

LES ESSAIS SUR MODÈLES EN MÉCANIQUE

par J. LAMOEN,

Ing. A. I. Lg., Ingénieur en chef, Directeur des Ponts et Chaussées, Directeur du Laboratoire de Recherches hydrauliques, Professeur extraordinaire à l'Université Libre de Bruxelles

avec la collaboration de :

R. BIDLOT,

Ing. A. I. Lg., Professeur à l'Université de Liège

N. FLORINE,

Ingénieur d'Aéronautique au Service technique de l'Aéronautique du Ministère des Communications

Ch. HANOCQ,

Ing. A. I. Lg., Professeur à l'Université de Liège

A. JORISSEN,

Ing. A. I. Lg., Chef de travaux à l'Université de Liège, Associé du F. N. R. S.

S. LASTCHENKO,

Ingénieur, Chef du Service des Projets au Chantier naval John Cockerill à Hoboken

P. PUVREZ,

Ing. A. I. Br., Professeur à l'Université Libre de Bruxelles

Alb. SCHLAG,

Ing. A. I. Lg. et A. I. M., Professeur à l'Université de Liège, Directeur du Laboratoire d'Hydraulique générale

R. SPRONCK,

Ing. A. I. Lg. et G. M. P., Professeur à l'Université de Liège

G. VERHOFSTADT,

Ing. A. I. G., Ingénieur en chef des Etudes du Chantier naval John Cockerill à Hoboken

I. Introduction

Dans ces dernières années on n'a plus guère construit une machine hydraulique de quelque importance sans l'avoir au préalable étudiée sur modèle réduit.

Au moment où l'industrie de la construction s'attache à réaliser, dans ce domaine comme ailleurs, des rendements de plus en plus élevés, les théories mécaniques s'avèrent insuffisantes pour résoudre complètement les problèmes qui lui sont posés. C'est en réalité qu'elles ne permettent pas de pousser l'étude beaucoup plus loin que la détermination des valeurs moyennes de l'écoulement, alors que le gain des derniers pour-cents exige que l'on suive jusque dans ses détails le mouvement du fluide à travers la machine.

Le tracé précis des aubages d'une turbomachine, par exemple, apparaît comme ayant une importance de premier plan, particulièrement pour les machines modernes à grande vitesse, et sa détermination n'est guère possible par des considérations uniquement théoriques. On est donc conduit à recourir de plus en plus à l'étude expérimentale, celle-ci devant être conçue de telle sorte que, facilement et sans frais exagérés, il soit possible de comparer entre elles diverses solutions. Seule la méthode des essais sur modèles répond à ces exigences.

L'idée de mesurer la résistance à l'avancement des bateaux au moyen de maquettes remonte au

xviii^e siècle mais, faute de bases théoriques suffisantes, les résultats obtenus furent très incertains. Reech appliqua les règles de la similitude à la résistance globale du navire, mais ce fut W. Froude qui, le premier, en 1870, les utilisa pour la seule résistance résiduaire, que nous définirons ci-dessous. Cet artifice de Froude est encore à la base des méthodes d'expérimentation actuelles.

Un nouveau pas en avant fut réalisé par Taylor lorsqu'il publia en 1911, puis en 1933, les résultats d'essais systématiques sur des séries de modèles de navires.

Dans le domaine de l'aéronautique les essais sur modèles réduits dans les souffleries aérodynamiques poursuivent les mêmes buts que les essais analogues dans les autres branches de la technique. Ces essais doivent permettre au constructeur de se rendre compte rapidement, sans danger et avec un minimum de frais, du comportement et du fonctionnement de sa future construction.

La question du poids de l'avion est un sujet de soucis constants du constructeur et, pour cette raison, il ne peut se permettre les larges marges de sécurité qui facilitent souvent la besogne dans d'autres techniques. Il doit serrer du plus près les phénomènes physiques qui interviennent dans le fonctionnement de l'appareil qu'il étudie. Il doit pousser ses calculs le plus loin possible, tout en

les appuyant sur des bases expérimentales sûres et étendues.

Ce sont les souffleries aérodynamiques qui fournissent les bases expérimentales des calculs, mais il doit être bien entendu que ces bases ne sont pas les seules sur lesquelles s'édifie le calcul. Les considérations théoriques jouent un rôle au moins aussi important que les résultats expérimentaux. Dans l'aérodynamique, science qui s'est prodigieusement développée pendant les dernières décades, la théorie et l'expérience collaborent très intimement, ceci non seulement en vue des applications directes de la pratique, mais aussi pour contribuer au développement propre de chacun de ces deux moyens d'investigation. La théorie oriente les programmes des recherches expérimentales et fournit des indications pour les effectuer avec le meilleur rendement possible. L'expérience fournit les coefficients numériques qui interviennent dans les formules établies par la théorie et contribue à apprécier le bien-fondé des hypothèses qui sont nécessairement à la base de tout raisonnement théorique.

Voici un exemple de cette influence mutuelle : aux débuts de l'aviation, les constructeurs et les laboratoires se préoccupaient beaucoup de l'influence de l'allongement de l'aile (rapport de l'envergure à la profondeur), cette influence étant reconnue très importante, mais on ne parvenait pas à l'isoler de celle d'autres caractéristiques de forme de l'aile, telles que le profil et la forme en plan. On en était donc réduit à multiplier à l'infini le nombre des essais pour pouvoir juger des multiples formes possibles de l'aile. La théorie de la traînée induite, universellement appliquée depuis quelque vingt-cinq ans, permet de calculer cette influence de l'allongement et réduit ainsi considérablement le nombre des expériences nécessaires. Les essais, de leur côté, ont confirmé le bien-fondé des calculs théoriques.

Les règles de similitude ont été souvent appliquées avec fruit aux problèmes posés par diverses mesures hydro- et aérodynamiques. Etant données les limites dans lesquelles le présent rapport doit être maintenu, nous traiterons succinctement du seul cas des appareils déprimogènes pour la mesure des débits fluides. A ceux qui s'intéressent spécialement à ces questions nous rappelons qu'au cours de l'année 1943-1944, la section « Méthodes et appareils de mesure » du cercle d'études « Mécanique » de l'A. I. Lg. a présenté une série de communications ayant trait aux méthodes les plus couramment utilisées pour la mesure des débits fluides.

II. Essais sur modèles pour turbo-machines

A. TURBINES HYDRAULIQUES

Si l'on considère deux turbo-machines géométriquement semblables, la similitude de leurs conditions de fonctionnement exige :

a) Qu'il y ait même rapport entre la vitesse du fluide, représentée par exemple par la valeur c_1 de la vitesse absolue à l'entrée du rotor, et celle de la roue, représentée par sa vitesse périphérique u_1 ;

b) Que, puisqu'il s'agit essentiellement d'un écoulement sous l'action de la pesanteur, la condition de Froude soit réalisée, c'est-à-dire que dans les deux machines le nombre de Froude $\frac{2gH'}{c_1^2}$ ait même valeur, H' représentant la hauteur d'eau mise effectivement à la disposition de la turbine, c'est-à-dire la dénivellation géométrique entre les niveaux d'amont et d'aval, diminuée des pertes de charge dans les tuyaux d'amenée et de fuite ;

c) Du point de vue du travail recueilli (T , par kg de fluide) que, parallèlement à la condition de Froude, il y ait également égalité du nombre $\frac{gT_i}{c_1^2}$;

d) Dans ces conditions le rendement indiqué η_i (donc défalcation faite des pertes extérieures : paliers, butées, frottement du rotor dans l'eau, etc.) est le même pour les deux machines.

En résumé, les règles de similitude sur lesquelles repose la technique des essais sur modèles réduits de turbines hydrauliques, peuvent s'exprimer comme suit ⁽¹⁾ (abstraction faite de la variation avec les dimensions, des coefficients de pertes dans les aubages et du rendement mécanique) :

« Toutes les turbines géométriquement semblables entre elles ont même rendement si l'on fait croître la vitesse périphérique u_1 proportionnellement à \sqrt{H} et le quotient $\frac{Q}{r_1^2}$ proportionnellement à la vitesse périphérique u_1 . »

Dans cet énoncé Q et r_1 désignent respectivement le débit de la turbine et le rayon extérieur de son rotor.

La similitude cependant n'est pas encore absolument complète. La condition de Reynolds a été négligée, alors que les nombres de Reynolds relatifs au modèle sont souvent nettement inférieurs à ceux que l'on atteindra en réalité. Sans doute est-on grandement justifié de le faire en raison du caractère nettement turbulent des écoulements. D'autre part, le modèle réduit, surtout si l'échelle de réduction géométrique est grande, ne peut reproduire la machine en véritable grandeur avec une fidélité complète : les joints ne peuvent souvent être réduits dans le même rapport que les autres longueurs, le petit modèle est souvent relativement plus rugueux que la machine industrielle, enfin les rendements mécaniques (paliers, butées, etc.) ne sont pas identiques.

De tout cela il résulte que la courbe de rende-

⁽¹⁾ Ch. HANOCQ, *Les Machines rotatives*, Béranger, Paris et Liège, 1935.

ment total n'est pas transposable sans correction du modèle à la machine elle-même, le rendement de cette dernière étant souvent supérieur à celui du modèle. Diverses formules de transposition ont donc été proposées et les usines de construction de turbines ont, de leur côté, établi des courbes de transposition qui leur permettent, après relevé de la courbe du rendement du modèle, d'en déduire la courbe de garantie qu'elles pourront proposer sur la machine en grandeur [voir la fig. 1 ⁽¹⁾ où sont comparées les courbes rendement-puissance de deux turbines Francis verticales simples identiques à la courbe garantie d'après les essais sur modèle].

B. TURBO-POMPES

Des règles de similitude analogues existent pour les turbo-pompes. Signalons que les *Recommandations pour les essais des pompes centrifuges* rédigées par la Société belge des Mécaniciens (1945), prévoient que, pour les pompes de grandes dimensions, les essais de réception pourraient être effectués sur modèles réduits.

C. TURBINES À VAPEUR, COMPRESSEURS, ETC.

Ces machines sont aussi essayées sur modèles. Il convient généralement d'étudier d'abord séparément les divers éléments constitutifs plutôt que l'ensemble de la machine.

Avec les fluides compressibles deux conditions supplémentaires de similitude entrent en jeu :

a) Identité des rapports γ des chaleurs spécifiques à pression ou à volume constant ;

b) Condition de Mach : égalité des rapports des vitesses en des points homologues, à la vitesse de propagation du son dans le fluide.

D. MÉTHODE AÉRODYNAMIQUE

Les essais sur modèles des turbo-machines ne se font pas seulement en réduisant les dimensions, les vitesses de rotation ou les débits ; ils peuvent aussi s'effectuer en modifiant les caractéristiques du fluide, poids spécifique et viscosité notamment, c'est-à-dire en utilisant un autre fluide. C'est la méthode qui a été mise au point par la firme Esscher-Wyss de Zurich sous le nom de *méthode aérodynamique*. Les turbines à vapeur et les turbines hydrauliques sont étudiées, soit en vraie grandeur, soit sur modèle, en substituant l'air à la vapeur ou à l'eau.

⁽¹⁾ Mise gracieusement à notre disposition par la firme A. B. Karlstads Mekaniska Werkstad, Karlstad, Suède.

Il faut évidemment respecter les conditions de similitude découlant des équations fondamentales de la mécanique des fluides, ou tout au moins vérifier que les écarts inévitables n'ont qu'une influence minime. Une de ces conditions est l'égalité des nombres de Reynolds.

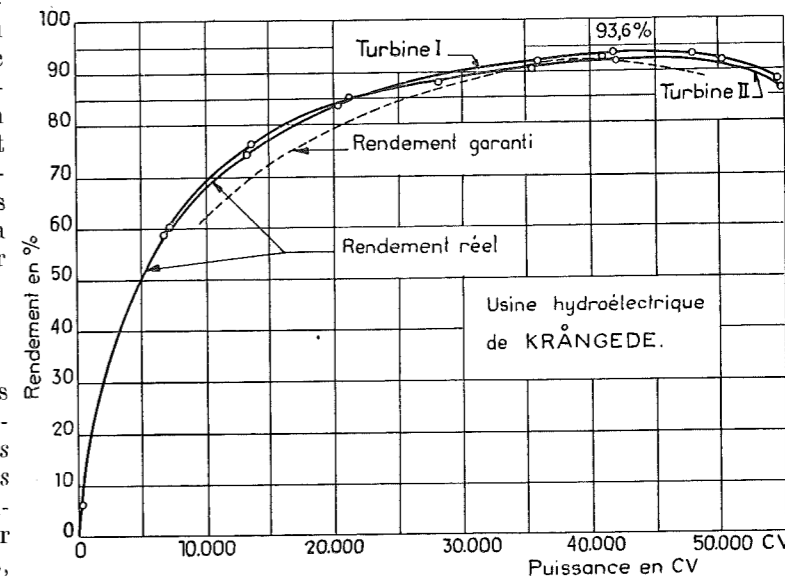


FIG. 1.

Méthode aérodynamique. Essais de turbines à vapeur

La substitution de l'air à la vapeur surchauffée permet d'éliminer un certain nombre d'inconvénients de cette dernière : hautes températures, vitesses périphériques élevées, condensations, etc.

Certains éléments de turbines, les aubages notamment, sont examinés, non sur modèles réduits, mais sur modèles agrandis, ce qui permet d'étudier avec plus de facilité et de précision l'influence de légères modifications dans le tracé du profil des aubages. La vapeur surchauffée et l'air possèdent un grand nombre d'analogies manifestes et l'on conçoit que l'on puisse sans inconvénient substituer l'un à l'autre.

Méthode aérodynamique. Essais de turbines hydrauliques

Par contre le remplacement de l'eau par l'air peut paraître *a priori* devoir susciter diverses réserves. Heureusement les vitesses maximales atteintes restent encore suffisamment petites vis-à-vis de la vitesse de propagation du son dans le fluide en jeu, de sorte que la condition de Mach peut être négligée.

La valeur de la méthode aérodynamique, appliquée à l'étude des turbines hydrauliques, ne peut mieux s'établir que par la comparaison des résultats obtenus aux essais et dans la réalité. La figure 2 (extraite du *Bulletin Esscher Wyss*, 1939)

est convaincante à cet égard. Elle représente la courbe du rendement d'une turbine Kaplan tracée en fonction du nombre de tours de la turbine. Elle compare les résultats obtenus sur un modèle fonctionnant avec l'air dans les conditions d'exploitation (cercles) et avec la même roue actionnée par l'eau (croix).

L'utilisation de l'air comme fluide d'essai pré-

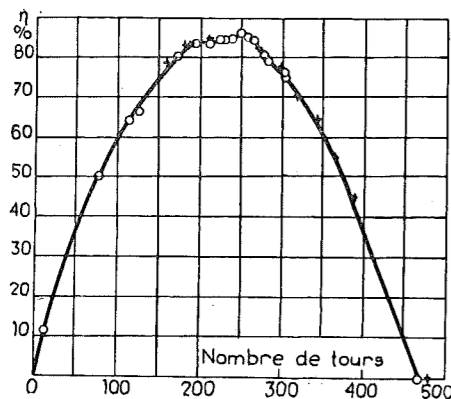


FIG. 2.

sente encore un avantage supplémentaire : en faisant varier la pression de l'air mis en œuvre, c'est-à-dire sa viscosité, il devient possible, toutes autres choses restant inchangées, de faire varier le nombre de Reynolds. On peut ainsi sans difficulté parcourir, pendant les essais, une gamme étendue de nombres de Reynolds, jeter un pont entre les essais sur modèle et l'exécution réelle et établir directement les lois de transposition permettant de reporter, à la machine en vraie grandeur, les résultats obtenus sur un modèle fonctionnant à un nombre de Reynolds différent.

E. CAVITATION

La cavitation se produit dans une pompe ou une turbine hydraulique, ou à l'arrière d'une hélice marine lorsque, en un endroit déterminé, la pression descend au-dessous de la pression de vaporisation de l'eau. Ce liquide se vaporise alors et il y a chute de rendement ; on sait d'autre part que la cavitation entraîne une destruction rapide des aubages le long desquels elle se produit ⁽¹⁾.

La cavitation apparaît lorsque le nombre de Thoma

$$\sigma = \frac{p - p_t}{\rho V^2} \quad (1)$$

descend au-dessous d'une certaine valeur critique dépendant du type de machine.

Dans la formule (1) les différents symboles ont la signification suivante :

⁽¹⁾ Elov ENGLERSON, *Pitting in Water Turbines (The Engineer, 17 octobre 1930)*. Cet article contient une description de l'installation pour l'étude de la cavitation de la firme A. B. Karlstads Mekaniska Werkstad.

p : pression au point envisagé ;
 V : vitesse en ce point ;
 p_t : tension de la vapeur à la température d'essai ;
 ρ : masse spécifique.

Les essais doivent être conduits de manière à réaliser dans le modèle la même valeur du nombre σ que dans la machine en grandeur. L'examen stroboscopique et la mesure du rendement permettent de déterminer le moment où commence la cavitation. Pour réaliser des conditions de pression correspondant à la réalité, il est souvent indispensable d'opérer dans une installation étanche, permettant de contrôler et de réaliser les pressions p conduisant aux mêmes valeurs de σ .

III. Essais sur modèles de navires

A. GÉNÉRALITÉS

L'étude complète d'un navire comporte :

- Les essais de remorque* : où l'on mesure la force avec laquelle il faut remorquer le modèle de navire pour lui imprimer différentes vitesses ;
- Les essais sur l'hélice en route libre* : où l'on détermine les caractéristiques de l'hélice tournant seule dans l'eau ;
- Les essais en autopropulsion* : le modèle est muni d'hélices dont on mesure la poussée et le moment, pour différentes vitesses ;
- Les essais sur les qualités nautiques* : comportement du modèle par roulis, tangage, giration. Manœuvrabilité du navire, stabilité de route, etc.

B. RÉSISTANCE DE REMORQUE

Description succincte des essais

Le modèle est remorqué dans un bassin d'une longueur utile de 100 à 150 mètres environ et d'une largeur de 6 à 10 mètres, par un pont roulant se déplaçant au-dessus du bassin. Le modèle est coulé en paraffine et a une longueur de quelque 4 à 5 mètres. Lorsque le modèle est remorqué, il est guidé longitudinalement, mais est libre de prendre l'assiette qui résulte du mouvement.

Les espaces parcourus, les temps et la force de traction sont enregistrés sur un tambour cylindrique tournant.

Bases théoriques

La résistance R à l'avancement d'un navire dépend des quantités suivantes :

L : longueur du navire ;
 V : vitesse d'avancement ;
 ρ : masse spécifique de l'eau ;
 g : accélération de la pesanteur ;
 ν : coefficient cinématique de viscosité de l'eau.

La résistance dépend également des dimensions du bateau autres que la longueur et est

influencée aussi par les dimensions de la masse d'eau, mais tous ces éléments peuvent être caractérisés par des coefficients de forme $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots$

On aura donc une relation

$$f(R, L, V, \rho, g, \nu, \tau_1, \tau_2, \tau_3, \dots) = 0 \quad (2)$$

qui, selon une propriété établie par Vaschy et Buckingham, pourra s'écrire, en faisant abstraction des coefficients de forme :

$$f\left(\frac{R}{L^2 V^2 \rho}, \frac{V^2}{gL}, \frac{LV}{\nu}\right) = 0 \quad (3)$$

ou encore :

$$\frac{R}{L^2 V^2 \rho} = f\left(\frac{V^2}{gL}, \frac{LV}{\nu}\right) \quad (4)$$

où $\frac{V^2}{gL}$ est le nombre de Froude et $\frac{LV}{\nu}$ celui de Reynolds.

Lorsque la viscosité est nulle il suffirait donc d'avoir, les indices m référant au modèle,

$$\frac{V_m^2}{gL_m} = \frac{V^2}{gL} \quad \text{ou} \quad V_m = V \sqrt{\frac{L_m}{L}} \quad (5)$$

$$\frac{R_m}{L_m} = \frac{L_m^2 V_m^2}{L^2 V^2} = \left(\frac{L_m}{L}\right)^3 \quad (6)$$

La résistance par tonne de déplacement serait donc la même pour le navire et pour le modèle.

Si maintenant on introduit la viscosité, il faudrait conserver les nombres de Froude et de Reynolds, ce qui conduit à une incompatibilité.

Le problème est théoriquement insoluble. Pour lui donner une solution pratique W. Froude imagina l'artifice suivant :

Il pose

$$R = R_f + R_d \quad (7)$$

où R_f est la résistance de frottement et R_d une résistance résiduaire que nous avons déjà mentionnée.

Il admet en outre :

$$R_f = L^2 \cdot V^2 \cdot \rho \cdot f_1\left(\frac{LV}{\nu}\right) \quad (8)$$

$$R_d = L^2 \cdot V^2 \cdot \rho \cdot f_2\left(\frac{V^2}{gL}\right) \quad (9)$$

Les résistances R_f et R_d n'étant pas mesurables directement, l'on opère comme suit :

On calcule R_f et R_{fm} par une formule déduite d'essais sur plans minces. On mesure R_m au bassin d'essai et l'on admettra pour la résistance globale R du bateau :

$$R = (R_m - R_{fm}) \left(\frac{L}{L_m}\right)^3 + R_f \quad (10)$$

On peut adresser à cette méthode des critiques que nous ne pouvons exposer ici, faute de place. Ces objections sont théoriquement fondées, mais jusqu'à présent on n'a pas proposé de meilleure méthode. Moyennant quelques précautions et corrections on obtient des résultats suffisamment

approchés, les erreurs restant sensiblement de l'ordre de grandeur des écarts dans les mesures sur le navire lui-même.

Périodiquement les directeurs des différents bassins d'essais se réunissent afin de codifier et unifier le plus possible les méthodes de recherche, dans le but de rendre comparables les résultats obtenus.

Séries standards de Taylor

En 1911 et 1933, Taylor a publié des résultats d'essais sur une série de modèles dérivant d'un navire type choisi pour ses bonnes qualités.

On peut, à l'aide des diagrammes de Taylor, calculer en fonction des coefficients caractéristiques du navire :

1. La résistance résiduaire ;
2. La résistance de frottement.

C. ESSAIS SUR MODÈLES RELATIFS À LA PROPULSION DU NAVIRE

Lorsqu'on a déterminé, au moyen d'essais sur modèles réduits, la résistance de remorque R kg de la carène avec appendices, à une vitesse de route V m/sec, il reste à déterminer la puissance propulsive nécessaire à la propulsion du navire à cette vitesse.

Cela revient à prédéterminer le rendement global de la propulsion

$$\eta_p = \frac{RV}{S}$$

S étant la puissance torsionométrique en kgm/sec, nécessaire sur l'arbre porte-hélice.

On a

$$S = 2\pi nM \quad (11)$$

avec

n : nombre de tours par seconde ;
 M : couple sur l'arbre.

Si V_e est la vitesse relative moyenne d'arrivée de l'eau au propulseur, on appelle coefficient de sillage la fraction s définie par

$$s = 1 - \frac{V_e}{V} \quad (12)$$

Si P est la poussée nécessaire à l'entretien de la vitesse V pour l'ensemble coque et propulseur, on appelle coefficient de succion la fraction t définie par

$$t = 1 - \frac{R}{P} \quad (13)$$

Enfin on appelle coefficient d'efficiences rotative relative le rapport η_r du rendement de l'hélice tournant derrière la coque au rendement de l'hélice en eau libre.

On a donc

$$\eta_p = \frac{(1-t)}{(1-s)} \cdot \eta_r \cdot \eta_h \quad (14)$$

η_h étant le rendement de l'hélice en eau libre à la vitesse de translation V_e .

Pour analyser complètement le phénomène de la propulsion, il faut pouvoir prédéterminer, par des expériences sur modèles, les divers facteurs du rendement propulsif.

Aussi la méthode des essais sur modèles présente-t-elle diverses modalités qui se complètent mutuellement.

Les conditions de la similitude mécanique complète des mouvements de deux hélices semblables en eau illimitée sont les suivantes :

$$\frac{V_e}{n\phi} = \text{constante (loi de Newton).}$$

$$\frac{n^2\phi}{g} = \text{constante (loi de Froude).}$$

$$\frac{n\phi^2}{\nu} = \text{constante (loi de Reynolds).}$$

$$\frac{p_s - p_t}{\rho V_e^2} = \text{constante (nombre de Thoma).}$$

Dans ces expressions ϕ désigne le diamètre de l'hélice et $p_s = p_a + \rho gh$ la pression hydrostatique,

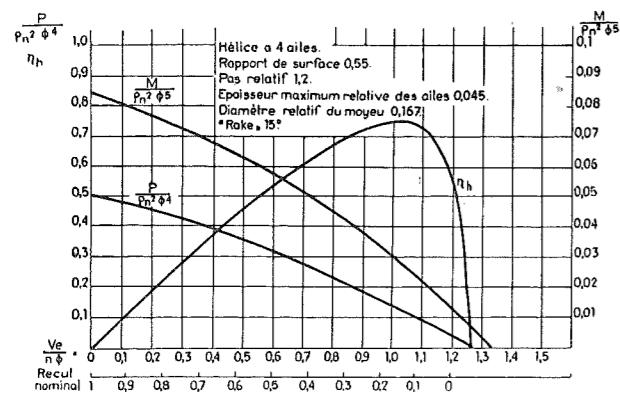


FIG. 3.

que au niveau de l'axe de l'hélice, p_a étant la pression atmosphérique.

Comme dans tout essai sur modèle il est impossible de satisfaire simultanément à ces quatre conditions.

D. ESSAIS DE MODÈLES D'HÉLICES EN ROUTE LIBRE

Les modèles d'hélices, entraînés par de petits moteurs électriques, sont remorqués au bassin et des appareils enregistreurs relèvent la vitesse de translation, la vitesse de rotation, le couple d'entraînement et la poussée de l'hélice.

L'échelle des longueurs étant choisie, on peut en principe satisfaire à deux des conditions précédentes par le choix de l'échelle de V_e et de n .

On y renonce dans le cas actuel, parce que, d'une part si l'on s'impose d'essayer les modèles d'hélices à une immersion telle que leur axe se trouve à une profondeur au moins égale à leur diamètre, la pesanteur intervient très peu et la condition de Froude peut être négligée, et parce

que, d'autre part, la condition de Reynolds conduirait à des valeurs pratiquement irréalisables pour la vitesse de translation et le nombre de tours.

On se borne à satisfaire à la seule condition

$$\frac{V_e}{n\phi} = \text{constante.}$$

La similitude ainsi réalisée approximativement est une similitude partielle qui ne s'étend pas aux pressions absolues. Elle n'est acceptable qu'en l'absence de cavitation.

L'influence de la viscosité est loin d'être négligeable et donne lieu non seulement à des pertes d'énergie par frottement, mais encore à la possibilité d'existence de régimes d'écoulement différents autour de certaines parties des ailes du modèle et de l'hélice réelle.

Mais, étant donné que l'on dispose d'une grande liberté dans le choix de l'échelle de V_e et de n , on peut prendre pour le modèle, soit une vitesse de translation, soit une vitesse de rotation telles que la plus grande partie des ailes du modèle fonctionne sûrement en régime supra-critique, ainsi qu'il en est pour l'hélice réelle, conformément aux diagrammes établis par Gutsche en vue de ce choix.

Dans ces conditions on peut transférer les résultats du modèle à la réalité avec une approximation suffisante pour les besoins de la pratique, l'erreur sur le rendement ne dépassant pas 5 %.

On a

$$\frac{V_e}{n\phi} = \text{constante ; } \frac{P}{\rho n^2 \phi^4} = f_1 \left(\frac{V_e}{n\phi} \right) ;$$

$$\frac{M}{\rho n^2 \phi^5} = f_2 \left(\frac{V_e}{n\phi} \right) \text{ et } \eta_h = \frac{f_1}{2\pi f_2} \cdot \frac{V_e}{n\phi}.$$

La figure 3 donne un exemple des courbes caractéristiques relatives à une famille d'hélices géométriquement semblables, obtenues de cette manière. Divers auteurs ont publié les résultats d'essais systématiques sur des séries de modèles d'hélice de caractéristiques variées et ces données sont couramment utilisées pour établir les projets d'hélices.

La méthode est en défaut dans le cas où la cavitation se produit. L'étude de la naissance de la cavitation et du fonctionnement des hélices cavitantes s'effectue dans des tanks spéciaux, où l'on peut faire varier p_s et p_t en agissant sur la pression et la température de l'eau en circuit ⁽¹⁾.

La forme rationnelle des formules définissant la limite de cavitation est

$$\frac{P}{\Omega} = f \left(\frac{p_s - p_t}{\frac{1}{2} \rho V_e^2} \right).$$

⁽¹⁾ HANS EDSTRAND, *The Test Tunnel for Ship Propellers at A. B. Karlstads Mekaniska Werkstad (Teknisk Tidsskrift, volume 20, année 1944).*

Ω étant la surface projetée totale des ailes de l'hélice.

Une formule de ce type a notamment été établie statistiquement au bassin d'essai de Wageningen.

E. ESSAIS EN AUTOPROPULSION

Le fonctionnement de l'hélice à l'arrière de la carène est beaucoup plus complexe que celui de l'hélice en eau libre. L'hélice fonctionne en effet dans un champ de vitesse relative qui, indépendamment de sa variation dans le temps, présente une triple variation spatiale : axiale, radiale et périphérique.

De plus les actions mutuelles de l'hélice et de la coque modifient à la fois la poussée de la première et la résistance de la seconde.

On a été amené naturellement à étudier sur modèle l'ensemble de l'appareillage propulsif du navire. Dans ce but le modèle est muni d'une ou de plusieurs petites hélices entraînées par moteurs électriques installés à bord du modèle. On règle la vitesse de rotation de l'hélice de manière à réaliser la propulsion du modèle à la vitesse moyenne de la plate-forme et on relève, au moyen d'appareils enregistreurs, les quantités, V , P , M et n . Le transfert des résultats du modèle à la réalité ne peut s'effectuer que d'une façon approximative, de même d'ailleurs que dans le cas des essais de remorquage des modèles de carènes.

F. ANALYSE DE LA PROPULSION

Au moyen des résultats des trois essais passés en revue : essai de remorquage du modèle de carène, essai sur modèle d'hélice en eau libre, essai de carène en autopropulsion, on peut déterminer tous les facteurs de la propulsion et analyser complètement les divers éléments du phénomène.

On peut ainsi se rendre compte des influences mutuelles de la coque et de l'hélice, étudier les facteurs externes de la propulsion : succion et sillage, rechercher les meilleures dispositions des appendices et du gouvernail, en un mot déterminer les moyens propres à améliorer le rendement global de la propulsion.

IV. Essais sur maquettes d'avions dans les tunnels aérodynamiques

A. GÉNÉRALITÉS

L'utilisation des souffleries aérodynamiques est basée sur deux principes :

1° Le principe de la relativité, d'après lequel l'action d'un fluide sur un corps ne devrait dépendre que du mouvement relatif de l'un par rapport à l'autre. Il serait indifférent que le corps se déplace par rapport au fluide au repos (cas d'un avion) ou que le courant d'air souffle sur

un corps immobile (maquette dans une soufflerie). Il est bien entendu que ce principe n'est destiné à être appliqué qu'aux mouvements rectilignes et sans accélération.

2° Le principe de similitude selon lequel, pour deux écoulements d'un fluide géométriquement et cinématiquement semblables, il existe un rapport simple et constant entre les forces en jeu respectivement dans chacun de ces deux mouvements. Les limitations à la similitude sont du même ordre que pour les essais sur modèles dans les autres branches de la technique. Dans le domaine spécial de l'aérodynamique la condition de Mach peut acquérir une importance considérable. La rapidité avec laquelle une perturbation quelconque, et en particulier le son, se propage dans un fluide, dépend de sa compressibilité. Dans un fluide incompressible la vitesse du son est infiniment grande. Aussi longtemps que les vitesses rencontrées en aviation restaient bien inférieures à celle du son, on pouvait sans grande erreur négliger l'influence de la compressibilité de l'air. Jusqu'en ces temps derniers ce n'étaient que les vitesses périphériques des extrémités des pales d'hélices qui se rapprochaient et dépassaient même la vitesse du son. Par contre, depuis la guerre mondiale 1939-1945, ce sont les vitesses d'avancement de l'avion tout entier qui ont tendance d'atteindre et de dépasser la vitesse du son.

La loi de Froude $\frac{V^2}{gL} = \text{constante}$ ($L =$ dimension linéaire de référence) n'intervient que faiblement pour les grands dirigeables; elle est absolument négligeable pour l'avion et sa maquette réduite.

B. MOYENS EXPÉRIMENTAUX ⁽¹⁾

Voici comment une soufflerie est habituellement constituée (fig. 4).

Un ventilateur Z aspire l'air à travers une chambre d'expériences E, dans laquelle sont pla-

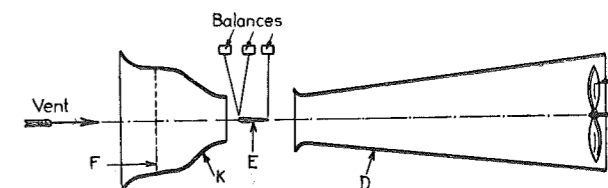


FIG. 4.

cées les maquettes à essayer. Celles-ci sont reliées à des balances qui permettent de mesurer les composantes de la réaction de l'air sur la maquette.

On utilise des balances à trois composantes pour mesurer la portance, la traînée et le moment autour d'un axe perpendiculaire au plan de symétrie, qu'on appelle moment de tangage, ceci quand l'écoulement possède un plan de symétrie.

⁽¹⁾ REBUFFET, *Aérodynamique expérimentale.*

On a recours aux balances à six composantes, définissant complètement l'équilibre des forces sur un corps solide, si l'on veut étudier une composition dissymétrique, qui résulte par exemple d'un braquage d'ailerons ou du gouvernail de profondeur ou d'une disposition oblique de la maquette par rapport à l'axe de la soufflerie.

Avant de pénétrer dans la chambre d'expériences, le courant d'air passe, dans les souffleries modernes, par une chambre de tranquillisation. La section de celle-ci est au moins quatre fois plus grande que celle de la veine d'expérience. La chambre de tranquillisation est précédée par un filtre F qui sert à uniformiser le courant, lequel gagne ensuite à travers le collecteur K la chambre d'expériences proprement dite. En sortant de cette chambre, le courant s'engouffre dans le diffuseur conique D dans lequel la grande vitesse, qui règne à l'endroit de la maquette, est en majeure partie transformée en pression. L'ouverture du cône du diffuseur ne peut pas dépasser 7° environ, sous peine de voir apparaître un décollement du courant des parois du diffuseur, ce qui se traduirait par une forte augmentation des pertes de charge et, par conséquent, de la puissance motrice nécessaire au maintien de la vitesse voulue du courant d'air.

Le collecteur et le diffuseur peuvent être reliés à l'endroit où s'effectuent les expériences par une gaine à peu près cylindrique; cette disposition, appelée « veine fermée », est avantageuse quant à l'économie de puissance (fig. 5).

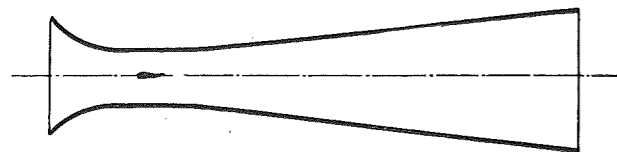


Fig. 5.

Par contre, dans une veine ouverte non guidée, entre le collecteur et le diffuseur, sur une longueur à peu près égale au diamètre de la veine, on a plus de facilités pour le montage expérimental et la fixation de la maquette aux balances (fig. 6). Cependant cette interruption de la cana-

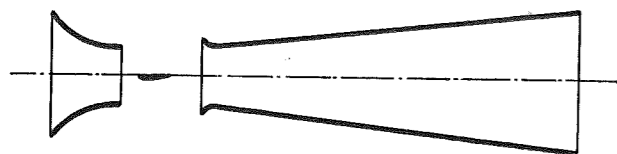


Fig. 6.

lisation de la veine constitue une perte de charge supplémentaire et nécessite de ce fait une augmentation de puissance motrice.

Pour ce qui concerne la provenance de l'air il peut se présenter l'une ou l'autre des deux dispositions suivantes :

Dans la première disposition, que l'on appelle

« circuit fermé », l'air aspiré par le ventilateur est renvoyé par une canalisation appropriée vers l'entrée de la chambre de tranquillisation et le collecteur, d'où il est à nouveau aspiré. C'est le même air qui circule continuellement à travers la chambre d'expériences.

Dans la deuxième disposition on place la soufflerie dans un grand hall. On y puise l'air du côté du collecteur et on le rejette par le diffuseur. Dans l'ensemble du hall l'air est presque en repos. L'air qui traverse la chambre d'expériences est constamment renouvelé.

Dans de très grandes souffleries, on renonce même au hall et l'on puise et rejette l'air à l'extérieur. On est alors à la merci des conditions météorologiques et les perturbations atmosphériques influencent défavorablement la régularité du courant dans la chambre d'expériences.

Ce genre de soufflerie, appelé « à retour libre », a été souvent utilisé par le passé, surtout en France et en Angleterre. L'ancienne soufflerie de Rhode-Saint-Genèse (près de Bruxelles) est de ce type, ainsi que celle d'Eiffel à Paris.

La plupart des souffleries modernes sont à circuit fermé. Le retour s'effectue, soit dans un plan vertical, soit dans un plan horizontal, par un canal ou par deux canaux disposés des deux côtés de la chambre d'expériences. Les coudes du canal de retour sont munis d'aubes directrices en forme de profils d'aile à très forte courbure.

C. QUELQUES PARTICULARITÉS DES ESSAIS AÉRODYNAMIQUES

En ce qui concerne les nombres de Reynolds on peut dire que, quoique dans certains cas on puisse opérer avec des nombres bien différents pour la maquette et l'avion, il est le plus souvent avantageux de les rapprocher le plus possible, c'est-à-dire d'augmenter ceux de la maquette qui sont en général plus petits que ceux de l'avion. Dans ce but on a construit des souffleries de plus en plus grandes, avec des vitesses de plus en plus élevées, absorbant des puissances qui ont, pendant la dernière guerre, en Amérique et en Allemagne, atteint plusieurs dizaines de milliers de chevaux. On peut s'imaginer le coût de pareilles installations.

Un autre moyen d'augmenter le nombre de Reynolds consiste à diminuer le coefficient cinématique de viscosité $\nu = \frac{\mu}{\rho}$, où μ , coefficient de viscosité dynamique du fluide, est peu variable avec la pression et la température. On voit qu'on peut diminuer ν en augmentant ρ , par une compression de l'air. Des tunnels utilisant de l'air comprimé ont été effectivement construits, ce qui a permis de réaliser des nombres de Reynolds très élevés. Un tunnel américain, dans lequel on pouvait comprimer l'air jusqu'à 20 atmosphères, fournissait, pendant tout un temps, des renseignements considérés les plus sûrs quant à leur application aux avions en vraie grandeur.

Il existe un autre facteur qui peut, dans certaines circonstances, fausser les résultats obtenus au tunnel. Ce facteur est la turbulence du courant d'air. Suivant le principe de relativité on peut souffler sur une maquette au lieu de la déplacer dans l'air immobile.

Toutefois il faut que le courant soit absolument homogène et que les vitesses soient uniformément réparties. Il faut même, pour être rigoureux, que le courant s'étende jusqu'à l'infini, de même que l'air immobile avec lequel on le compare. Cette dernière restriction peut d'ailleurs être levée en apportant les corrections que la théorie permet d'établir pour les essais effectués dans une veine dont les dimensions sont nécessairement restreintes. Mais il n'en reste pas moins vrai que le courant d'air d'une soufflerie n'est jamais complètement homogène et qu'il est toujours entaché d'une turbulence plus ou moins marquée. Quoi qu'il en soit, il faut réduire autant que possible la turbulence de la veine, pour que les résultats des essais de soufflerie soient utilisables pour juger du comportement d'un avion volant en air calme.

La compressibilité de l'air commence à faire sentir ses effets lorsque le nombre de Mach

$$Ma \left(= \frac{\text{vitesse du courant}}{\text{vitesse du son}} \right)$$

s'approche de 0,5.

Avec l'augmentation de Ma le caractère de l'écoulement se modifie de plus en plus et, arrivé à la région transsonique ($0,8 < Ma < 1,2$), toute expérimentation dans une soufflerie devient impossible à cause des phénomènes à caractère oscillatoire qui apparaissent au sein d'une veine de dimensions finies en régime transsonique. Lorsque $Ma > 1,2$ on dit que l'on se trouve dans la région supersonique.

Pour atteindre des nombres de Mach élevés, tout en maintenant la puissance à fournir dans des limites acceptables, on peut recourir à une évacuation partielle de l'air circulant dans la soufflerie, qui fonctionne alors à une pression inférieure à celle de l'atmosphère. On diminue ainsi la vitesse du son.

V. Mesures hydro- et aérodynamiques

MESURE DES DÉBITS PAR APPAREILS DÉPRIMOGENES

La méthode de mesure du débit des conduites sous pression au moyen d'appareils déprimogènes, tuyères, diaphragmes et tubes de Venturi, consiste à créer dans le courant un étranglement local. A l'accroissement de vitesse qui en résulte correspond une chute de pression dont la mesure permet de déterminer le débit.

Dans le cas des fluides incompressibles, ou pou-

vant être considérés comme tels, il existe, pour un type d'appareil donné, une relation

$$f(V, \sigma, \Delta p, \mu, \rho, g, \frac{\omega}{\Omega}) = 0 \quad (15)$$

V : vitesse d'écoulement dans la conduite ;

$\frac{\omega}{\Omega}$: $\frac{\text{section de sortie de l'appareil}}{\text{section de la conduite}}$

ϕ : diamètre de la conduite ;

Δp : pression différentielle relevée entre deux sections convenablement choisies à l'amont et à l'aval de l'appareil.

En appliquant la propriété de Vaschy-Buckingham (§ III, B) l'équation (15) peut se transformer en :

$$Q = \Omega \sqrt{g \Delta h} \cdot f \left(\frac{\omega}{\Omega} ; \frac{V \phi}{\rho} \right)$$

$$\frac{V \cdot \phi}{\rho} = Re = \text{nombre de Reynolds} \quad (16)$$

Q étant le débit en volume et $\Delta h = \frac{\Delta p}{\rho g}$.

L'expression classique est, avec un coefficient de débit α ,

$$Q = \alpha \omega \sqrt{2 g \Delta h}$$

d'où

$$\alpha = f \left(\frac{\omega}{\Omega}, Re \right). \quad (17)$$

Ce résultat permet d'ordonner les résultats expérimentaux et notamment de larer, lorsque cela présente plus de facilité, les appareils déprimogènes avec d'autres fluides que ceux pour lesquels ils doivent normalement être utilisés. Nous reproduisons à la figure 7 une série de résultats obtenus par Witte en opérant sur de l'huile, de l'eau et de la vapeur d'eau. C'est sous la forme de

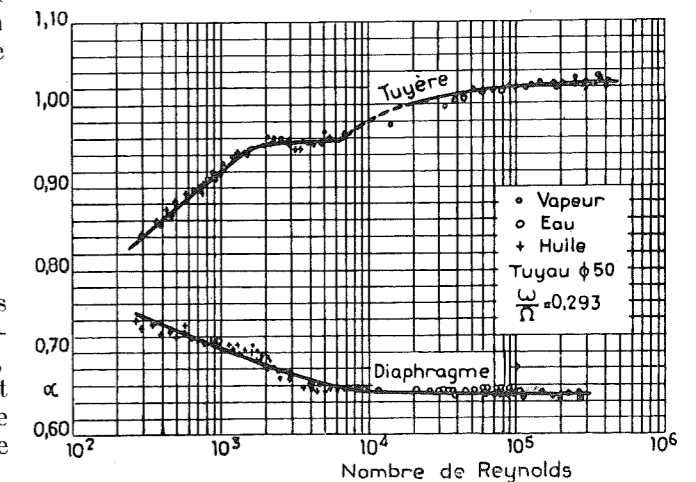


Fig. 7.

diagrammes, donnant la variation de α en fonction du nombre de Reynolds pour différentes valeurs maintenues constantes de $\frac{\omega}{\Omega}$, que la normalisation actuelle des appareils déprimogènes est présentée.

L'allure de la variation de α en fonction de $Re = \frac{V\phi}{\mu}$, pour un rapport $\frac{\omega}{\Omega}$ donné, montre

que, à partir d'une certaine valeur du nombre de Reynolds, le coefficient de débit reste constant.

On sait que le nombre de Reynolds caractérise le rapport des forces de viscosité aux forces d'inertie. Une faible valeur du nombre de Reynolds indique que les premières sont prépondérantes. Pour les valeurs élevées de ce paramètre, au contraire, la turbulence masque les effets de la viscosité, ce qui explique la constance du coefficient de débit.

L'adoption des valeurs du coefficient de débit normalisées exige le respect absolu de la similitude géométrique. Aussi les normes définissent-elles de manière très précise les proportions des appareils standards. Il faut tenir compte également de la rugosité, dont l'effet est de modifier la répartition des vitesses dans l'écoulement.

A l'effet de rugosité se superpose, pour les diaphragmes, l'influence d'un éventuel défaut d'acuité de l'arête de l'orifice. Cette influence est évidemment d'autant plus marquée que le diamètre est faible. Un arrondi de l'arête, diminuant la contraction de la veine, a pour effet d'augmenter le coefficient de débit. Il s'introduit ainsi une incertitude supplémentaire quant à la valeur de ce dernier.

Enfin, dans le cas où le fluide mis en œuvre ne peut être considéré comme incompressible, le coefficient de débit α doit être multiplié par un facteur sans dimension, appelé « coefficient de compressibilité » dont on calcule la valeur en admettant que la détente du fluide à la traversée de l'appareil s'effectue suivant une loi adiabatique. Le coefficient de compressibilité est fonction de $\frac{\omega}{\Omega}$, du rapport des pressions aval et amont et du rapport γ des chaleurs spécifiques à pression constante et à volume constant.

VI. Conclusions générales et vues d'avenir

Il n'est pas téméraire d'affirmer qu'une grande part des progrès récents réalisés dans le domaine des turbo-machines (turbines hydrauliques ou à vapeur, pompes, compresseurs, hélices, etc.) sont dus à la généralisation des études sur modèles. Cette méthode extrêmement féconde a permis d'améliorer les rendements, d'accroître les vitesses, d'étendre le champ d'application des machines et d'augmenter la sécurité de fonctionnement. On peut être convaincu qu'elle est encore

susceptible d'amener d'autres progrès importants.

La méthode des essais sur modèles trouve en architecture navale un vaste champ d'application, où diverses modalités expérimentales sont utilisées concurremment et se complètent mutuellement.

Il faut encore ajouter aux essais précédemment décrits les essais destinés à l'étude du sillage, des girations, de l'action du gouvernail et de la tenue à la mer.

Enfin les essais sur modèles des bateaux destinés à naviguer en eau limitée (canaux) soulèvent des problèmes spéciaux et requièrent des méthodes particulières d'interprétation en raison des éléments supplémentaires de complication introduits par les parois limitantes.

La principale tendance qui se manifeste de plus en plus au cours de la période actuelle d'évolution des essais sur modèles est la recherche d'une confirmation complète des approximations admises par l'organisation méthodique d'essais à la mer, en vue de la mise en parallèle des résultats des deux méthodes de mesure. Ce prolongement des bassins d'essais à la mer est de nature à conduire à des perfectionnements importants des méthodes mises en œuvre, propres à augmenter la valeur des prévisions faites dans les bassins.

La reprise des conférences internationales entre les dirigeants des bassins d'essais des divers pays ne manquera pas d'accroître le rythme des progrès futurs en cette matière.

Il ne nous paraît pas dénué d'intérêt de donner ici quelques renseignements concernant les nouvelles installations aérodynamiques actuellement en construction à Rhode-Saint-Genèse, pour compte de l'Administration de l'Aéronautique du Ministère des Communications. Ces installations, sans atteindre les dimensions et puissances gigantesques utilisées dans les grands pays, doteront la Belgique d'instruments de recherche modernes et universels, à défaut desquels aucun espoir n'est permis pour le développement de l'industrie aéronautique.

Le nouveau bâtiment comprendra :

1° Un tunnel supersonique permettant de réaliser, à une pression de 1/10 atmosphère, et dans une section de 0 m 40 x 0 m 40, une vitesse triple du son. Puissance nécessaire : 1.000 CV environ.

2° Un tunnel à circuit fermé permettant de réaliser :

a) Soit une vitesse de 70 m/sec dans une veine ouverte de 3 mètres de diamètre ;

b) Soit une vitesse de 100 m/sec dans une veine fermée de 2 mètres de diamètre.

Ces deux variantes s'obtiennent par l'utilisation d'éléments interchangeables du diffuseur. La puissance utilisée de 1.000 CV est fournie par le même groupe Ward-Léonard que pour le tunnel supersonique.

3° En tournant un des coudes du tunnel mentionné au 2°, et en éclipsant sa balance, on peut

obtenir, soit un tunnel à veine inclinable, soit un tunnel vertical pour l'étude de la vrille.

Jusqu'à présent les souffleries servaient surtout à la mesure, au moyen d'une balance, des réactions de l'air sur une maquette de forme donnée. Maintenant on commence aussi à construire d'autres souffleries dans lesquelles on peut suivre les évolutions d'un avion. La maquette est alors laissée complètement libre dans un courant d'air de vitesse et de direction déterminées.

**

Il reste au rapporteur la tâche agréable d'adresser ses remerciements à tous ceux qui ont bien voulu apporter leur concours à la rédaction de la présente note :

L'Administration royale suédoise des Chutes

d'eau, Kungl. Vattenfallsstyrelsen, à Stockholm ;

La firme A. B. Karlstads Mekaniska Werkstad à Kristinehamn, Suède ;

La firme Escher-Wyss, Zurich, Suisse ;

M. N. Florine, Ingénieur d'Aéronautique attaché à l'Administration de l'Aéronautique du Ministère des Communications ;

M. A. Jorissen, Associé du F. N. R. S., Chef de travaux à l'Université de Liège ;

M. S. Lastchenko, Ingénieur des Constructions navales, attaché à la S. A. John Cockerill à Hoboken-Anvers ;

M. Alb. Schlag, Professeur à l'Université de Liège ;

M. R. Spronck, Professeur à l'Université de Liège.

Discussion

M. SCHLAG, Professeur à l'Université de Liège. — La technique des essais sur modèles constitue une application de la théorie très générale de la similitude.

Le théorème fondamental de cette théorie est sans doute le théorème de Vaschy-Buckingham qui peut s'énoncer ainsi : « S'il existe une relation (connue ou non sous forme explicite) entre n grandeurs mécaniques (longueurs, forces, temps, vitesses, etc.) intervenant dans un phénomène et dépendant de p unités fondamentales (M, L, T, etc.), cette relation entraîne l'existence d'une autre relation entre $n - p$ coefficients sans dimensions, qui sont des produits de puissances des n premières grandeurs. »

Il y a similitude mécanique entre les deux phénomènes, quand il y a égalité de ces coefficients sans dimensions ; ces égalités expriment donc les conditions de similitude.

C'est en mécanique des fluides que la théorie de la similitude et la méthode des essais sur modèles ont trouvé leurs premières applications et, vraisemblablement, que les résultats obtenus ont été les plus féconds. Sans doute faut-il trouver là la raison pour laquelle le rapporteur a choisi tous ses exemples dans ce domaine de la mécanique des fluides.

Il convient cependant de souligner que la théorie de la similitude peut s'appliquer bien en dehors des problèmes de mécanique. Elle est utilisée très largement en hydraulique fluviale et maritime, pour l'étude de l'action du vent sur les constructions, pour l'étude des ponts, charpentes, barrages, etc. Plus récemment, le vaste domaine de l'électricité lui a été ouvert et il semble déjà que des résultats très importants puissent y être atteints.

En revenant à la mécanique, signalons que les problèmes d'échange de chaleur entre fluides ne se traitent plus maintenant scientifiquement qu'à la lumière des principes de similitude et que les lois qui traduisent les phénomènes ne s'expriment

plus qu'en fonction de coefficients sans dimensions (coefficients de Nusselt, de Prandtl, de Péclet, etc.).

En résistance des matériaux, la plupart des problèmes, sinon tous, peuvent être traités selon des conceptions de similitude. Pour mettre en tableaux, diagrammes ou abaques, les résultats du calcul de pièces quelque peu compliquées (frettes, volants, pistons), la méthode qui donne la représentation la plus générale recourt aux coefficients sans dimensions caractéristiques de la théorie de la similitude.

Les vibrations d'aubages de turbine sont étudiées sur modèles.

A l'exposition ouverte en ce moment au Val-Benoît, figurent :

Un dispositif d'essai sur modèle, d'une tuyauterie, pour l'étude de son aptitude élastique à absorber les dilatations dues à une augmentation de température ;

Les modèles utilisés par le professeur Piccard pour étudier la résistance à l'écrasement de la cabine de son bathyscaphe, sous l'effet d'une pression extérieure.

En résumé, on peut dire que la théorie de la similitude et son application à la technique des essais sur modèles couvrent un vaste domaine, en fait tout le domaine des sciences dont les lois peuvent se traduire par des relations de forme mathématique.

Cette théorie constitue ainsi une véritable doctrine et il importe que les ingénieurs s'accoutument à penser et à raisonner à la lumière de ses principes. Ils y trouveront un outil précieux pour de nouvelles découvertes et une base solide de synthèse de leurs connaissances.

Il était donc logique que l'Exposition de l'A. I. Lg. ait réservé un stand particulier à ce moyen précieux de recherche scientifique et de contrôle, et que notre Congrès ait voulu que cette question figurât également à l'ordre du jour de ses travaux.

CENTENAIRE

de l'Association des Ingénieurs
sortis de l'Ecole de Liège (A. I. Lg.)

CONGRÈS 1947

SECTION MÉCANIQUE

EDITEUR : A. I. Lg.
QUAI PAUL VAN HOEGAERDEN, 12
LIÈGE