Communication présentée
au Comité Technique de la Société Hydrotechnique de France
le 20 mars 1964

UNE MÉTHODE DE MESURE DES DÉBITS AU MOYEN DE MOULINETS DANS LES PERTUIS D'ENTRÉE DES USINES HYDRO-ÉLECTRIQUES DE BASSE CHUTE

PAR
R. BONNAFOUX *

1. — Objet

La mesure des débits turbinés dans les usines hydroélectriques de basse chute, équipées de groupes Kaplan à axe vertical, pose des problèmes assez délicats, dus principalement à deux raisons; l'une est que les ouvrages d'aménée sont ici excessivement courts et fortement convergents, comme le montre la figure 1, ce qui interdit de trouver une section de jaugeage où règne un écoulement parallèle. La seconde tient aux dimensions importantes des pertuis d'entrée qui rendent difficile, voire prohibitive, une exploration minutieuse du champ des vitesses ponctuelles : c'est ainsi que, dans les usines mises en service depuis quelques années sur le Rhin et sur le Rhône, les ouvrages d'aménée de chaque groupe sont constitués par trois pertuis

offrant chacun, au droit des rainures à batardeau, une section droite de l'ordre de 60 à 80 m². A ces deux difficultés, il faut ajouter un facteur qui tient à la nature même des turbines Kaplan : du fait de l'existence des deux paramètres que constituent l'ouverture du distributeur et l'inclinaison des pales, la détermination du rendement d'une telle turbine exige la prise en considération d'au minimum 25 à 30 régimes différents, pour une seule hauteur de chute nette.

Il s'agissait donc de trouver une méthode qui, d'une part permette de mesurer le débit avec toute la précision requise pour des essais de rendement et qui, d'autre part, réduise au minimum la durée d'immobilisation du groupe. Ajoutons qu'en l'état actuel des choses, pour des hauteurs de chute aussi faibles (de 10 à 20 m) et des débits aussi importants (de 150 à 350 m³/s), la mesure du débit par jaugeage au moulinet était le seul procédé envisageable.

C'est ainsi que la Division « Essais Extérieurs » du Centre de Recherches et d'Essais de Chatou d'Electricité de France a été amenée à mettre au point une technique de jaugeage qu'elle a pu appliquer avec succès aux usines de Vogelgrün et de Marckolsheim, sur le Rhin et de Baix-Logis Neuf, sur le Rhône. C'est cette méthode que nous nous proposons d'exposer maintenant, en montrant comment les principales difficultés ont pu être surmontées et en indiquant les points sur lesquels des recherches ultérieures doivent permettre de nouveaux progrès (en particulier quant à une meilleure connaissance des lois de réponse des moulinets en écoulement oblique).

1/ Coupe dans l'axe d'un groupe.
Longitudinal section through a unit.

* E.D.F., Centre de Recherches et d'Essais de Chatou.

2. — Exposé de principe de la méthode utilisée

2.1. Jaugeage en écoulement parallèle.

Nous rappellerons d'abord la méthode de jaugeage que nous utilisons lorsque le plafond et le radier des pertuis sont sensiblement parallèles ou faiblement convergents, c'est-à-dire lorsqu'en tout point de la section de jaugeage, la direction de la vitesse ne s'écarte que peu de la normale à la section (l'emploi d'hélices autocomposantes donnant directement la projection de la vitesse sur la normale permet de négliger les petits écarts angulaires éventuels).

2.1.1. JAUGEAGE PAR INTÉGRATION CONTINUE.

En vue de réduire considérablement à la fois le temps nécessité par les essais et la masse des calculs de dépouillement, un mode de jaugeage paraissait particulièrement séduisant : le jaugeage par intégration continue. Rappelons que ce procédé classique consiste à explorer la répartition des vitesses le long d'une verticale, non plus en faisant successivement stationner le moulinet en un certain nombre de points, mais en le déplaçant à vitesse rigoureusement constante tout le long de la verticale, ce qui fournit une mesure directe de la vitesse moyenne sur celle-ci. Si on prend certaines précautions, notamment que la vitesse de translation du moulinet n'excède pas 5 % de la vitesse moyenne de l'écoulement, on peut admettre que le mouvement du moulinet reste sans effet sur sa réponse.

Il suffit donc de disposer d'une perche horizontale portant un certain nombre de moulinets, une dizaine par exemple, pour balayer toute la surface du pertuis et obtenir ainsi la répartition des vitesses moyennes par verticale; il ne restera qu'à planimétrer la courbe représentative de cette répartition pour obtenir la valeur du débit.

2.1.2. ZONES NON EXPLORÉES.

Il faut toutefois tenir compte que, pour des raisons matérielles évidentes, la course du moulinet s'arrête nécessairement à une certaine distance du radier ou du fond, c'est-à-dire, si on se reporte au profil des vitesses représenté figure 2, que l'on explore non toute la verticale AB, mais seulement le segment A'B'. La méthode employée conduirait donc à adopter comme débit élémentaire sur la verticale AB la valeur représentée par l'aire A'B'D'C' multipliée par $AB/A'B'$, tandis que la vraie valeur est celle représentée par l'aire ABDC.

Pour remédier à cela, on peut évidemment adopter des dispositions constructives telles que les zones non explorées AA' et BB' soient réduites au minimum, mais on sera néanmoins contraint de déterminer un coefficient correctif, ce qui ne peut se faire qu'en relevant point par point le profil des vitesses.

2.1.3. STATIONNEMENTS.

Cette mesure des vitesses ponctuelles s'effectue en faisant successivement stationner la perche porte-moulinets en un certain nombre d'horizontales réparties sur la hauteur du pertuis; on peut alors tracer le profil des vitesses sur une verticale, l'extrapoler au voisinage des parois en tenant compte à la fois de la tendance de la courbe relevée

et de lois mi-théoriques mi-empiriques, et intégrer graphiquement cette courbe. En comparant la valeur ainsi obtenue à celle donnée par la méthode d'intégration continue pour le même régime, on détermine la correction à appliquer pour des régimes voisins mesurés seulement par intégration continue. On peut, en effet, légitimement admettre que la répartition des vitesses reste sensiblement la même pour des débits peu différents, et on se contente d'effectuer des jaugeages par stationnement pour quatre ou cinq valeurs du débit convenablement réparties dans la gamme des débits à explorer (une pour chaque valeur de l'inclinaison des pales par exemple).

Un jaugeage par stationnement est, en effet, une opération assez longue pouvant demander jusqu'à deux ou trois heures; outre la perte de temps ainsi occasionnée, ceci exige donc une excellente stabilité du régime. Cette stabilité peut être attestée par un moulinet témoin qui est laissé fixe pendant toute la durée de l'opération, mais il est généralement plus simple de vérifier seulement la constance du débit à l'aide des relevés d'un contrôle piézométrique dans la bêche spirale et de celle des autres caractéristiques du régime (ouvertures, puissance électrique, hauteur de chute).

Le coefficient correctif ainsi déterminé, qui peut être positif ou négatif, n'excède généralement pas 0,5 %.

2/ Profil des vitesses le long d'une verticale.
Velocity profile along a vertical.

2.2. Jaugeage en écoulement convergent.

Malheureusement, si la conicité des conduits hydrauliques reste souvent faible dans les usines équipées de groupes bulbes, de telle sorte que la méthode que nous venons de décrire a pu être appliquée par exemple à Cambeyrac et à Saint-Malo (*), il n'en est absolument pas de même dans les usines équipées de groupes Kaplan à axe vertical,

(*) J. DUCLOS et S. OBOLSKY. — Essais des turbines-pompes de l'usine de Cambeyrac. *Ves Journées de l'Hydraulique*, La Houille Blanche, 1959, numéro spécial.

R. DUBOIS. — Les essais du groupe marémoteur expérimental de Saint-Malo. *La Houille Blanche*, numéro spécial 2/1962 « La Rance ».

où le plafond des pertuis fait couramment un angle de 30 ou 40° avec l'horizontale. Les hélices auto-composantes ne conservant de façon certaine leur propriété que pour des angles inférieurs à 20°, nous nous sommes trouvés dans l'obligation de mettre au point un procédé de mesure tenant compte de la direction de la vitesse.

2.2.1. EXAMEN DE L'ÉCOULEMENT SUR MODÈLE.

Pour nous faire une idée préalable de la géométrie de l'écoulement, nous avons utilisé deux moyens qui se trouvaient à notre disposition. Profitant des installations de la Station d'Essais à l'air existant à Chatou, nous avons fait réaliser un modèle à l'échelle 1/14 de l'ensemble du conduit hydraulique d'un groupe de Baix-Logis Neuf, comprenant notamment les grilles et leurs pannes-supports, le canal d'amenée sur une longueur d'environ 2,3 fois l'entr'axe des groupes et une paroi matérialisant le plan d'eau (la roue n'étant toutefois pas représentée); ces dispositions devaient assurer une représentation en parfaite similitude des conditions d'écoulement dans les pertuis d'entrée. L'intensité et la direction des vitesses ponctuelles étaient déterminées au moyen d'une sonde bi-directionnelle à cinq trous. Ces mesures (qui, nous le verrons plus tard, se sont révélées en excellent accord avec les résultats obtenus en usine) nous ont fourni quelques renseignements précieux, ceux-ci entre autres :

Comme on pouvait le présumer d'après la géométrie du pertuis, l'angle θ (fig. 3) que fait avec la normale la projection de la vitesse sur le plan de profil varie, de bas en haut du pertuis, approximativement de 0 à 35°.

Sur une même horizontale, dans un des pertuis, la variation de θ autour de sa valeur moyenne n'excède jamais $\pm 4^\circ$, et généralement beaucoup moins.

Quant à l'angle τ que fait avec la normale la projection de la vitesse sur le plan horizontal, (parfois appelé dérapage) il reste très généralement compris entre -5° et $+5^\circ$. Nous avons donc admis, tout au moins dans une première étape, que cet écart pouvait être négligé et que l'écoulement pouvait être considéré comme bidimensionnel; en toute rigueur, cette approximation nous conduit à mesurer un débit légèrement trop faible, mais l'erreur ainsi faite ne doit pas dépasser quelques millièmes. Dans ce qui suit, nous admettrons provisoirement que τ est nul et, par suite, que θ est l'angle de la vitesse avec la normale.

Forts de ces quelques remarques, nous avons pu alors utiliser l'analogie électrique pour tracer dans chaque cas les lignes de courant et les lignes équipotentielles de l'écoulement supposé plan; la figure 4 donne un exemple des résultats ainsi obtenus, qui montrent d'une façon approximative comment varie l'angle θ le long d'une verticale.

2.2.2. DÉTERMINATION DE LA DIRECTION DE LA VITESSE.

Arrivés à ce point, voyons un peu où nous en sommes : en procédant par intégration continue à l'aide d'hélices autocomposantes (qui, si elles n'indiquent pas rigoureusement la composante axiale de la vitesse, $V \cos \theta$, s'en écartent tout de même assez peu), nous pouvons déterminer une première valeur approchée du débit. Ces valeurs sont cer-

tainement exactes en valeur relative, surtout pour les régimes voisins d'une même courbe en hélice bloquée (elles seraient donc suffisantes, par exemple, pour établir la conjugaison optimale pales-distributeur). Il nous reste à étalonner en valeur absolue cette mesure relative en déterminant la valeur exacte du débit pour un point de chaque hélice, ce que nous ferons à l'aide d'un jaugeage par stationnement.

Mais, puisque nous ne pouvons mesurer directement la composante $V \cos \theta$ qui nous intéresse seule en définitive, nous allons être contraints de mesurer séparément V et θ .

Pour cela, il nous faudra tenir compte de la façon dont réagissent les hélices utilisées lorsqu'elles sont soumises à un écoulement oblique. Soit V_α l'indication fournie par le moulinet lorsqu'il fait avec la vitesse un angle α (défini sur la figure 5) et qu'on lui applique l'équation de tarage établie à incidence nulle ($\alpha = 0$). Nous appellerons loi de réponse angulaire des hélices le facteur correctif $f(\alpha) = (V_\alpha/V_0)$, que l'on peut déterminer par un étalonnage préalable en laboratoire, comme nous le verrons au paragraphe 4.1.

3/ Définition des angles θ et τ .
Definition of θ and τ .

4/ Lignes de courant obtenues par analogie électrique plane.
Stream lines determined by plane electrical analogy.

5/ Définition de l'angle α .
Definition of α .

Cette loi de réponse étant connue, si nous effectuons deux mesures, le moulinet faisant avec la vitesse des angles α_1 et α_2 suffisamment écartés pour que nous soyons sûrs d'encadrer la direction de la vitesse, le rapport V_{a1}/V_{a2} ne dépend que de la valeur de α_1 , que nous cherchons, et de la différence $\alpha_1 - \alpha_2$, que nous connaissons.

Pratiquement, nous pouvons nous fixer une fois pour toutes $\alpha_1 - \alpha_2 = 45^\circ$ et, à partir de la courbe $(V_a/V_0) = f(\alpha)$ nous pouvons tracer la courbe :

$$\frac{V_{a1}}{V_{a2}} = \frac{V_{a1}}{V_{a1} - 45} = g(\alpha_1) \text{ (fig. 6).}$$

Nous effectuerons alors les deux mesures V_{a1} et V_{a2} à des angles différant de 45° et à peu près symétriques par rapport à la direction présumée de la vitesse (d'après les essais sur modèle à l'air ou par analogie électrique); du rapport V_{a1}/V_{a2} , nous déduirons donc l'angle α_1 et, connaissant la position du moulinet définie par son angle x avec la normale à la section, nous obtiendrons l'angle en site θ de la vitesse : $\theta = \alpha_1 + x_1$.

2.2.3. DÉTERMINATION DE LA GRANDEUR DE LA VITESSE.

Maintenant que nous connaissons la direction de la vitesse en chaque point, il nous est possible d'en mesurer la grandeur en orientant le moulinet au plus près de celle-ci. En fait, il subsistera toujours un certain écart angulaire α_3 entre le moulinet et la vraie direction de la vitesse, dû d'une part aux conditions pratiques du réglage de la direction du moulinet et, d'autre part, à la nécessité d'adopter une valeur unique pour tous les points de la même horizontale; mais la répartition des vitesses est suffisamment régulière pour que α_3 n'excède généralement pas $\pm 5^\circ$.

Une fois en possession de cette troisième mesure V_{a3} , il nous faut néanmoins faire appel une nouvelle fois à la courbe de réponse angulaire des hélices, afin de corriger cette valeur en fonction du petit angle α_3 , et d'obtenir ainsi la valeur V_0 qu'aurait indiquée le moulinet s'il avait été rigoureusement orienté dans la direction de la vitesse.

2.2.4. INFLUENCE DU CADRE SUPPORT.

Dans tout ce qui précède, les vitesses ont été calculées en appliquant l'équation de tarage obtenue par remorquage en eau calme du moulinet monté sur son tube support (tube rond 40×49 mm), mais en l'absence de l'ensemble du cadre utilisé pour les jaugeages en pertuis. Or, ce cadre, nécessairement assez importants (nous le décrirons brièvement au paragraphe 3.1.), occasionne une perturbation de l'écoulement dans la section de jaugeage, perturbation due à une déformation des lignes de courant qui se fait sentir à l'amont du cadre. La vitesse V_0 déterminée ci-dessus diffère donc légèrement de la vitesse vraie V .

Pour apporter à V_0 la correction nécessaire, il faut donc avoir procédé à un étalonnage préalable de l'ensemble du cadre, les moulinets étant orientés dans la direction de la vitesse, mais en fonction de la position relative du cadre, des moulinets et de l'écoulement; cet étalonnage se traduira donc par une loi de la forme $(V/V_0) = h(\beta)$, où β , comme nous le préciserons plus loin, est un angle caractérisant l'orientation de l'écoulement par rapport au cadre.

2.2.5. CALCUL DU DÉBIT.

La direction et la grandeur de la vitesse ayant été successivement déterminées, il ne reste qu'à combiner ces deux éléments pour obtenir en chaque point la composante normale de la vitesse, ou « vitesse de débit » $V_D = V \cos \theta$, puis à tracer pour chaque verticale le profil de ces vitesses de débit que l'on intégrera graphiquement pour obtenir le débit élémentaire sur chaque verticale, enfin à tracer le même profil en travers des débits élémentaires dans chaque pertuis, pour obtenir le débit par une nouvelle intégration graphique. La comparaison du débit ainsi obtenu avec celui déduit, au même régime, de l'intégration continue fournira finalement le coefficient correctif à appliquer aux jaugeages par intégration continue effectués à des régimes voisins (même valeur de l'inclinaison des pales par exemple).

2.2.6. PRISE EN COMPTE DE L'ANGLE DE DÉRAPAGE.

Nous avons déjà dit que dans l'exposé qui précède l'angle de dérapage τ était considéré comme nul. Si cependant on dispose d'un moyen de le connaître et qu'on constate qu'il n'est pas négligeable, voyons comment on peut en tenir compte.

Reportons-nous d'abord à la figure 3 : parmi les quatre angles qui y sont définis, deux d'entre eux suffisent à déterminer la direction de la vitesse, mais, selon l'appareillage utilisé, l'on pourra disposer, par exemple, soit de θ et τ , soit de θ et φ , tandis qu'en fin de compte c'est la connaissance de ω qui sera nécessaire. Or ces quatre angles sont liés par un certain nombre de relations simples, parmi lesquelles on peut citer :

$$\cos \omega = \cos \varphi \cos \theta \quad (1)$$

et

$$\operatorname{tg} \varphi = \operatorname{tg} \tau \cos \theta \quad (2)$$

La mesure du débit pourra alors s'effectuer suivant le schéma ci-après :

a) Préalablement aux essais, étalonnage en laboratoire permettant de déterminer la loi de réponse des hélices lorsque la vitesse a une incidence quelconque, c'est-à-dire permettant de tracer non plus seulement une courbe $(V_a/V_0) = f(\alpha)$, mais un réseau de courbes $(V_a/V_0) = f(\alpha, \varphi)$, dont on déduira de même un réseau de courbes :

$$(V_{a1}/V_{a2}) = g(\alpha_1, \varphi).$$

b) Pendant les essais en usine :

- mesure de V_{a1} et V_{a2} , comme précédemment, et en outre de τ (voir paragraphe 3.4);
- à partir d'une valeur approchée de θ (cette première approximation se révélera pour ce faire très généralement suffisante), calcul de φ à l'aide de la formule (2);
- sur le réseau de courbes $(V_{a1}/V_{a2}) = g(\alpha_1, \varphi)$, détermination de α_1 et donc de θ ;
- mesure de V_{a3} et détermination de V_0 à l'aide du réseau de courbes $(V_a/V_0) = f(\alpha, \varphi)$;
- prise en compte de la correction due à l'influence du cadre, d'où la valeur réelle de la vitesse $V = V_0 h(\beta)$;
- enfin, calcul de la vitesse de débit $V_D = V \cos \omega$ à l'aide de la formule (1).

On peut résumer ceci en disant que l'angle de dérapage intervient à deux reprises : d'une part par l'influence du paramètre φ sur la réponse du mou-

6/ Lois de réponse angulaire. $V_{\alpha}/V_0 = f(\alpha)$ et $V_{\alpha 1}/V_{\alpha 2} = g(\alpha_1)$
 Angular response laws. $V_{\alpha}/V_0 = f(\alpha)$ and $V_{\alpha 1}/V_{\alpha 2} = g(\alpha_1)$

linet et, d'autre part, lors de la projection de la vitesse sur la normale. Ces deux effets sont de sens contraire, mais le premier est prépondérant (ceci provient en particulier du fait que la loi de réponse angulaire des hélices Texas peut être assimilée à une loi en cosinus élevée à une puissance comprise entre 2 et 3); c'est pourquoi la vitesse de débit calculée en négligeant le dérapage est légèrement fautive par défaut.

3. — Description sommaire du matériel mis en œuvre

3.1. Les cadres supports de moulinets.

Dans chacun des trois pertuis du groupe en essai, les supports des moulinets sont constitués par un cadre formé d'une armature cylindrique horizontale de diamètre 190 mm et d'un tube porte-moulinets de diamètre 49 mm mobile autour de son axe, ces deux pièces étant réunies de place en place par des nervures en fer plat (fig. 7 et 8).

7/ Schéma du cadre porte-moulinets.
 Diagrammatic current meter mounting frame.

8/ Le cadre-support des moulinets, ceux-ci en position relevée.
 The mounting frame, showing current meters in the raised position.

Ce cadre se déplace verticalement dans la section de jaugeage, guidé à chacune de ses extrémités par un chariot à galets roulant dans les rainures à batardeau. Les six chariots sont reliés par un système de câbles métalliques et de poulies à six treuils mus par un ensemble unique moteur-réducteur, ce qui assure un parfait synchronisme de mouvement des trois cadres, dont la position est repérée sur les câbles porteurs. Les vitesses de montée ou de descente ainsi réalisées, constantes à $\pm 0,1 \%$ près, sont d'environ 10 mm/s, soit, dans les cas les plus défavorables, de l'ordre de 1 % de la vitesse de l'écoulement.

3.2. Le dispositif d'orientation des moulinets.

La rotation du tube porte-moulinets est commandée par un ensemble électro-mécanique, avec télécommande et télémessure, contenu dans un caisson étanche fixé sur l'un des chariots de chaque cadre. Le tube est solidaire d'une roue crantée usinée au dixième de degré, avec un cran tous les 5 degrés; chaque impulsion donnée à la boîte de commande libère une clavette jusqu'à ce que le cran suivant se présente devant elle. Ce système d'avance discontinue permet d'éviter toute ambiguïté sur l'orientation exacte des moulinets, qui est par ailleurs transmise au poste de contrôle à l'aide d'un potentiomètre rotatif.

Il est ainsi possible d'explorer un secteur de 90° que l'on peut, au montage, positionner à volonté par rapport à l'horizontale (la gamme :

$$-30^\circ \leq x \leq 60^\circ$$

se révélera souvent la plus favorable). En outre, un cran supplémentaire permet d'effacer les moulinets en position verticale lors de la mise en place du cadre, lorsque l'étroitesse de la rainure l'exige.

3.3. Les moulinets et la table d'enregistrement.

Les moulinets que nous utilisons sont des moulinets OTT du type V Texas. Dans chaque pertuis (dont la largeur est de 5,5 m à 6 m environ), nous disposons généralement treize ou quinze de ces appareils, équipés alternativement, les moulinets impairs, d'une hélice autocomposante type A et les moulinets pairs, d'une hélice ordinaire à arêtes biaises. Nous avons été conduits à cette alternance d'une part, parce qu'il nous a paru indispensable d'utiliser des hélices autocomposantes pour les intégrations continues, afin d'obtenir une première approximation aussi bonne que possible, et d'autre part, comme nous le verrons plus loin, parce que les étalonnages effectués en laboratoire et en pertuis nous ont fait apparaître l'emploi d'hélices Texas comme plus sûr pour une exploitation précise du champ des vitesses.

L'enregistrement de la vitesse de rotation des moulinets s'effectue maintenant à l'aide d'un ensemble de comptage transistorisé à 72 voies (fig. 9), chaque moulinet étant en liaison à la fois avec un compteur d'impulsions et avec une piste d'un chronographe (*). La durée de chaque enregistrement peut être réglée soit par commande extérieure (cas des intégrations continues), soit par sélection préalable ou bien du temps ou bien du nombre d'impulsions délivrées sur chaque voie.

(*) J. L'HERMITTE. — Electronique pour les jaugeages au moulinet. *Bulletin du C.R.E.C.*, 1964.

9/ Ensemble électronique pour l'enregistrement des moulinets.
Electronic current meter recording equipment.

10/ Palette pour la mesure de l'angle de dérapage τ .
Vane for measuring angle τ .

3.4. La mesure de l'angle de dérapage τ .

Bien que nous ayons dû négliger cette question lors des premières applications de la méthode exposée, nous nous efforçons actuellement de mettre au point un appareillage qui nous permettra de mesurer en un certain nombre de points de chaque pertuis l'angle de dérapage τ .

Ce dispositif (fig. 10) est constitué par une palette d'assez grande surface, mobile autour d'un axe vertical, que la poussée dynamique de l'eau oriente vers le plan vertical de la vitesse; deux potentiomètres identiques, l'un au poste de mesure, l'autre sur l'axe de la palette, permettent de mesurer la rotation de celle-ci, c'est-à-dire τ , par une méthode de zéro. L'une des principales difficultés

est de donner à l'équipage mobile une inertie suffisante pour que la mesure ne soit pas perturbée par la turbulence de l'écoulement, tout en lui conservant une sensibilité convenable.

4. — Etalonnages en laboratoire

Il ressort de tout ce qui précède que les mesures de débit effectuées par cette méthode exigent une excellente connaissance de l'étalonnage des moulinets dans les conditions particulières où ils sont utilisés, connaissance qui ne peut être acquise que par une étude approfondie en laboratoire. Bien que notre propos ne soit pas ici d'étudier en détail le fonctionnement des moulinets, ce qui nous entraînerait beaucoup trop loin, il nous paraît nécessaire d'exposer succinctement les conclusions que nous avons pu tirer d'étalonnages effectués les uns par les soins de l'Institut de Mécanique des Fluides de l'Université de Toulouse, les autres par nous-mêmes avec la collaboration du Bassin des Carènes de la Marine Nationale.

Ces étalonnages, réalisés par remorquage en eau calme, ont porté d'une part sur la loi de réponse angulaire des hélices Texas et des hélices autocomposantes OTT et d'autre part, sur l'influence perturbatrice du cadre support. Il ne sera pas parlé ici de l'effet dû à la turbulence de l'écoulement (turbulence naturelle et turbulence engendrée par les grilles), effet que nous ne sommes pas actuellement en mesure de préciser (de nombreuses études sont actuellement en cours dans ce domaine dans plusieurs laboratoires français et étrangers).

4.1. Lois de réponse angulaire.

Les premières séries d'étalonnages ont été faites dans l'hypothèse où l'angle de dérapage τ est nul, c'est-à-dire lorsque la direction de la vitesse est dans le plan perpendiculaire au tube porte-moulinets, plan que décrit le moulinet dans sa rotation; elles ont porté, à Toulouse et à Paris, sur des hélices Texas et des hélices autocomposantes. Ultérieurement, une nouvelle série d'étalonnages a été faite à Paris, avec des hélices Texas, en faisant varier à la fois l'incidence α et le dérapage τ .

Toutes ces séries d'essais ont été réalisées en montant les moulinets sur un élément du cadre utilisé en pertuis, mais en ne modifiant pas la géométrie relative du cadre et de l'écoulement, c'est-à-dire en laissant fixe l'angle β défini sur la figure 7.

4.1.1. INFLUENCE DE L'INCIDENCE SUR LA RÉPONSE DES HÉLICES TEXAS.

La figure 11 montre la loi de réponse des hélices Texas telle qu'elle résulte des étalonnages de Toulouse et de Paris. Sa caractéristique essentielle est que le maximum de la courbe ne correspond pas à $\alpha = 0$: ce n'est pas lorsque le moulinet est orienté dans la direction de la vitesse qu'il tourne le plus vite, mais bien lorsqu'il est décalé d'environ $1,5^\circ$.

Cette particularité apparemment paradoxale s'explique peut-être par l'influence du cadre sur l'écoulement; cette influence est en effet de deux sortes : l'une que nous étudierons plus loin, sur la grandeur de la vitesse, et l'autre, que nous rencontrons ici, sur sa direction. Notons en passant que cette déviation de $1,5^\circ$ est en bon accord avec des résultats que nous avons obtenus il y a plusieurs années en essayant en soufflerie un modèle réduit

11/ Lois de réponse angulaire des hélices Texas et auto-composantes.
Angular response laws for Texas and self-compounding propellers.

12/ Ecart entre la loi de réponse des hélices Texas et une loi en $\cos^2$.
Comparison between Texas propeller response and a $\cos^2$ law.

13/ Ecart entre la loi de réponse des hélices auto-composantes et une loi en $\cos$.
Comparison between self-compounding response and a $\cos$ law.

d'un cadre analogue, résultats qui semblaient déceler une déviation de l'ordre de 1°.

Compte tenu de ce phénomène, la loi de réponse est assez voisine d'une loi en cosinus carré; c'est ce que nous avons mis en évidence en traçant sur la figure 11 la courbe $(V_{\alpha}/V_0) \cos^2(\alpha - \alpha_0)$. Les deux courbes ne s'écartent pas de plus de 0,5 % dans un intervalle d'environ $\pm 10^\circ$, comme le montre (fig. 12) la courbe représentant l'écart :

$$\frac{V_{\alpha} - V_{\alpha_0} \cos(\alpha - \alpha_0)}{V_{\alpha_0} \cos(\alpha - \alpha_0)}$$

Précisons aussi que les étalonnages ont été effectués pour des vitesses comprises entre 0,5 et 2,5 m/s et qu'il semble que, toutes choses égales d'ailleurs, le rapport V_{α}/V_0 soit d'autant plus faible que la vitesse est plus grande, l'écart pouvant être de l'ordre de 1 % pour des angles de 40° .

4.2.1. INFLUENCE DE L'INCIDENCE SUR LA RÉPONSE DES HÉLICES AUTOCOMPOSANTES.

Sur la même figure 11, figure la loi de réponse des hélices autocomposantes, que nous avons obtenue dans les mêmes conditions que pour les hélices Texas. On y observe la même déviation des filets liquides due au cadre, qui est d'environ 2° . Compte tenu de cette déviation, la loi expérimentale est pratiquement confondue avec une loi en cosinus jusqu'à des incidences d'environ 35° , ce que fait ressortir (fig. 13) la courbe représentant l'écart relatif :

$$\frac{V_{\alpha} - V_{\alpha_0} \cos^2(\alpha - \alpha_0)}{V_{\alpha_0} \cos^2(\alpha - \alpha_0)}$$

Le tarage par remorquage en eau morte confirme donc de façon très satisfaisante l'effet autocomposant de ce type d'hélice.

4.1.3. INFLUENCE DU DÉRAPAGE SUR LA RÉPONSE DES HÉLICES TEXAS.

Nous avons effectué récemment une dernière série d'étalonnages dans laquelle nous avons fait varier à la fois les angles α (incidence) et φ (dérapage). Ces mesures nous ont permis de tracer le réseau de courbes $(V_{\alpha}/V_0) = f(\alpha, \varphi)$, représenté sur la figure 14; les résultats obtenus montrent que la loi de réponse angulaire ne dépend pratiquement que de l'angle ω que fait dans l'espace le moulinet avec la direction de la vitesse, c'est-à-dire qu'elle n'est que très peu influencée par la disposition relative du moulinet, de sa perche-support et de la vitesse.

14/ Lois de réponse angulaire des hélices Texas :
 $V_{\alpha}/V_0 = f(\alpha, \varphi)$.

Texas propeller angular response laws :
 $V_{\alpha}/V_0 = f(\alpha, \varphi)$.

4.2. Influence du cadre support.

Dans les paragraphes précédents, nous avons examiné la loi de réponse des moulinets lorsque ceux-ci pivotent autour de leur perche-support,

mais que la vitesse garde une direction fixe par rapport à l'ossature du cadre. Il nous faut maintenant, comme nous l'avons vu en 2.2.4, établir la correction à appliquer aux indications des moulinets en fonction de l'orientation de la vitesse par rapport au cadre, c'est-à-dire la loi $(V/V_0) = h(\beta)$, les moulinets restant dans la direction de la vitesse. Pour chiffrer cette correction, nous aurions pu prendre comme étalonnage de référence l'équation obtenue pour une valeur quelconque de β , mais il nous a paru plus commode de mener les calculs en prenant comme base l'étalonnage sur tube 40×49 seul, sans le cadre, étalonnage plus facile à atteindre.

La figure 15 montre les courbes de correction obtenues pour les hélices Texas et pour les hélices autocomposantes. Compte tenu des dispositions constructives habituelles, l'angle β peut, dans la pratique, varier entre 25° et -10° ; on constate que, dans ces conditions, la correction à appliquer est de l'ordre de 1 à 3 %, la présence du cadre ayant pour effet d'augmenter la vitesse de rotation des hélices. En toute rigueur, cette correction semble, elle aussi, légèrement influencée par la valeur absolue de la vitesse.

5. — Exécution des essais

5.1. Vérification in situ de la loi de réponse angulaire.

Afin de voir si le fonctionnement des hélices en eau vive, au sein d'un écoulement turbulent, était le même que lors d'un trainage en eau morte, il nous a paru intéressant de déterminer *in situ* les lois de réponse angulaire (en ne tenant évidemment pas compte de l'influence du dérapage). Nous avons pour cela immobilisé le cadre à mi-hauteur du pertuis, dans une zone où l'incidence de la vitesse sur l'horizontale est voisine de $\theta = 15^\circ$ et, la turbine étant maintenue à un régime parfaitement stable, nous nous sommes livrés à une exploration de 5 en 5° dans une gamme de $\pm 45^\circ$ autour de la direction présumée de la vitesse.

Bien que ne connaissant pas exactement cette direction, nous pouvons admettre que ce contrôle sera satisfaisant si la courbe de réponse ainsi obtenue peut se superposer par une translation à la loi déduite des tarages en laboratoire. Ceci s'est parfaitement vérifié, dans les trois usines où nous avons opéré, en ce qui concerne les hélices Texas.

Il n'en a malheureusement pas été de même pour les hélices autocomposantes, pour lesquelles nous avons obtenu des résultats révélant une fidélité moins bonne (pour une même hélice) et une dispersion plus importante (d'une hélice à l'autre), ce qui rend difficile l'adoption d'une équation d'étalonnage et d'une loi de réponse moyennes. Il semble que ces difficultés soient dues au fait que les hélices autocomposantes plongées en eau vive, en présence d'une certaine turbulence, ne réagissent pas de la même façon que lorsqu'elles sont traînées en eau morte. Quoi qu'il en soit, c'est pour cette raison que nous avons jugé préférable d'utiliser les hélices Texas pour la mesure de la grandeur et de la direction des vitesses ponctuelles.

5.2. Déroulement des essais.

La réponse angulaire des moulinets ayant été ainsi établie, les essais proprement dit peuvent ensuite se dérouler suivant le schéma que nous avons exposé au chapitre 2.

Pour une valeur déterminée de l'inclinaison des pales de la turbine, cinq à six jaugeages par intégration continue sont d'abord effectués, avec autant de réglages de l'ouverture du distributeur. Pour l'un de ces régimes, autant que possible voisin de la conjugaison optimale, le jaugeage est aussitôt doublé par une exploration détaillée du champ de vitesses ponctuelles, en grandeur et en direction.

Cette exploration est réalisée en faisant stationner les cadres successivement sur huit à dix horizontales réparties dans toute la hauteur des pertuis et en mesurant sur chacune d'elles les vitesses V_1 , V_2 , et V_3 précédemment définies, la troisième mesure nécessitant le dépouillement immédiat des deux premières pour déterminer l'angle θ . Il va de soi qu'un tel ensemble de mesures exige un temps très long, de l'ordre de trois ou quatre heures, pendant lequel il importe que le régime de la turbine soit parfaitement stable (ceci implique en premier lieu d'effectuer tous les essais de nuit, lorsque les nécessités de la navigation entraîneraient des variations inadmissibles des plans d'eau, ce qui est le cas sur le Rhin et sur le Rhône). Cette stabilité est contrôlée par des relevés continus des divers paramètres : inclinaison des pales, ouverture du distributeur, niveaux amont et aval, puissance électrique, contrôle piézométrique Winter-Kennedy.

L'ensemble de ces jaugeages est ensuite répété pour différentes valeurs de l'inclinaison des pales; la durée totale des essais se trouve ainsi finalement de l'ordre d'une semaine, un dépouillement provisoire étant assuré simultanément.

5.3. Résultats obtenus.

Pour juger de la valeur des mesures de débit effectuées suivant cette méthode, nous pouvons nous placer à trois points de vue : la cohérence de l'ensemble de nos résultats, la comparaison du champ des vitesses déterminé sur place avec celui relevé sur modèle à l'air et enfin la comparaison des performances de la turbine industrielle avec celles du modèle; nous allons examiner successivement ces trois aspects.

5.3.1. VUE D'ENSEMBLE DES RÉSULTATS OBTENUS EN USINE.

Un premier élément d'appréciation concerne les erreurs accidentelles commises dans les jaugeages par intégration continue; ces erreurs sont représen-

tées par exemple par la dispersion des points expérimentaux autour des courbes caractéristiques débit-ouverture (la figure 16 représente les courbes débit-ouverture relevées à l'usine de Baix-Logis Neuf sous 12,20 m de chute nette). Nous avons pu constater que cette dispersion n'excède généralement pas $\pm 0,5 \%$.

Un autre élément qu'il est intéressant de considérer est l'écart relatif entre la valeur du débit que nous avons admise comme vraie, c'est-à-dire celle calculée par stationnement et exploration du champ des vitesses, et la valeur brute obtenue sans aucune correction par intégration continue au même régime (plutôt que la valeur directement mesurée, il sera d'ailleurs préférable de prendre pour celle-ci la valeur lue sur la courbe lissée débit-ouverture). Les coefficients correctifs que nous

16/ Courbes débit-ouverture relevée à l'usine de Logis-Neuf.
Measured discharge/opening curves for Logis-Neuf.

avons ainsi obtenus sont les suivants, pour des valeurs croissantes de l'inclinaison des pales :

- à Vogelgrün. 2,7, 2,1, 2,4 et 2,3 %
- à Marckolsheim. 2,7, 3,5, 2,7 et 3,6 %
- à Baix-Logis Neuf. 3,0, 2,3, 1,3 et 2,0 %

Les valeurs indiquées ici sont des corrections globales, tenant compte à la fois de la géométrie de l'écoulement, de la loi de réponse des hélices, de l'influence du cadre et des zones non explorées en intégration continue au voisinage du radier et du plafond

La variation de ce coefficient ne paraissant pas systématique en fonction de l'inclinaison des pales, c'est-à-dire du débit, il semble logique d'adopter pour chaque usine une valeur moyenne du coeffi-

17/ Usine de Logis-Neuf : répartition de l'angle d'incidence θ obtenue sur place.
Logis-Neuf power plant : measured incidence angle θ .

18/ Usine de Logis-Neuf : répartition de l'angle d'incidence θ obtenue sur modèle à l'air.
Logis-Neuf power plant : incidence angle θ determined on the air model.

cient de correction; la dispersion des valeurs ci-dessus autour de leur moyenne arithmétique pourrait alors traduire l'erreur accidentelle que l'on commet dans la méthode d'exploration du champ des vitesses nouvelles. Cette dispersion est d'environ $\pm 0,4 \%$ pour les deux premières usines citées et $\pm 0,8 \%$ pour la troisième.

5.3.2. COMPARAISON AVEC LE CHAMP DES VITESSES RELEVÉ SUR LE MODÈLE À L'AIR.

Les figures 17 et 18 montrent la répartition, le long de la hauteur de chacun des trois pertuis d'entrée du groupe 3 de l'usine de Logis Neuf, de la valeur moyenne par horizontale de mesure de l'angle θ , relevé respectivement en usine et sur modèle à l'air. Mise à part une anomalie au voisinage du plafond, on peut constater une excellente concordance entre ces deux séries de mesures, qui ne diffèrent jamais de plus de 3° . L'accord est tout aussi satisfaisant en ce qui concerne le profil des vitesses, en vraie grandeur ou en projection sur la normale.

Globalement, ceci se traduit en particulier par la remarque suivante : les essais sur modèle à l'air nous avaient fait prévoir que le débit total se répartissait entre les trois pertuis à raison de 40, 33 et 27 %, de la rive gauche à la rive droite; les mesures en usine nous ont conduit à une répartition pratiquement identique de 39,7, 33,7 et 26,6 %.

5.3.3. COMPARAISON AVEC LES PERFORMANCES DE LA TURBINE MODÈLE.

Pour chacun des trois usines dans lesquelles nous avons opéré, la Station d'Essais de Turbines du C.R.E.C. avait procédé préalablement aux essais de rendement d'une turbine modèle. Bien que la comparaison des résultats industriels et sur modèle soit une question très complexe que nous ne pouvons examiner ici, et qu'une meilleure connaissance de l'effet d'échelle sur les turbines Kaplan soit précisément l'un des buts de ces essais comparatifs, il nous paraît intéressant de signaler une des conclusions qui se dégagent des études actuellement en cours au C.R.E.C.

Si on transpose les rendements obtenus sur modèle à l'aide de la formule de Hutton, en adoptant pour le rapport des pertes par frottement aux pertes totales une valeur telle que celles proposées par Fauconnet ou par Fay et Kvyatkovskii, donc très sensiblement supérieure à 0,7, les rendements que nous avons mesurés *in situ* se placent, dans les trois cas, dans une bande de $\pm 0,5$ % autour de la courbe transposée.

Certes, bien d'autres facteurs que le débit interviennent dans une telle comparaison de rendement, et la remarquable concordance de ces résultats ne saurait aucunement permettre de conclure d'une façon générale à une aussi bonne précision absolue des mesures de débit effectuées par cette méthode; cela n'en reste pas moins très encourageant.

6. — Conclusion

La méthode de mesure du débit dans les pertuis d'usine de basse chute que nous avons mise au point ne prétend pas, dans sa forme actuelle, être d'une totale perfection; il est possible, et d'ailleurs souhaitable, que, l'expérience aidant, elle subisse encore bien des modifications. Mais, si elle comporte certains inconvénients que nous ne nous dissimulons pas, elle offre par contre, outre l'avantage d'exister et de conduire à des résultats satisfaisants, le mérite à nos yeux considérable d'être, dans ce domaine, la plus analytique qui soit.

Chaque pertuis de basse chute rencontré présentant un écoulement tridimensionnel particulier,

une méthode de jaugeage analytique permettant d'accéder à la géométrie même de l'écoulement, nous paraît préférable à une méthode conduisant à une valeur globale, donc incontrôlable, du débit.

L'inconvénient majeur de notre méthode, sa lourdeur incontestable, est justement le revers de son caractère analytique.

Sur le plan de la mise en œuvre, elle nécessite un matériel et un personnel importants, mais cependant pas excessifs en regard de l'ampleur des installations auxquelles elle s'applique; elle exige également un temps relativement long, et notamment à plusieurs reprises une excellente stabilité de régime du groupe durant quelques heures. Enfin, elle conduit à une somme importante de travaux de dépouillement pour lesquels l'aide de la calculatrice électronique du C.R.E.C. a été particulièrement bienvenue.

Sur le plan de la précision des résultats qu'elle permet d'obtenir, il est indéniable que la progression vers le résultat final paraît un peu laborieuse et qu'on peut craindre de cumuler ainsi, à chaque étape, bien des sources d'erreur. Les divers recoupements que nous avons pu faire à cet égard sont cependant extrêmement rassurants, et plus significatifs, à notre sens, que d'échafauder un calcul d'erreur qui n'aurait en ce domaine que des bases assez précaires.

Les progrès essentiels que l'on peut souhaiter pour rendre plus sûres de telles mesures résident dans une meilleure connaissance du fonctionnement des moulinets quant à la réponse des différents types d'hélice en écoulement oblique et surtout quant à leur comportement en présence de turbulence, question qui est actuellement l'objet de bien des préoccupations.

En l'état actuel des choses, il semble qu'on puisse légitimement ambitionner de mesurer le débit turbiné avec une précision de l'ordre de $\pm 1,5$ %.

Discussion

Président : M. BERGERON.

M. le Président insiste sur l'intérêt de cette communication et sur son importance pratique, puisqu'elle préconise une méthode de mesure des débits sur laquelle utilisateurs et constructeurs doivent être d'accord. M. BONNAFOUX a exposé longuement toutes les précautions prises pour arriver à des essais précis et M. le Président note l'idée originale de prédéterminer l'orientation, la direction de la vitesse simplement par la mesure de deux vitesses en deux orientations de 45° en se reportant à la loi de réponse angulaire.

M. LIEBER rappelle qu'il a utilisé, vers 1940, pour mesurer les rendements d'une turbine Kaplan de grande dimension, un dispositif analogue à celui que vient de décrire M. BONNAFOUX, avec, toutefois, les caractéristiques différentes ci-après :

- 1° la barre de mesure était portée par un échafaudage de poutrelles triangulaires, moins simple que celui de M. BONNAFOUX;
- 2° les moulinets étaient placés en avant du support;
- 3° la section était également au droit du batardeau et le pertuis était aussi convergent que celui de Vogelgrün, mais beaucoup plus incliné;
- 4° pour déterminer l'orientation des filets liquides, on n'avait pas pensé à donner deux positions aux moulinets, mais on avait fait un sondage avec un fanion que l'on plaçait successivement à la verticale dans tous les points du profil horizontal : cela avait représenté un travail considérable.

M. LIEBER attire l'attention sur les difficultés inhérentes à l'emploi de ce fanion : s'il est tendu et équilibré par son poids propre, il manque de sensibilité et ne bouge pas; si on le munit d'un empennage pour le rendre plus sensible, on observe en chaque point une sorte d'instabilité due aux mouvements locaux.

M. LIEBER demande à M. BONNAFOUX s'il a pu constater, à Vogelgrün, des fluctuations qui peuvent avoir une certaine influence sur la valeur moyenne de la vitesse mesurée au moulinet et qui peuvent entacher les mesures de débits d'une certaine erreur.

Cette erreur est, certes, moins grave maintenant que l'on connaît beaucoup mieux la loi de réponse du moulinet et M. BONNAFOUX en a tenu compte dans la loi de mesure en fonction de l'inclinaison.

M. BONNAFOUX répond qu'il n'a pas été fait, à Vogelgrün, d'essais destinés à déterminer la turbulence de l'écoulement, mais que de telles mesures sont prévues prochainement à l'usine de Rhinau.

M. de SAINT-VAULRY demande s'il n'y a pas, en effet, d'obstruction due à la présence de la poutre cylindrique qui supporte les moulinets et capable d'entraîner une modification de l'angle des filets liquides et une augmentation de la vitesse au point de mesure.

M. BONNAFOUX répond que l'obstruction due au cadre porte-moulinets est négligeable, car le diamètre du tube principal est de 190 mm et les pertuis ont une hauteur de 10 à 14 m. Il est certain, cependant, que le cadre provoque une légère modification du champ des vitesses, mais l'étalonnage fait en laboratoire permet justement de déterminer une correction, en grandeur et en direction, qui est fonction notamment de l'orientation de la vitesse par rapport à l'ossature du cadre.

M. CHAIX demande si le glissement des courbes de direction des vitesses d'un pied et demi vers le bas, dû au support, est déterminé d'une barre à l'autre.

M. BONNAFOUX confirme que ce décalage du maximum de la courbe a été observé lors des étalonnages en laboratoire; il explique, en s'aidant d'un croquis au tableau, que les lois de réponse angulaire ne sont pas symétriques par rapport à la direction de la vitesse, mais décalées d'environ un degré et demi, et ajoute que des essais faits il y a quelques années en soufflerie, sur le modèle réduit d'un cadre analogue, avaient mis en évidence une déviation du même ordre.

M. DOUILLET signale une méthode de jaugeage aux moulinets utilisée par la Division Technique Générale d'Électricité de France dans le cas d'écoulement à filets non parallèles.

Lors de l'établissement du projet de l'usine, une section de jaugeage, se rapprochant d'une surface équipotentielle, est définie. Cette section est « balayée » lors des mesures par un dispositif mobile s'appuyant sur des chemins de roulement courbes fixés à l'intérieur de rainures aménagées spécialement dans les bajoyers. Dans les deux jaugeages effectués selon ce procédé, la section a été assimilée à une surface cylindrique de base circulaire, après étude en modèle réduit simple à deux dimensions.

Les moulinets sont orientés dans une direction fixe par rapport au dispositif mobile; cette direction coïncide avec la normale à la section de jaugeage et ne diffère des directions locales des vitesses que d'un écart faible, de l'ordre de quelques degrés.

Le jaugeage lui-même et les calculs correspondants présentent la même simplicité et la même précision que dans le cas du jaugeage en écoulement parallèle; en particulier la « réponse » des hélices en écoulement oblique n'intervient pas.

Le procédé indiqué suppose la réalisation d'une petite étude préalable au moment du projet des installations et quelques aménagements simples de génie civil. Dans certains cas, la section choisie peut être proche des poutres supports des grilles; il faut alors tenir compte du comportement des moulinets dans les zones d'écoulement turbulent correspondantes.

Sur la demande de M. le Président, M. DOUILLET précise que cette méthode permet l'intégration continue comme les autres : il suffit de déplacer le chariot avec une vitesse constante.

M. G. TISON junior présente les remarques ci-après :

Lors des essais de réception d'une centrale au fil de l'eau en Belgique, on obtint pour le rendement des turbines, des chiffres invraisemblables. Le débit dans les pertuis d'amenée était mesuré par de nombreux moulinets fixés sur une poutre porteuse qui pouvait se déplacer verticalement dans les rainures prévues pour les batardeaux. Les moulinets avaient cependant été retardés au préalable. On se rendit compte que la poutre-porteuse, qui était une poutre en treillis constituée de tubes métalliques, perturbait les conditions d'écoulement dans la section de mesure. Pour se rendre compte de l'influence que pouvait exercer cette poutre, on en reconstitua un élément d'une largeur de 0,85 m et on procéda, dans le canal d'étalonnage de l'Institut d'Hydraulique de Gand, à des tarages avec les moulinets fixés sur cet élément de poutre porteuse, lui-même suspendu au chariot d'étalonnage.

Contrairement aux résultats observés par M. BONNAFOUX, nous avons trouvé que les moulinets fixés sur l'élément de poutre porteuse tournaient plus lentement que lorsqu'ils étaient fixés sur une perche, à vitesse de déplacement égale du chariot. Les écarts étaient du même ordre de grandeur que ceux obtenus par M. BONNAFOUX (de l'ordre de 3%) et semblaient augmenter avec la vitesse. L'application des corrections ainsi obtenues fit disparaître les anomalies obtenues pour le rendement des turbines.

M. BONNAFOUX précise que de telles corrections ne sont valables que non seulement pour une constitution bien déterminée du cadre, mais encore pour une certaine position des moulinets par rapport au cadre. Les essais en soufflerie auxquels il a fait allusion précédemment avaient permis de tracer dans toute la région voisine du cadre une carte des corrections, en grandeur et en direction, la valeur et même le signe de ces corrections variant d'une zone à l'autre.

M. le Président remercie M. BONNAFOUX et les personnes qui sont intervenues au cours de cette intéressante discussion.

Abstract

A method of measuring discharge with current meters in low-head power plant intakes

by R. Bonnafoux *

The difficulties experienced in the measurement of discharge absorbed by vertical-shaft Kaplan units are mainly due to their large intake sluice dimensions and sharp convergence over a short distance (Fig. 1), which frequently result in very oblique flows in the gauging section.

In order to reduce the time the power unit is out of operation to a minimum, continuous integration measurements are first carried out at the 25 to 30 conditions required for the efficiency curve determination, by means of self-compounding current meters mounted on a frame (Fig. 2) free to move in the stoplog grooves at about 1 % of the flow velocity, so as to cover the entire depth water in the intake sluice. Though these measurements

* E.D.F. Centre de Recherches et d'Essais de Chatou.

are not completely reliable because of the very wide incidence angle and turbulent flow, they nevertheless certainly give an adequate relative discharge value for fairly similar conditions, and can then be calibrated to give an absolute value by carrying out a few detailed measurements in the velocity field. This is done by positioning the current meter frame at a number of different horizontals in succession and determining first the direction of the velocity at each point and then its magnitude from the known angular response relationship for swept-back current meter propellers.

For this, two measurements V_{a1} and V_{a2} are made with the current meter heading successively in two directions at 45° to each other, between which the true velocity direction is assumed to lie. As the response relationship $(V_a/V_0) = f(\alpha)$ is known (Fig. 3), V_{a1}/V_{a2} only depends on the angle α_1 between the velocity and one of the current meter headings. The true magnitude of the velocity is then given by a third measurement in the direction thus determined; certain corrections have to be applied to allow for the slight mechanical angular error remaining between the third current meter heading and the velocity, and for the slight effect of the frame on the flow, which requires a preliminary calibration to be carried out for the velocity direction with respect to the frame instead of to the current meter.

All that then remains is to calculate the normal velocity component, to repeat this operation for a certain number of suitably distributed horizontals, and to integrate the resulting velocity field graphically in order to find the exact discharge. By then comparing this with the rough value obtained by continuous integration at the same conditions, a correction factor is found for neighbouring conditions, which can be assumed to feature the same velocity distribution.

A slip angle too large to be neglected can be measured independently by a vane aligning itself automatically with the vertical velocity plane, but only if a set of laboratory calibration curves depending on two angular parameters is available instead of a curve merely for $(V_a/V_0) = f(\alpha)$.

Means of controlling and ascertaining the current meter headings from the surface are required for this method, which are provided by mounting the current meters on a round tube which can be made to rotate in steps of exactly 5° within a quadrant by a wheel with machined teeth spaced at $1/10^\circ$.

Numerous preliminary calibrations had been carried out at the "Institut de Mécanique des Fluides" at Toulouse and the "Bassin d'Essai des Carènes" test tank in Paris, in which the current meters were towed in still water, and it was then decided to check the angular response relationship thus obtained in the actual power plant intakes. Swept-back propellers were preferred to the self-compounding type for the velocity field determinations, as the accuracy of the latter seemed to be affected by flow turbulence.

The above discharge measurement method has been used at three major power stations: Vogelgrün and Markolsheim on the Rhine and Logis Neuf on the Rhône. Its main disadvantage is that the actual measurements and initial sorting of the results are both rather unwieldy. For instance, about four hours are required to cover the velocity field for one given set of conditions thoroughly, during which turbine operation must remain completely stable. This drawback is offset, however, by the fact that this method is alone in offering a really analytical picture of the flow, which is its main advantage.

The results obtained so far are considered to be most promising for three reasons: 1) The overall results are very coherent as regards both continuous integration and velocity field exploration; 2) the individual velocity directions and magnitudes and the flow distribution between the three intake sluices measured on site agree very closely with the results of preliminary tests carried out on an air flow model at the "Centre de Recherches et d'Essais" at Chatou (Fig. 4); 3) comparable efficiencies were measured on both prototype and model turbines, which were transposed on the same basis for all three considered power stations.

This method of measurement can therefore reasonably be expected to provide fairly reliable information for the checking of industrial Kaplan turbine efficiencies and, above all, to enable more to be found out about the scale effects associated with these turbines and their models.