute que si les expériences sont faites par la méthode du tunnel, il faut en outre que les dimensions de la plaque soient petites par rapport à celles du tunnel, — condition remplie dans nos expériences. — Enfin, il conclut : « *Ces réserves faites, il est clair que le mouvement relatif peut seul intervenir.* »

Cette affirmation si nette de l'illustre savant qu'était M. Henri Poincaré fait autorité.

D'ailleurs pour les inclinaisons inférieures à 30 degrés — qui sont celles usitées en aviation — l'auteur n'a relevé, par rapport à nos propres résultats, que des différences peu importantes, qu'on peut le plus souvent représenter par des décalages de courbes. Il y a néanmoins un certain intérêt à se rendre compte de la raison de ces différences : elles tiennent, suivant nous, aux deux défauts systématiques dont nous allons parler.

Dans ces expériences, l'axe de la plaque en essai était situé à une hauteur de 1,30 m seulement au-dessus du bâti de l'automobile. Il est certain qu'elle était influencée par cette automobile au moins autant que la plaque de Saint-Cyr par son chariot, dont l'écartement était de 2,75 m (voir p. 55). Peut-on, notamment, regarder comme étant dans l'air libre une plaque carrée de 80 cm de côté, normale au vent, et distante de 90 cm seulement de l'automobile ?

L'auteur pense démontrer le contraire en vérifiant qu'un ruban flottant entre la plaque et l'automobile paraît se maintenir à peu près horizontal. On en déduit, dit-il, « de façon indiscutable, qu'il n'y a ni remous ascendants, ni aspiration descendante produite par le châssis ». Mais même en l'absence de tels remous, une inclinaison très faible des filets, que ce moyen « grossier », suivant l'expression de l'auteur, ne décèlerait assurément pas, pourrait correspondre à une influence mutuelle très notable. De plus cette vérification, même établie exactement, ne suffirait encore pas : il faudrait vérifier aussi que la vitesse relative d'un filet situé entre la plaque et l'automobile, est la vitesse même de l'automobile. On pourrait s'en rendre compte au moyen d'un tube de Pitot placé dans cette région, et nous sommes persuadé qu'on trouverait une différence. En tout cas, la preuve donnée est incomplète, et l'on ne peut trouver dans cette observation une « base indiscutable et définitive ».

L'autre défaut de ces expériences est dans le mode de mesure. Des tubulures affleurant la plaque communiquent avec des manomètres dont la seconde branche débouche dans une boîte placée sur l'automobile. Cette boîte, ainsi que l'auteur le déclare, *n'était pas étanche*, afin d'éviter les effets de dilatation de l'air (car une simple variation de $1/10$ de degré ne correspond pas à moins d'une variation de 3,7 mm dans la pression, valeur supérieure à un grand nombre des observations) : c'est dire qu'il y a communication entre son intérieur et l'air ambiant. Or, dans ce cas, comment la pression à l'intérieur de cette boîte ne serait-elle pas influencée par le mouvement de l'automobile, et comment, par conséquent, n'en résulterait-il pas d'erreur dans la détermination du zéro des manomètres ? De même qu'au voisinage immédiat de la plaque expérimentée, la pression de l'air n'est pas la pression atmosphérique (c'est précisément cette différence qu'on se proposait de mesurer), de même, et pour la même raison, au voisinage de l'automobile, la pression ne peut pas être la pression atmosphérique : la différence, que néglige l'auteur, constitue une erreur systématique de ses essais. Et cette erreur, il importe de le remarquer, est du même ordre que les valeurs mêmes qu'on veut mesurer, puisque l'automobile se déplace avec la même vitesse que la plaque.

Ce raisonnement suppose que la pression qui s'établit dans la boîte, non étanche, est la pression de l'air qui l'entoure immédiatement : elle en serait généralement différente si la boîte se trouvait directement frappée par des filets animés d'une certaine vitesse. Mais encore dans ce dernier cas, il n'y aurait évidemment aucune raison pour qu'elle fût égale à la pression atmosphérique, qui règne dans une région située à 2 ou 3 mètres de là et avec laquelle la boîte n'a aucune communication.

L'auteur, qui semble avoir oublié cette objection évidente dans son

premier mémoire, croit y avoir répondu ensuite par une expérience directe : en soumettant, dit-il, la boîte à l'action d'un violent courant d'air, la pression intérieure reste « rigoureusement constante, quelle que soit la position de la boîte pendant l'expérience ». Il nous paraît hors de doute que la boîte, dans cet essai, devait tout simplement, et sans qu'on s'en soit rendu compte, être hermétiquement close : en effet, il se produit nécessairement, à l'avant une compression de l'air, latéralement et à l'arrière une dépression : pour que la pression d'équilibre dans la boîte soit celle de l'air ambiant, il faut que les positions et les grandeurs des fissures de la boîte satisfassent à une condition déterminée. Si cette condition est remplie pour une orientation de la boîte elle ne l'est plus pour une autre : il n'y a d'exception que pour une boîte entièrement symétrique, mais, dans ce cas, la pression intérieure est notablement inférieure à celle de l'air ambiant, parce que les dépressions autour d'un corps sont plus fortes et plus étendues que les pressions. Nous sommes d'autant plus certain de ces faits, d'ailleurs faciles à prévoir, que nous avons eu plusieurs occasions de les étudier.

Quel que soit, d'ailleurs, le résultat qu'ait pu fournir cette expérience au ventilateur, on peut faire les remarques suivantes :

1^o D'après l'auteur, qui considère que dans les essais au ventilateur les phénomènes ne sont pas les mêmes que dans les essais en air calme, elle ne devait rien prouver relativement à ses expériences avec l'automobile;

2^o Pour qu'elle fût, pour nous, réellement probante, il aurait été nécessaire de placer dans le vent un modèle de l'automobile, sur lequel aurait été fixé un modèle de la boîte, en relation avec un manomètre ;

3^o Dans certaines expériences, la boîte était placée au fond de la voiture. Dans ce cas, cette boîte n'étant pas étanche et étant entourée d'un air sensiblement calme, sa pression intérieure était égale à la pression en cette région du voisinage immédiat de l'automobile, c'est-à-dire différente de la pression atmosphérique. Ces expériences étaient donc entachées de l'erreur que nous avons signalée. Or, elles concordent, dit l'auteur, avec les autres : donc l'erreur était dans toutes.

On peut avoir une valeur approchée de l'erreur commise en remarquant que, près de la surface latérale d'un corps en mouvement, l'air est généralement en dépression, parce que sa vitesse est augmentée ; nous croyons, d'après nos expériences, qu'on peut admettre une dépression moyenne de 1 ou 2 kg par m² pour une vitesse de 10 mètres, c'est-à-dire une dépression de 1 à 2 mm d'eau. En prenant une telle valeur pour corriger le zéro des courbes publiées, on retombe à peu près sur des résultats déjà connus, au moins pour les inclinaisons inférieures à 30 degrés. Aux autres incidences, les écarts sont plus grands, mais aussi la déviation de l'air par la plaque devait être plus gênée par la présence de l'automobile, c'est-à-dire que la première cause d'erreur devait jouer un plus grand rôle.

Depuis que ces lignes ont été écrites, l'Institut Aérodynamique de

Saint-Cyr a installé, sur son grand chariot électrique, une surface, en vue de mesurer la distribution des pressions. Mais dans cette installation, les manomètres ne sont pas enfermés dans une boîte dont la pression intérieure est inconnue : ils sont, au contraire, situés en plein air, toujours visibles, et la pression atmosphérique est transmise à leur seconde branche par l'ouverture latérale d'un tube dirigé dans le sens du mouvement et placé à une certaine distance en avant de la plaque en essai. C'est ce qu'avait déjà fait, en 1902, le savant américain Nipher, pour des recherches semblables de la distribution des pressions sur une plaque déplacée à l'aide d'un wagon de chemin de fer (voir mon ouvrage *La Résistance de l'Air*, p. 158). En outre, M. Maurain a recherché avec soin les dispositions propres à réduire l'influence perturbatrice due à la présence du chariot : la solution de ce problème très difficile est en effet l'écueil des essais de ce genre. Si M. de Guiche reprenait ses essais, il aurait tout intérêt à faire comme à Saint-Cyr, et il est très probable qu'il retomberait alors sur les résultats que nous avons obtenus.

2° Réponse aux observations de M. Rateau.

Je crois utile de présenter à la Société quelques remarques à propos de la communication que M. Rateau a faite à la suite de la mienne. Je relèverai d'abord, dans les expériences qui en font l'objet, une faute capitale qui en altère les résultats. C'est une faute assez fréquente et à laquelle on doit prendre garde si l'on veut entreprendre ou seulement apprécier des expériences d'aérodynamique faites avec la méthode du ventilateur et applicables à l'aviation. Le principe de ces expériences étant de reproduire, aussi exactement que possible, ce qui se passe dans le mouvement relatif d'un corps et d'une masse d'air indéfinie, il faut à cet effet que la section du courant d'air artificiel soit assez grande pour que, dans la périphérie, la vitesse d'air soit sensiblement la même, en direction et en grandeur, que celle de l'air qui n'a pas encore approché de la plaque. Cette condition est suffisante, car si elle est remplie, on ne changerait rien en augmentant indéfiniment les dimensions du courant, c'est-à-dire en se mettant dans les conditions exactes du problème; elle est nécessaire, car si elle n'est pas vérifiée, on changerait certainement l'écoulement de l'air en augmentant la section du courant. On doit donc réaliser d'abord un courant d'air à filets parallèles, c'est-à-dire un courant cylindrique, puis introduire dans ce courant un corps de dimensions assez faibles pour que sa présence ne trouble pas d'une manière sensible la périphérie du courant. Le courant ne cessant pas d'être cylindrique, il est très indifférent en définitive, *qu'il sorte d'un ajutage et s'amortisse ensuite dans l'air libre, ou qu'il sorte d'un ajutage pour rentrer dans un autre, on même qu'il ait des parois dans son voisinage plus ou moins immédiat* : le résultat sera bon si la condition que je viens de dire est réalisée, il sera affecté d'une erreur inconnue si elle ne l'est pas (1). C'est là ce qu'on néglige souvent d'observer. Or, chaque fois qu'il parle de la méthode du ventilateur, M. Rateau raisonne comme si les filets extérieurs du courant étaient toujours déviés sensiblement par la présence de la plaque, alors qu'ils ne doivent jamais l'être : ce qu'il dit ne s'applique donc qu'à des expériences défectueuses (2).

M. Rateau semble avoir oublié, dans ses essais, cette grave cause d'erreurs, et on ne peut avoir confiance dans des expériences faites, soit sur des plaques de 50×30 cm placées dans un courant de 70 cm de

(1) Il est inutile de dire que j'ai toujours pris soin dans mes expériences de réaliser cette condition fondamentale et de vérifier qu'elle était bien remplie, pour toutes les parties périphériques du cylindre d'air. Je n'ai donc pas à tenir compte de l'objection que fait M. Rateau, au sujet de la distance entre le courant et les parois de la chambre d'expériences.

(2) Il ajoute, il est vrai, qu'il faut « que la quantité de fluide influencé par le corps soit plus faible que celle qui sort de la buse ». Mais comment cette condition pourrait-elle être réalisée si le corps dévie le bord du courant?

côté, soit sur des biplans formés de plans de 50×15 cm écartés de 20 ou 30 cm et placés dans le même courant. Il est bien reconnu, et j'ai moi-même vérifié, que la surface des plaques ne doit pas dépasser quelques centièmes de celle du courant.

Les particularités observées par M. Rateau sur les lois de la résistance de l'air tiennent peut-être, en partie, à cette dimension exagérée des plaques. Peut-être aussi ont-elles leur origine dans une seconde imperfection de l'appareil : l'axe des plaques était supporté par des palettes verticales en bois, assez larges, qui les encadraient latéralement d'une façon plus ou moins complète (*fig. 47*). Ces palettes gênaient l'écoulement latéral de l'air et avaient sur celui-ci une influence notable, et

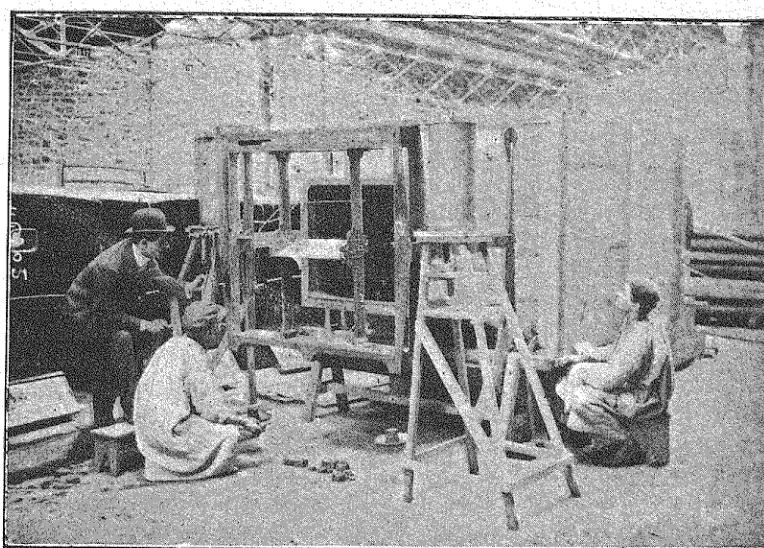


FIG. 47. — Appareil de M. Rateau.

variable avec l'inclinaison de la plaque : les plaques à 90 degrés, notamment, étaient complètement bordées sur leurs faces latérales.

Ainsi, les surfaces de M. Rateau ne peuvent pour ces deux causes être comparées à des plaques isolées. Etant donné que de petites modifications ont parfois une grande influence sur la résistance des surfaces, il n'est pas étonnant que M. Rateau trouve des différences sensibles avec les autres expérimentateurs et, notamment, des discontinuités dans les courbes des coefficients de résistance. Je ne conteste nullement l'existence, dans certains cas, de telles discontinuités. J'ai eu moi-même occasion de signaler de véritables indéterminations du coefficient : mieux encore, je pense publier prochainement les résultats obtenus avec une surface qui, à chaque incidence, entre certaines limites, présente trois coefficients dépendant de la vitesse. M. Rateau s'est probablement trouvé en présence d'anomalies de ce genre, soit à cause de son

courant trop étroit, soit à cause de la présence des palettes : en tout cas, mes expériences sur les plaques ordinaires, pratiquement isolées dans le vent et placées dans un courant beaucoup plus large, n'ont rien donné de semblable.

J'aurais voulu borner ma réponse à ce point essentiel. Mais comme il se dégage nettement, du mémoire de M. Rateau, que je lui aurais emprunté sa méthode et son appareil, je me vois forcé, à mon regret, d'entrer dans une question personnelle.

M. Rateau rappelle que, pendant la période où j'installais mon Laboratoire du Champ de Mars, j'ai eu son appareil à ma disposition. Il m'avait été loué, en effet, à raison de 100 francs par séance de quatre heures. Les expériences que j'ai faites avec cet appareil m'ont permis de reconnaître qu'il laissait beaucoup à désirer, et je me félicite que M. Rateau ait demandé que je ne publie pas les résultats que j'avais obtenus, et qui, je l'ai reconnu plus tard, étaient entachés d'erreurs importantes.

Suivant M. Rateau, il suffit d'un coup d'œil sur le dessin de cet appareil et celui de mon laboratoire, pour voir leur analogie : il serait plus exact de dire qu'un coup d'œil suffit à montrer leur différence (*fig. 5 et 17*). La succession qu'il indique pour son appareil : 1° ventilateur, 2° caisse dans laquelle l'air est comprimé, 3° buse, 4° appareil de mesure, est remplacée par celle-ci : 1° buse, 2° chambre d'expérience, où l'air est en dépression et où sont les expérimentateurs et les appareils de mesure, 3° diffuseur, 4° ventilateur. La caisse de M. Rateau n'a aucune corrélation avec ma chambre d'expérience : elle est un simple réservoir d'air où s'amortissent les remous du ventilateur, tandis que ma chambre est traversée par un courant uniforme qui en occupe une région bien délimitée. D'ailleurs, dans ma méthode, l'aspiration ôte toute influence aux remous du ventilateur. En définitive, mon installation, qui a un caractère certain de nouveauté, diffère autant de celle de M. Rateau, que des autres installations où a été jusqu'à présent appliquée la méthode du ventilateur.

Les revendications de M. Rateau sont d'autant moins justifiées que son appareil ne diffère aucunement, dans son principe, de l'installation antérieure du Laboratoire Militaire de Rome (Capitaine Crocco), dont les éléments sont les suivants : 1° ventilateur, 2° caisse dans laquelle l'air est comprimé, 3° buse, 4° appareil de mesure. D'ailleurs, l'idée d'obtenir un courant d'air régulier, en faisant sortir l'air d'un réservoir par un ajutage, se présente si immédiatement à l'esprit, qu'elle a été employée dès le début des recherches d'aérodynamique.

Je pourrais étendre mes observations à bien d'autres points, mais je crois que ce serait sans aucun intérêt pour la Société.

