

RECHERCHES EXPÉRIMENTALES SUR L'ÉTALONNAGE DES MOULINETS EN EAU CALME ⁽¹⁾

Dans une note intitulée : « *L'étalonnage des moulinets au Laboratoire de Beauvert* » (1), nous avons décrit l'installation moderne de tarage installée au Laboratoire d'Essais de la SOCIÉTÉ HYDROTECHNIQUE DE FRANCE (2) et indiqué les principes techniques permettant de réaliser l'étalonnage de ces appareils avec le maximum possible de précision.

Depuis près de deux ans notre Laboratoire procède à des expériences ayant pour but d'analyser des phénomènes assez complexes qui se produisent dans ces opérations d'étalonnage. Le lecteur trouvera ci-après, répartis en cinq paragraphes complétant les deux premiers parus dans le N° 9 de la REVUE GÉNÉRALE DE L'HYDRAULIQUE, les résultats appuyés sur des expériences dont le nombre dépasse actuellement deux mille.

Voici la matière de ces 5 paragraphes nouveaux :

III. — Essais d'interprétation des phénomènes.

IV. — Constatations expérimentales; formule empirique et résultats numériques.

V. — Influence de la viscosité de l'huile de graissage.

VI. — Influence de l'obliquité du moulinet par rapport au courant.

VII. — Observations générales et conclusions.

III. — ESSAIS D'INTERPRÉTATION DES PHÉNOMÈNES.

Pour établir la formule d'étalonnage d'un moulinet (3) on relève sur la bande enregistreuse, pour la région où la vitesse de déplacement du chariot et celle de rotation

du moulinet sont bien constantes toutes les deux le nombre de tours n du moulinet correspondant à la vitesse V du chariot, l'axe du moulinet étant parfaitement orienté dans le sens du déplacement; on porte n en abscisses et V en ordonnées. La courbe de tarage :

$$V = f(n)$$

ainsi obtenue ne peut être entièrement admise, elle présente en effet la singularité suivante :

Supposons que le moulinet, placé dans l'eau courante, donne un nombre de tours à la seconde égal à n_0 pour une vitesse V_0 du courant. Pour obtenir ce même nombre de tours par le déplacement du moulinet en eau calme, il faut imprimer au train mobile une vitesse V_1 supérieure à V_0 . Cela semble tenir à ce que la partie immergée du train mobile (tige-support couramment dénommée « perche », carter du moulinet et accessoires) lance sur l'hélice des ondes directes, ou réfléchies sur les parois, dont les vitesses antagonistes freinent la rotation de celle-ci; d'une façon toute analogue on pourrait dire que si on déplace le moulinet avec la vitesse V_0 les vitesses antagonistes abaissent son nombre de tours de n_0 à n de sorte que le point figuratif du graphique $V = f(n)$ passe de M_0 à M .

Il en résulte par rapport au graphique normal qui, dans les régions qui nous occupent, est constitué par une droite (D), une protubérance (C) appelée « *pointe d'Epper* » du nom de l'ingénieur qui signala le premier le phénomène.

L'expérience montre que l'étendue de cette protubérance correspond à des vitesses V_A et V_B encadrant la vitesse critique $c = \sqrt{gH}$. La pointe d'Epper (c) doit être éliminée des résultats du tarage et remplacée par la droite AB que l'on trace au moyen des points expérimentaux situés à gauche de A et à droite de B.

Nous indiquons d'ailleurs au paragraphe VII une méthode permettant d'accentuer encore la précision des tarages.

(1) Voir *Revue Générale de l'Hydraulique*, N° 9, page 499.

(2) Rue Paul-Verlaine, à Grenoble.

(3) Voir paragraphe II de la note parue dans le N° 9 de la R. G. H., page 501.

Voici quelques hypothèses émises au sujet de la pointe d'Epper :

AMSLER LAFFONT invoque les ondes ou vagues qui suivent les corps se déplaçant dans un fluide; leur configuration, dit-il, dépend de la *largeur* et du *tirant d'eau* du canal, ce qui doit produire des anomalies dans le fonctionnement du moulinet.

Rateau écrit la formule du moulinet :

$$V = \frac{\varphi(V)}{V} + bn$$

la fonction $\varphi(V)$ se rapportant aux frottements de viscosité et aux chocs liquides; il met les anomalies sur le compte de la complexité supposée de la fonction $\varphi(V)$.

KREY (1) dit que l'eau, devant le corps du moulinet, prend la direction du mouvement du train, puis, qu'elle s'écarte pour couler en arrière le long de celui-ci; l'hélice n'est alors actionnée que par la différence entre la vitesse V de déplacement et la vitesse de l'eau, qui forme bourrelet devant le corps du moulinet. Le mouvement de l'eau devant le moulinet sera d'autant plus intense que le bourrelet d'eau pourra moins s'étendre à cause de la diminution éventuelle de la largeur du canal.

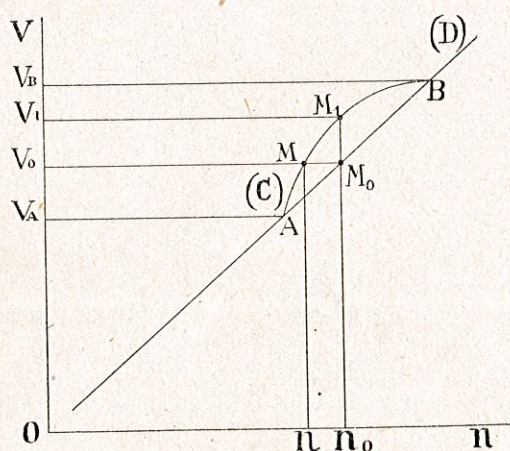


Fig. 6.

Ce raisonnement, qui renferme probablement une bonne part de la vérité, ne montre pas toutefois pourquoi des hauteurs d'eau décroissantes dans le canal, qui semblent devoir faciliter le dégagement du bourrelet, occasionnent, non compris le déplacement de la pointe d'Epper sur le graphique, une augmentation d'intensité de celle-ci.

MM. FOCH et JEAN LAURENT, dans une note parue en annexe au procès-verbal de la Séance du 14 février

1930 du Comité Technique de la SOCIÉTÉ HYDRO-TECHNIQUE DE FRANCE, note que nous ne pouvons résumer ici et à laquelle nous renvoyons le lecteur, ont proposé une interprétation très ingénieuse de la présence de pointes dans les graphiques de tarage; elle est basée sur la réflexion sur les parois du canal, d'ondes de surface produites par des ébranlements périodiques provoqués par le déplacement et la rotation combinés du moulinet.

Le Laboratoire de BEAUVERT, à la suite d'un grand nombre d'expériences, a pu constater que le phénomène présente une grande complexité et qu'il doit être bien difficile de synthétiser la pointe d'Epper en une formule analytique; il faudrait tenir compte d'influences secondaires que l'expérience a mises en évidence ou simplement fait soupçonner.

On peut cependant, en s'appuyant sur le phénomène des ondes lancées sur l'hélice par le train mobile et en négligeant les influences précédentes, arriver à une expression qualitative des quantités $\varepsilon = M_0 M_1$ de la figure 6.

Le train mobile, en se déplaçant dans l'eau calme, envoie devant lui des ondes qui s'épanouissent progressivement sur toute la largeur du canal et dont les intensités sont d'autant plus grandes que sa résistance au déplacement dans l'eau est plus grande; les vitesses antagonistes ε qui freinent la rotation de l'hélice lorsque les ondes la traversent sont ainsi en dépendance directe avec la forme des éléments du train mobile; une perche à section pisciforme par exemple sera moins influente qu'une perche circulaire de même contour apparent et moins influente aussi que le carter, lequel est beaucoup plus près de l'hélice; l'action sur cette dernière des parties supérieures immergées de la perche doit également s'amoinrir à mesure qu'on s'éloigne de l'hélice et il paraît impossible de tenir compte analytiquement et « a priori » de la variation de cette influence.

Les petites vitesses ε qui se produisent au passage d'une onde solitaire uniformément répartie sur toute la largeur du canal répondent à l'expression :

$$\varepsilon = c \frac{h}{H} \quad \text{avec } h = m \frac{W^2}{b^2 H^3} \quad (1)$$

ce qui donne par l'élimination de h :

$$\varepsilon = m \frac{c}{b^2 H^4} W^2 \quad (2)$$

expressions dans lesquelles $c = \sqrt{gH}$ représente la célérité de l'onde, h sa hauteur, W son volume total

et H la hauteur d'eau dans le canal; m est égal à $\frac{3}{16}$;

(1) *Wasserkraft und Wasserwirtschaft*, N° 23, Munich, 1931.

mais il est beaucoup plus grand dans le cas présent où l'hélice est atteinte directement avant que les ondes se soient réparties sur toute la largeur du canal.

Quant au volume W qu'aurait une onde uniformément répartie sur toute la largeur du canal et produisant le même effet que le train mobile nous en écrirons une expression en faisant un rapprochement entre la résistance

$$R = K S \tilde{\phi} \frac{V^2}{g}$$

du train au déplacement dans l'eau et le poids $\tilde{\phi} W$ de l'onde correspondante; en d'autres termes nous posons

$$W = \lambda S \frac{V^2}{g} \quad (3)$$

S représentant le contour apparent dans le sens du mouvement de la partie agissante du train mobile sur l'hélice du moulinet, V la vitesse de déplacement et λ une fonction du nombre de Reynolds qui, dans les limites de nos expériences, peut être considérée comme constante.

Les petites vitesses antagonistes ε , représentées par le segment $M_0 M_1$ de la figure 6 prendraient ainsi l'expression :

$$\varepsilon = A \frac{c \cdot S^2}{b^2 H^4} \left(\frac{V^2}{g} \right)^2 \quad (4)$$

A étant une constante.

L'analyse dimensionnelle ne peut nous donner qu'une forme générale de ε mais, aidée de l'expression (4), elle va nous permettre de généraliser celle-ci.

Considérons les quantités ε comme fonctions seulement des cinq grandeurs

$$g \quad b \quad H \quad S \quad \text{et} \quad V$$

dont les significations sont déjà connues; le rapport sans

dimensions $\frac{\varepsilon}{c}$ est donc fonction (théorème de Waschy)

de 5 — ~~2~~ = 3 paramètres de dimensions nulles formés avec ces 5 grandeurs; choisissons :

$$\frac{b}{H}, \quad \frac{S}{b H} \quad \text{et} \quad \frac{V^2}{g H}$$

on a ainsi

$$\frac{\varepsilon}{c} = F \left(\frac{S}{b H}, \frac{b}{H}, \frac{V^2}{g H} \right) \quad (5)$$

L'équation (4) est ~~donc~~ de cette forme car elle s'écrit identiquement : *sensible*

$$\frac{\varepsilon}{c} = A \left(\frac{S}{b H} \right)^2 \left(\frac{V^2}{g H} \right)^2$$

Sans altérer son homogénéité nous pouvons la généraliser en l'écrivant :

$$\varepsilon = K \cdot c \left(\frac{S}{b H} \right)^m \left(\frac{V^2}{g H} \right)^p \quad (6)$$

les quantités K , m et p devant être déterminées par l'expérience.

Observation. — L'expérience a montré que dans le phénomène du tarage en eau calme se manifestent des influences supplémentaires qu'il paraît bien difficile de mettre en compte analytiquement; la formule (6) qui « a priori » nous paraissait pouvoir se prêter à une interprétation suffisante des faits a été amendée quelque peu par les faits, ainsi qu'on s'en rendra compte au chapitre suivant.

Il est cependant remarquable que toutes les conséquences de la formule (4) sont vraies qualitativement. L'expérience montre en effet que l'effet de freinage accusé par la pointe d'Epper :

1°) Est d'autant plus grand, dans la région où $V < \sqrt{g H}$, que la vitesse V de déplacement et le contour apparent S de la partie immergée du train sont plus grands;

2°) Est d'autant plus petit que la largeur b du canal et la hauteur d'eau H dans celui-ci sont plus grandes.

IV. — CARACTERISTIQUES DE LA POINTE D'EPER.

Première partie.

CONSTATATIONS EXPÉRIMENTALES.

Influence de la perche (Fig. 7, 8 et 9). — Ainsi que nous l'avons signalé au chapitre précédent, la quan-

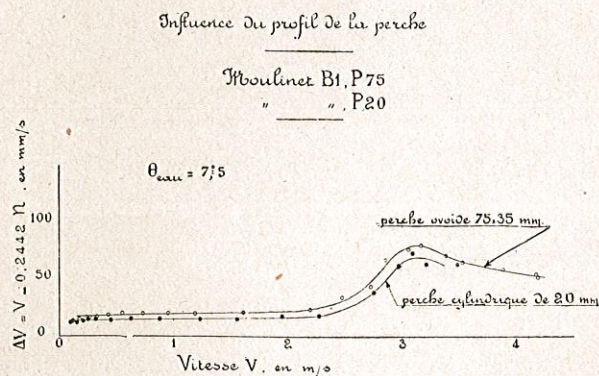


Fig. 7.

tité ε diminue ou augmente suivant que la section horizontale de la perche est plus ou moins bien étudiée au

perche invariable, la quantité ε augmente quand on enfonce davantage le moulinet sous la surface libre; il y a

Influence du profil de la perche

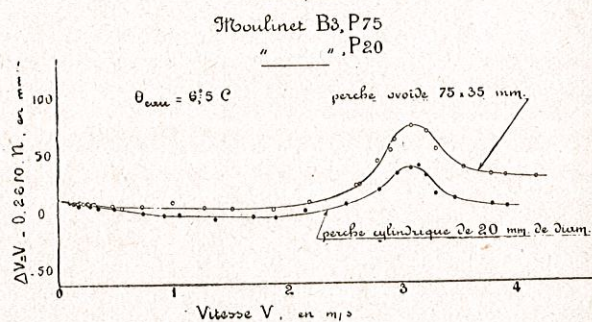


Fig. 8.

point de vue de sa résistance au déplacement dans l'eau; la section pisciforme, par exemple, est préférable à la section elliptique ou circulaire.

Influence du profil de la perche

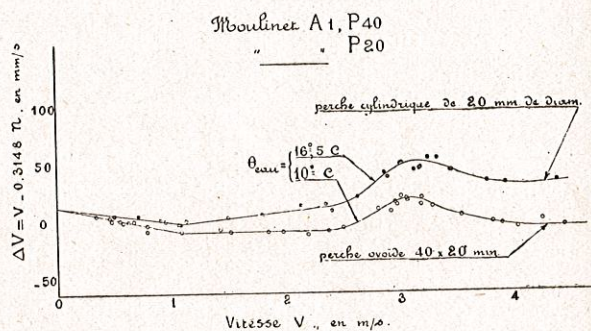


Fig. 9.

De deux perches ayant des sections géométriquement semblables, celle ayant la plus petite section donne les plus petits ε .

Influence de la profondeur d'immersion avec longueur de perche immergée variable.

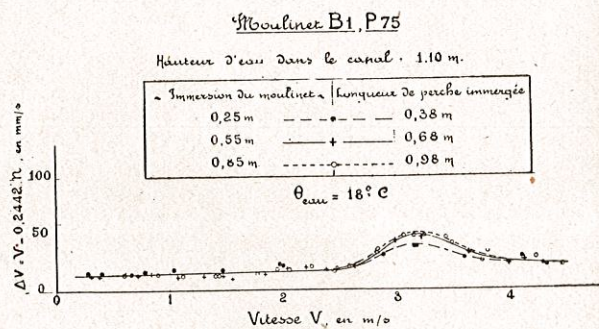


Fig. 10.

Influence de la profondeur d'immersion (Fig. 10 et 11). — a) Le moulinet étant fixé à un endroit de la

Influence de la profondeur d'immersion avec longueur de perche immergée constante

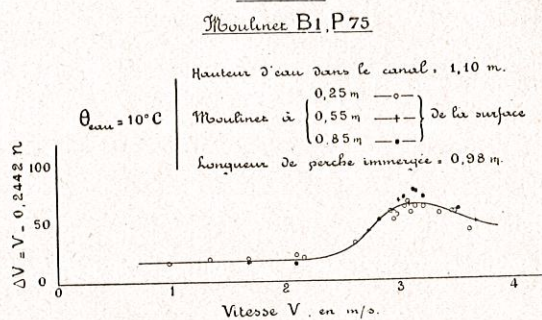


Fig. 11.

lieu de remarquer en passant que l'influence particulière du carter prend d'autant plus d'importance *relative* que l'immersion est plus faible, ce qui rend assez délicate la comparaison entre des profondeurs d'immersion différentes.

b) L'expérience qui consiste à laisser fixe la partie immergée de la perche et à faire glisser le moulinet le long de cette perche, donne, pour une hauteur d'eau constante dans le canal, un contour apparent S constant et la pointe d'Epper ne semble pas en éprouver de modification, si l'on tient compte de l'approximation sur laquelle on peut compter dans les essais.

Influence de la hauteur d'eau dans le canal (Fig. 12, 13 et 14). — a) Les valeurs de ε sont d'autant plus grandes que la hauteur d'eau H est plus faible.

Influence de la profondeur d'eau H dans le canal.

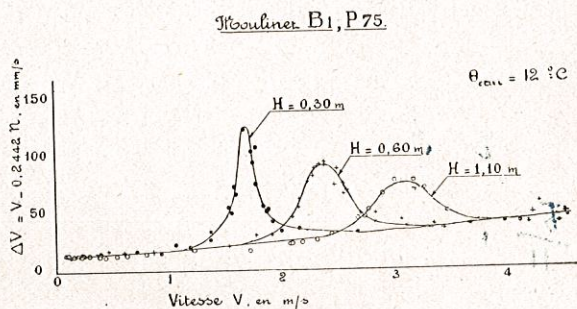


Fig. 12.

b) Plus la hauteur d'eau H est faible, plus la pointe d'Epper est *abrupte*; elle s'étale de plus en plus pour les vitesses supérieures à la vitesse critique $c = \sqrt{gH}$ lorsqu'on augmente cette hauteur d'eau.

c) Le maximum de ε se produit un peu avant la valeur de V égale à la vitesse critique et s'établit d'autant plus près de cette valeur, $V = c$, que la profondeur d'eau est plus faible.

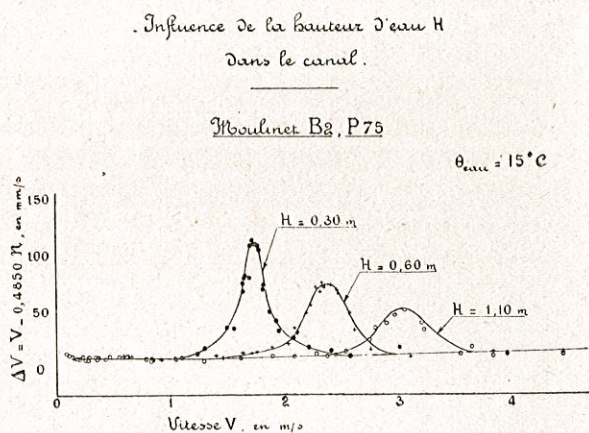


Fig. 13.

Influence de la largeur du canal. — Les valeurs de ε sont d'autant plus grandes que le canal est plus étroit.

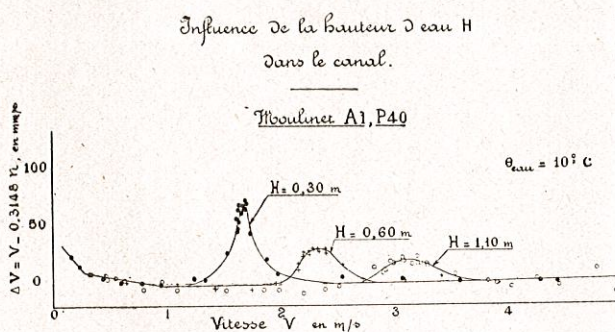


Fig. 14.

Remarque générale. — Comme on le voit la formule (4) est en accord, au point de vue *qualitatif* avec toutes les constatations précédentes; mais en dehors des influences évidentes mises en compte dans cette formule, il en est que l'on ne peut songer à mettre en compte analytiquement; il en résulte que les formules (4) ou (6) n'expriment *quantitativement* le phénomène que d'une façon approchée. Celle qui paraît devoir apporter la plus grosse part de la modification que l'expérience fait subir aux formules théoriques, est certainement le mode d'action perturbatrice du train mobile (1). Il est en effet

(1) Il faut entendre par là un train mobile bien déterminé (perche et carter) car le même moulinet monté sur deux perches différentes par exemple, réalise des trains distincts produisant des pointes d'Epper différentes.

fort probable que l'action des différentes parties de la perche doit être d'autant plus faible qu'elles sont plus éloignées de l'hélice; quant au carter sa forme est plus résistante au déplacement que celle de la perche; par surcroît il est très voisin de l'hélice; son action sur cette dernière doit présenter une notable prépondérance sur l'action de la perche; cela conduit à penser que la « partie agissante » du contour apparent au lieu d'être le contour apparent immergé tout entier, C , n'est qu'une fraction de S dont l'expression analytique $\varphi(S)$ ne paraît guère pouvoir être précisée.

Dans les limites où il nous a été donné d'opérer, si l'on enfonce progressivement sous la surface libre le moulinet invariablement lié à sa perche, la variation de ε qui, d'après la formule (6), devrait comporter le même exposant pour S et pour b , donne l'exposant $\frac{1}{2}$ pour S et 1 pour b .

Si, au lieu de cela, on laisse S et H constants en faisant coulisser le moulinet sur une perche dont la hauteur immergée reste invariable, l'expérience décèle une influence négligeable de la profondeur d'immersion.

Il semble que l'écart entre la formule théorique (4) et la formule expérimentale qu'on trouvera plus loin, doive provenir de cette action inégale sur l'hélice des diverses parties du train mobile car cela atteint l'hypothèse de l'action uniforme de ce train que comporte la formule (3); disons de suite que — l'expérience ayant montré que l'exposant m de la formule (4) est égal à 1 — il faudrait, pour que la formule théorique donnant le maximum ε_m de la pointe d'Epper, fût identique à

la formule expérimentale (8), remplacer S par $\sqrt{\frac{S}{H}}$,

ce qui semblerait indiquer que l'action du train mobile serait directement dépendante de la hauteur d'eau dans le canal.

Observation. — Nous avons dit au paragraphe III que pour établir la formule d'étalonnage d'un moulinet on utilise, sur la bande enregistreuse, la région où la vitesse de déplacement du chariot et celle de rotation du moulinet sont bien constantes toutes les deux; à partir du moment où le démarrage est terminé, c'est-à-dire où la vitesse du chariot est constante, la vitesse de rotation du moulinet peut continuer à être freinée encore lorsque la vitesse du chariot est supérieure à la célérité $\sqrt{gH}$ des ondes; en effet ces dernières, pendant la période de démarrage du chariot, ont pris une avance sur celui-ci de sorte que les vitesses antagonistes agissent encore tant que le front d'ondes n'a pas été rejoint et dépassé par l'hélice.

Deuxième partie.

FORMULE EMPIRIQUE DONNANT LE MAXIMUM
DE LA POINTE.

Nous avons recherché directement les influences séparées des diverses grandeurs :

$$\underline{V} \quad \underline{b} \quad \underline{H} \quad \text{et} \quad \underline{S}$$

précédemment définies; mais la complexité de ces phénomènes rend le champ d'exploration si étendu que pour tâcher de formuler une expression pratique du maximum de la pointe d'Epper, nous avons dû, malgré le nombre actuel de nos expériences, qui dépasse deux mille, faire état également des résultats avancés par d'autres expérimentateurs.

L'influence de la vitesse V de déplacement, dont dépend la nature même de la courbe, nous semble trop difficile à exprimer analytiquement en l'état actuel des données (1); c'est pourquoi nous avons adopté, pour concrétiser nos résultats, la forme simplifiée que voici qui suffit amplement aux besoins pratiques :

Nous supposons, — cette hypothèse, suffisamment approchée, se trouve du reste corrigée par le jeu de la constante de la formule pratique — que le maximum ϵ_m de la pointe, que seul nous exprimerons analytiquement laissant de côté l'expression de ϵ en fonction de la vitesse V , se produit exactement pour la valeur de V égale à la célérité $c = \sqrt{gH}$ des ondes perturbatrices.

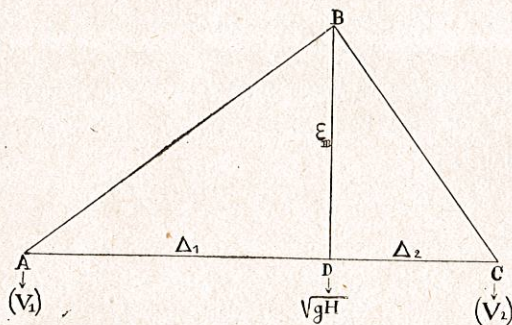


Fig. 15.

Nous synthétiserons alors la pointe d'Epper par les deux côtés AB et BC d'un triangle (fig. 15) dont la hauteur BD est le maximum ϵ_m de ϵ et dont la base,

(1) Signalons simplement que l'exposant p de la formule (6) semble varier avec le diamètre de l'hélice et avec le type du moulinet et paraît devoir se tenir aux environs de $p = 4$.

graduée en vitesses V , représentera l'amplitude au moyen des deux segments

$$\Delta_1 = AD = \sqrt{gH} - V_1$$

$$\Delta_2 = DC = V_2 - \sqrt{gH}$$

V_1 et V_2 désignant les vitesses où, respectivement la quantité ϵ devient appréciable puis disparaît.

La grandeur de la pointe sera définie par les 3 rapports :

$$R_0 = \frac{\epsilon_m}{\sqrt{gH}}; \quad R_1 = \frac{\epsilon_m}{\Delta_1}; \quad R_2 = \frac{\epsilon_m}{\Delta_2}$$

D'après l'équation (6) dans laquelle on remplace c et V par $\sqrt{gH}$ l'expression de ϵ_m devient (1) :

$$\epsilon_m = K \sqrt{g} \frac{S^m}{b^m H^{m-1/2}} \quad (7)$$

De nos expériences, complétées par les résultats obtenus à la Station de Berlin (qui n'a toutefois pas mis en cause l'influence du contour apparent immergé du train), nous avons conclu à une valeur voisine de l'unité pour l'exposant de b ; nos propres essais indiquent que, toutes choses égales, la variation de ϵ_m est sensiblement proportionnelle à la racine carrée du contour apparent S et en raison inverse de la profondeur d'eau H du canal.

En résumé, la formule pratique à laquelle nous nous arrêtons est :

$$\epsilon_{max} = a \cdot \frac{\sqrt{S}}{b \cdot H} \quad (8)$$

les dimensions du facteur a étant celles, $a = k \cdot \nu$ d'un coefficient de viscosité cinématique.

Remarque. — L'influence, peu prévisible, du contour apparent immergé du train mobile, semble se déceler maintenant plus clairement; en effet si on fait $m = 1$ dans la formule théorique (7), ce qui donne :

$$\epsilon_{max} = K \sqrt{g} \frac{S}{b \sqrt{H}}$$

on constate que pour retrouver la formule pratique (8), il suffit de remplacer, comme nous l'avons dit à la fin

(1) Si au lieu et place du paramètre $\frac{S}{bH}$ on avait adopté $\frac{S}{bh}$

(h = hauteur de l'onde uniformément répartie), on aurait été conduit à l'expression :

$$\epsilon_m = k \frac{S^{\frac{m}{m+1}}}{b^{\frac{m}{m+1}} H^{\frac{m-1}{2(m+1)}}} \frac{1}{H^{\frac{m-1}{2(m+1)}}}$$

qui ne donne pas une forme satisfaisante des influences respectives des quantités S , H et b .

de la première partie du présent chapitre, l'expression S de l'action du contour apparent par l'expression $\sqrt{\frac{S}{H}}$

Nous n'insisterons pas davantage sur ces considérations théoriques.

Troisième partie.

RÉSULTATS NUMÉRIQUES.

Nous exposons ici des résultats typiques provenant d'essais pratiqués sur des moulinets divers et plus particulièrement sur les deux suivants :

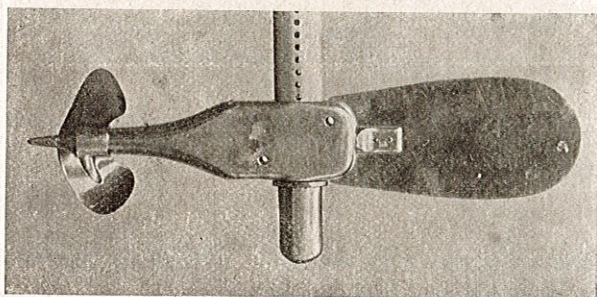


FIG. 16.

1°) *Moulinet A* (fig. 16) ; la partie à section rectangulaire du carter a 30 mm. de largeur et 64 mm. de hauteur ; sa longueur est de 218 mm., il est effilé à l'avant ; il possède 2 hélices de 125 mm. de diamètre et 0,30 m. de pas environ : l'hélice N° 1 a 2 pales et l'hélice N° 2 a 3 pales ; nous désignerons respectivement ces deux montages par :

A_1 et A_2

Ces montages peuvent, d'autre part, être réalisés soit sur une perche ronde de 20 mm. de diamètre, soit sur une perche à section ovoïde de 40×20 ; nous ferons suivre les indications ci-dessus de l'indication P 20 pour la perche ronde et P 40 pour la perche ovoïde de sorte par exemple que A_2 , P 20 signifie : moulinet A avec hélice N° 2, monté sur perche ronde de 20 mm. de diamètre.

2°) *Moulinet B* (fig. 17) ; son carter est à section rectangulaire ; il a 26 mm. de largeur, 64 mm. de hauteur et 150 mm. de longueur ; ses trois hélices ont 125 mm. de diamètre :

l'hélice N° 1 a 2 pales et un pas de 0,25

l'hélice N° 2 a 2 pales et un pas de 0,50

l'hélice N° 3 a 3 pales et un pas de 0,25

les perches sont au nombre de 2 : une perche ronde de 20 mm. de diamètre et une perche à section ovoïde de 75×35 ; comme précédemment la notation B2 P 75 par exemple signifie : moulinet B avec hélice N° 2, monté sur perche ovoïde de 75×35 .

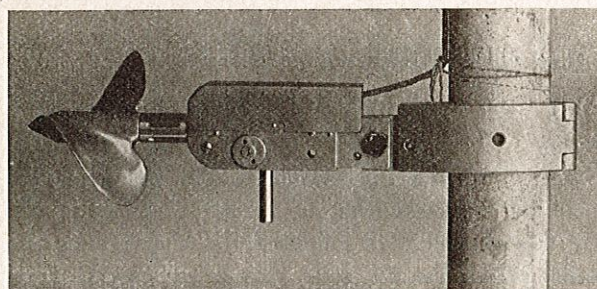


FIG. 17.

Les tableaux ci-après donnent quelques résultats tirés des figures 12, 13 et 14 (1).

MOULINET AU CENTRE DE LA SECTION D'EAU

$b = 2$ m. Hauteur d'eau H variable.

Type Valeur de a	H (m)	S (mq)	ε_m		R_0	R_1	R_2
			mesuré (m)	calculé (m)			
A1. P 40 — $a = 0,33$	0,30	0,013	0,068	0,063	0,040	0,11	0,08
	0,60	0,016	0,032	0,035	0,013	0,08	0,05
	1,10	0,021	0,020	0,022	0,007	0,05	0,03
B1. P 75 B2. P 75 — $a = 0,52$	0,30	0,014	0,104	0,102	0,060	0,13	0,09
	0,60	0,0195	0,061	0,060	0,026	0,10	0,07
	1,10	0,028	0,040	0,039	0,013	0,08	0,05

(1) Voir la *Revue Générale de l'Hydraulique*, N° 12, page 663.

On voit que la quantité R_0 , qui donne le pourcentage du maximum de la pointe par rapport à la vitesse correspondante, varie de 4 à 6 centièmes pour une profondeur d'eau de 0,30 m. à un centième environ pour une profondeur d'eau de 1,10 m. et que l'influence des dimensions de la perche y est très marquée.

Quant aux délimitations de R_1 et R_2 elles ne sont

pas suffisamment accusées pour qu'il soit possible de les préciser davantage.

Pour l'enfoncement sous la surface libre du moulinet invariablement lié à sa perche, la hauteur d'eau dans le canal restant constante, le moulinet B1. P 75 nous a donné les résultats ci-après :

PROFONDEUR D'IMMERSION h VARIABLE

(hauteur d'eau $H = 1,10$ m.)

Type Valeur de a	h (m)	S (mq)	ε_m	
			mesuré	calculé
B1. P 75 — $a = 0,52$	0,25	0,017	0,0225	0,031
	0,55	0,028	0,031	0,039
	0,85	0,045	0,0335	0,050

Ceci appelle quelques observations :

1°) Pour $h = 0,55$ m. (moulinet au centre de la section on a $m = 0,039$ dans le premier tableau et $m = 0,031$ dans le second; l'écart par rapport à la vitesse correspondante est de 2,5 pour mille; cela tient certainement à la différence des températures auxquelles ont eu lieu ces deux séries d'expériences, de 10 degrés à 18 degrés soit 8 degrés de plus; à la variation de viscosité de l'huile de graissage vient encore s'ajouter un abaissement d'environ 20 % du coefficient de viscosité de l'eau d'où résulte une atténuation des ondes perturbatrices.

2°) La partie supérieure immergée de la perche freine d'autant moins la rotation de l'hélice que le moulinet est plus enfoncé sous la surface libre. La figure 10 et le tableau précédent montrent en effet que les deux courbes $h = 0,55$ m. et $h = 0,85$ m. sont très voisines l'une de l'autre; la formule (8) résultant de nos essais ne saurait être étendue à des immersions indéfinies.

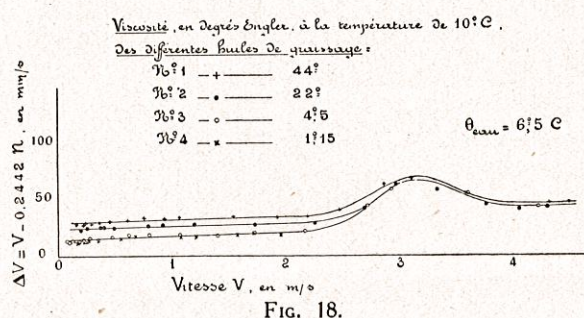
V. — INFLUENCE DE LA VISCOSITE DE L'HUILE DE GRAISSAGE.

Dans notre moulinet B, de construction récente, l'hélice fait corps avec son moyeu qui forme réservoir d'huile; à l'intérieur de ce dernier est un axe fixe portant les roulements à billes sur lesquels tourne le moyeu. C'est principalement aux petites vitesses que la viscosité de l'huile influe sur la rotation du moulinet, les frottements ayant alors une importance relative plus grande.

Quelques tarages nous ont permis d'apprécier (voir figures 18 et 19) la valeur de cette influence.

Influence de l'huile de graissage

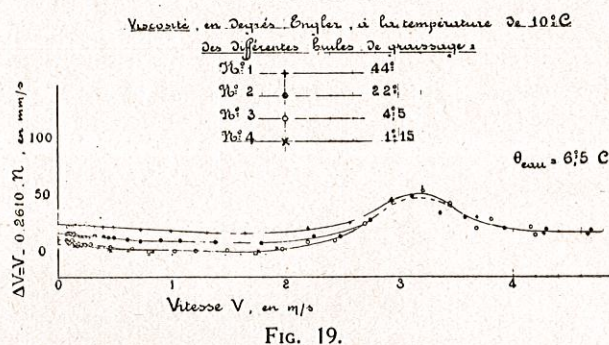
Moulinet B1, P75



La viscosité des huiles utilisées a été mesurée à l'aide d'un viscosimètre Engler.

Influence de l'huile de graissage

Moulinet B3, P75



Ce viscosimètre comporte deux récipients concentriques, la partie annulaire recevant un liquide dont le rôle est de maintenir l'huile versée dans le récipient central à une température constante; cette huile a un volume connu, soit 240 centimètres cubes; on en laisse écouler 200 centimètres cubes par l'ajutage situé au bas du récipient central, cet ajutage étant obturé par un pointeau pendant le remplissage. Le degré Engler est par définition le rapport du temps d'écoulement de l'huile à celui que met l'eau distillée sur laquelle on pratique la même opération.

Les huiles expérimentées formaient la gamme suivante des viscosités mesurées à 10° C. :

Lubrifiant	Degrés Engler	Viscosité C.G.S. (en poises)
Pétrole	1,15	0,02
Huile N° 1 . . .	4,5	0,29
» N° 2 . . .	22,2	1,62
» N° 3 . . .	44	3,22

Signalons de suite que lorsque le moulinet est immobile dans l'eau celle-ci imprime sa température à l'huile de graissage mais lorsque le moulinet est en rotation la température de l'huile s'élève d'autant plus que sa vitesse est plus grande. Aussi les figures 18 et 19 montrent-elles que les courbes relatives aux hélices à 2 pales et à 3 pales sont sensiblement parallèles pour des vitesses inférieures à 2 m/sec et qu'elles ont tendance à se rejoindre aux grandes vitesses.

Entre le pétrole pur et l'huile à 4,5 degrés Engler l'écart, comme on peut en juger, est très faible mais quand on atteint des viscosités de 20° Engler, l'écart absolu avec les premières atteint 1 centimètre, et presque 2 centimètres avec des huiles de 44° Engler.

Il est donc indispensable que les moulinets soient utilisés avec l'huile même qui a servi au tarage; faute de prendre cette précaution, on s'expose à des erreurs, qui, aux petites vitesses, peuvent atteindre un pourcentage énorme de la vitesse avec une répercussion du même ordre sur les rendements de turbines calculés dans ces conditions.

VI. — INFLUENCE DE L'OBLIQUITE DU MOULINET PAR RAPPORT AU COURANT.

Lorsqu'on jauge au moulinet le débit d'un canal ou d'une rivière, on mesure les vitesses de l'eau dans une section que l'on choisit autant que possible verticale et normale à l'axe du courant. Soit :

$$V_0 = a_0 + b_0 n \quad (1)$$

la formule de tarage du moulinet dans laquelle V_0 est la vitesse des filets liquides et n le nombre de tours correspondant lorsque l'axe du moulinet se confond avec la direction du courant.

S'il arrive qu'en certaines régions de la section de jaugeage A B le courant soit oblique par rapport à la normale (N) à cette section et fasse avec cette dernière un angle α le nombre de tours à la seconde n_α du moulinet est inférieur au nombre de tours n correspondant à la vitesse réelle V_0 des filets liquides; ce nombre n_α est d'autant plus petit que l'angle α est plus grand (Voir figure 20).

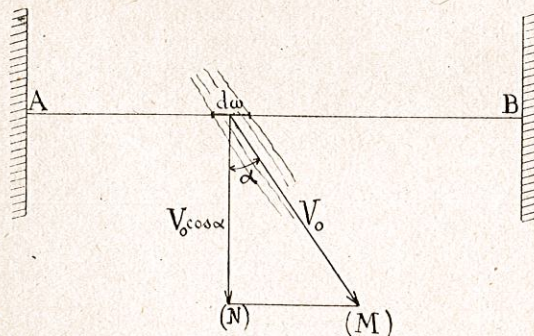


FIG. 20.

Or le débit élémentaire du courant à travers un élément $d\omega$ de la section de jaugeage est :

$$d\omega V_0 \cos \alpha$$

Influence de l'obliquité

Moulinet B1.P75

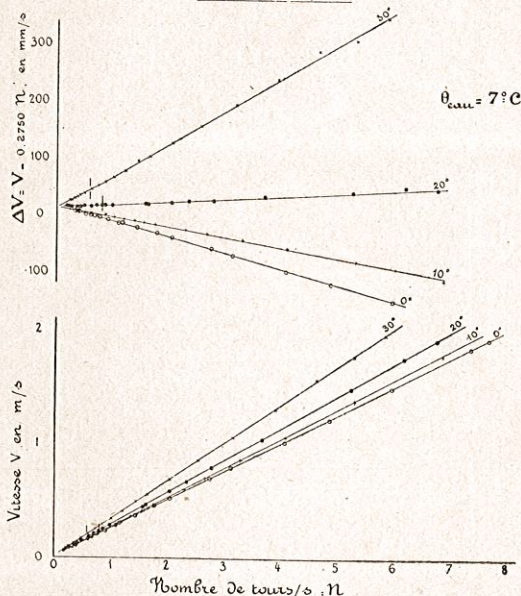


FIG. 21.

Il serait donc intéressant que le nombre de tours introduit dans la formule de tarage (1) donnât une vitesse

$$V_\alpha = a_0 + b_0 n_\alpha \quad (2)$$

précisément égale à la composante $V_0 \cos \alpha$, suivant la normale (N) à la section de jaugeage, de la vitesse des filets liquides c'est-à-dire que l'on eût :

$$V_z = V_0 \cos \alpha \quad (3)$$

Influence de l'obliquité

Moulinet B'z, P75

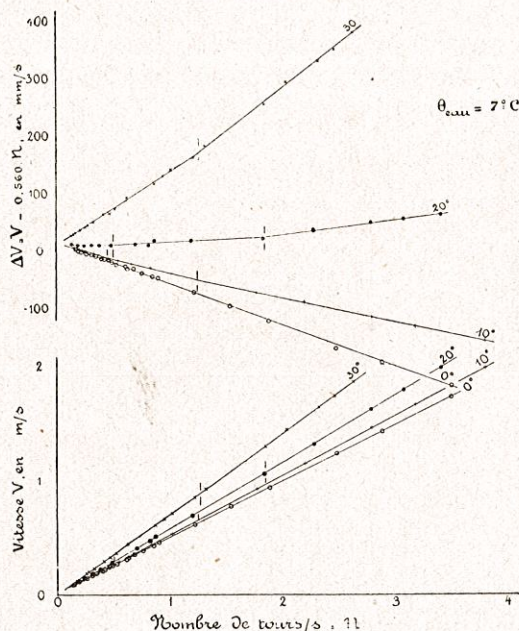


FIG. 22.

Le moulinet, par la réduction de son nombre de tours suivant l'équation (3) corrigerait automatiquement l'in-

Influence de l'obliquité

Moulinet B3, P75

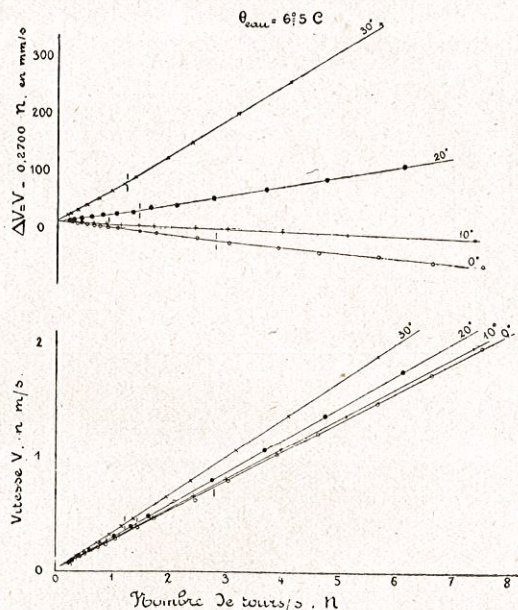


FIG. 23.

fluence de l'obliquité des filets dans le calcul des débits et rendrait inutile des tarages spéciaux sous des angles divers.

Pour étudier le degré de réalisation de cette condition (3) les essais suivants ont été exécutés à la Station d'étalonnage du Laboratoire de Beauvert.

1°) Le moulinet a d'abord été taré avec son axe dans la direction du déplacement du chariot, ce qui a donné, les vitesses V_0 étant portées en ordonnées et les nombres de tours n en abscisses, une ou plusieurs droites représentées par l'équation (1).

Influence de l'obliquité

Moulinet B"
 hélice 3 pales
 diamètre 9 cm
 carde protecteur

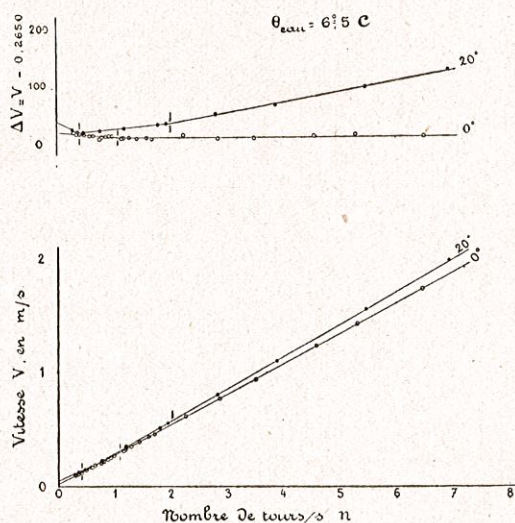


FIG. 24.

2°) On l'a ensuite orienté de façon que son axe fasse un angle α avec la direction du déplacement du chariot; pour chaque angle α on a fait un étalonnage complet qui s'est aussi traduit (voir figures 21 à 25) par une ou plusieurs droites d'équation

$$V_0 = a_\alpha + b_\alpha \cdot n_\alpha \quad (4)$$

n_α étant le nombre de tours du moulinet dans un courant dont la vitesse réelle V_0 fait l'angle α avec l'axe du moulinet.

Au lieu de cette vraie vitesse V_0 du courant la formule d'étalonnage (1) indique pour le nombre de tours n_α , une vitesse donnée par l'équation (2).

La condition de réalisation de la relation (3) est ainsi :

$$a_0 + b_0 \cdot n_\alpha = (a_\alpha + b_\alpha \cdot n_\alpha) \cos \alpha$$

or a_0 et a_α sont, d'une part, petits vis à vis de $b_0 \cdot n_\alpha$ et $b_\alpha \cdot n_\alpha$ et, d'autre part, sensiblement égaux.

Influence de l'obliquité

Moulinet A'2 P.40

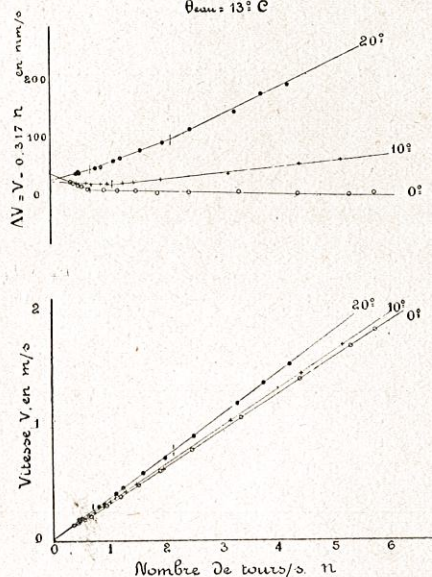
 $\theta_{eau} = 13^\circ \text{ C}$ 

FIG. 25.

La condition (3) s'écrit donc très approximativement :

$$b_0 = b_\alpha \cos \alpha \quad (5)$$

b_0 et b_α étant les coefficients angulaires respectifs des droites représentatives des étalonnages pour

$$\alpha = 0 \quad \text{et} \quad \alpha \neq 0$$

Le tableau ci-après donne dans la deuxième colonne :

1°) Le coefficient b_0 de la formule (1),

2°) Les coefficients b_α désignés par b_{10} , b_{20} , b_{30} — pour des obliquités respectivement égales à 10° , 20° , 30° .

La troisième colonne donne les produits $b_\alpha \cdot \cos \alpha$.

Enfin la quatrième colonne donne le pourcentage par rapport à b_0 de l'écart $b_\alpha \cos \alpha - b_0$.

Donc, pour la plupart des moulinets, la vitesse V_α résultant de l'application de la formule d'étalonnage (1) est *plus petite* que la composante $V_0 \cos \alpha$ de la vitesse vraie V_0 des filets liquides.

Type de moulinet	Coefficients angulaires	Produits $b_\alpha \cos \alpha$	Ecart % $\frac{b_\alpha \cos \alpha - b_0}{b_0}$
Hélice à 2 pales, à arêtes biaisées (Type B).	$b_0 = 0,247$		
	$b_{10} = 0,257$	$b_{10} \cos 10 = 0,253$	2,4
	$b_{20} = 0,280$	$b_{20} \cos 20 = 0,263$	6,5
	$b_{30} = 0,333$	$b_{30} \cos 30 = 0,288$	16,6
Hélice à 2 pales, à arêtes biaisées (Type B).	$b_0 = 0,493$		
	$b_{10} = 0,518$	$b_{10} \cos 10 = 0,510$	3,5
	$b_{20} = 0,585$	$b_{20} \cos 20 = 0,550$	11,6
	$b_{30} = 0,713$	$b_{30} \cos 30 = 0,617$	25,2
Hélice à 3 pales à rais (Type B)	$b_0 = 0,261$		
	$b_{10} = 0,266$	$b_{10} \cos 10 = 0,262$	0,4
	$b_{20} = 0,287$	$b_{20} \cos 20 = 0,270$	3,4
	$b_{30} = 0,331$	$b_{30} \cos 30 = 0,287$	9,9
Hélice à 3 pales à arêtes biaisées et anneau protecteur (Type B).	$b_0 = 0,268$		
	$b_{20} = 0,283$	$b_{20} \cos 20 = 0,266$	0,7
Hélice à 3 pales, arêtes biaisées (Type A)	$b_0 = 0,315$		
	$b_{10} = 0,327$	$b_{10} \cos 10 = 0,322$	2,2
	$b_{20} = 0,364$	$b_{20} \cos 20 = 0,342$	8,6

Les hélices à 3 pales donnent des écarts notablement plus faibles que les hélices à 2 pales et comme, pour l'un des modèles, l'écart est négatif *il semble possible de construire des hélices convenant aux cas d'obliquité du courant.*

Une autre conclusion se dégage encore de ces essais : c'est que, pour des jaugeages de précision à faire dans des courants irréguliers, il y a lieu de faire étalonner les moulinets à l'obliquité.

VIII. — OBSERVATIONS GÉNÉRALES ET CONCLUSIONS.

Le problème auquel le Laboratoire de Beauvert s'est attaché présente, comme a pu s'en rendre compte, une réelle complexité; nous ne le considérons pas comme entièrement résolu et espérons le parfaire avec le temps.

De tous les résultats pratiques que l'on peut déduire de nos essais, nous voulons dire quelques mots du suivant qui nous paraît tout spécialement intéressant au point de vue des opérations d'étalonnage. L'installation de notre Laboratoire nous permet d'atteindre pour le chariot une vitesse de déplacement de 5 m/sec et cela va nous permettre d'améliorer encore la rigueur de nos étalonnages. Nous avons constaté, en effet, que les points obtenus aux grandes vitesses, de 3 à 5 m/sec par exemple, avec de faibles hauteurs d'eau se mettent régulièrement en ligne droite avec ceux relatifs aux vitesses de 1 à 2 m/sec alors que les points à grandes vitesses et grande hauteur d'eau présentent une dispersion qui dépasse des phénomènes secondaires difficilement analysables; cette dispersion d'ailleurs n'est pas excessive, elle est au plus de 1 %; on peut, en cela, incriminer le bourrelet d'eau qui se forme à l'avant du carter car l'anomalie est plus faible pour un carter effilé que pour un carter présentant une face verticale à l'avant; ce bourrelet, au surplus, semble devoir se réduire d'autant plus facilement, et par suite gêner d'autant moins la rotation de l'hélice voisine, qu'il se trouve sous une pression d'eau plus faible.

Aussi allons-nous nous préoccuper d'envisager le tarage en échappant complètement au phénomène de la pointe d'Epper et ceci de la façon suivante :

1°) Pour les vitesses jusqu'à 2 m/sec, le tarage s'effectuera avec 1,10 m. d'eau dans le canal; la pointe d'Epper relative à cette hauteur d'eau n'est pas encore atteinte.

2°) Pour les vitesses de 3 à 5 m/sec, il n'y aura que 0,30 m. à 0,35 m. d'eau dans le canal; on est ainsi au-delà de la pointe d'Epper relative à cette hauteur d'eau.

Ces chiffres correspondent à notre canal, qui a 2 mètres de largeur; il y aurait plus de difficulté avec un canal étroit, du fait de l'amplification des pointes; *mais il n'est pas nécessaire, comme on le voit, d'atteindre des largeurs supérieures à 2 mètres pour obtenir des tarages très précis, si on dispose de vitesses suffisantes.*

Si on considère également qu'avec une faible hauteur d'eau le *mécanisme* d'entraînement fatigue beaucoup moins du fait de la moindre résistance au déplacement, on voit que la méthode précédente présente des avantages très marqués sur le procédé à remplissage complet du canal.

— Quant à la *longueur d'un canal* de tarage, elle doit être suffisante pour qu'aux plus grandes vitesses à réaliser, on ait une vitesse parfaitement constante pendant une dizaine de secondes au moins.

— *L'huile de graissage* doit rester la même que celle employée pour le tarage, faute de quoi les jaugeages aux petites vitesses peuvent se trouver entachés d'erreurs sensibles.

Enfin les moulinets doivent être tarés à des intervalles de temps d'autant plus rapprochés qu'ils sont plus *fréquemment utilisés et transportés*, et de préférence après les opérations de jaugeage.

Beauvert, le 31 décembre 1936.

R. BOURGEAT,
D. CAHUZAC, J. DEULLIN.