SOCIETE HYDROTECHNIQUE DE FRANCE

LABORATOIRE DE BEAUVERT.

-:-:-:-:-

Exemplaire auteur
(Tirage à compte)
novembre 1936

RECHERCHES EXPERIMENTALES SUR L'ETALONNAGE EN EAU CALME DES APPAREILS DE MESURE HYDROMETRIQUES.

-:-:-:-

M. Bougeat

.- AVANT - PROPOS -.

-:-

Le Laboratoire de la SOCIETE HYDROTECHNIQUE DE FRANCE a déjà présenté des résultats de recherches théoriques et expérimentales qu'il a effectuées durant l'année 1935 sur les phénomènes que l'on peut observer quand on opère le tarage des moulinets en eau calme.

Ces recherches ont été poursuivies durant l'année 1936; afin de présenter clairement l'ensemble de cette étude, aussi importante au point de vue pratique qu'au point de vue théorique, nous avons réuni ci-après les résultats complets obtenus à ce jour; le lecteur sera ainsi dispensé de recourir au compte rendu du 31 Décembre 1935 qui ne comprend qu'une partie des résultats contenus dans celui-ci, et dont le texte a d'ailleurs reçu des precisions résultant des expériences ultérieures.

Rappelons que le chapitre III ne vise nullement après leshypothèses avancées à ce jour par divers savants et dont nous donnons un aperçu, à formuler une théorie définitive de la "Pointe d'Epper"; la question étant fort délicate, l'importance du présent travail réside d'ailleurs, toute théorie mise à part, dans la somme des résultats expérimentaux obtenus, acquis par des expériences dont le nombre dépasse deux mille.

Nous pensons interessant de faire préceder l'exposé de ces essais d'une description de l'installation moderne dont est pourvu notre Laboratoire pour le tarage des moulinets ainsi que de l'exposé de la méthode d'étalonnage.

-:-:-:-:-:-:-

Chap. I

DESCRIPTION DE L'INSTALLATION DE TARAGE DES MOULINETS.

LE CANAL DE TARAGE

a 2 mètres de largeur et 1,20 m de profondeur, sa longueur est de 90 mètres.

Un chariot en duralumin portant l'appareil à tarer se déplace sur des rails posés de part et d'autre du canal (fig 1)

Des colliers de serrage permettent de fixer, d'une façon très rigide, soit une seule perche-support de moulinet dans l'axe du canal, soit deux perches convenablement éloignées à la fois l'une de l'autre et des parois; un jeu de formes en bois s'adaptant à ces colliers permet d'y fixer les perches correspondant aux différents profils pratiquement utilisés.

Un système spécial de galets prévu au voisinage des roues assure au chariot un déplacement parfaitement rectiligne, sans vibrations et le protège en même temps contre tout déraillement.

Le chariot porte un siège qui permet à un observateur, s'il y a lieu, de se déplacer avec l'appareil expérimenté pour en observer le fonctionnement.

Six barres de cuivre isolées, réparties en deux groupes de trois le long de chaque rail, relient le chariot électriquement, par l'intermédiaire de contacts glissants portés par celui-ci aux appareils enregistreurs situés sur la plateforme de commande; quatre de ces barres sont affectées aux quatre moulinets qu'il est possible d'étalonner simultanément, la cinquième transmet l'enregistrement des distances parcourues, la sixième assure le retour commun à la batterie d'accumulateurs génératrice du courant.

INDICATION DES DISTANCES :

Un levier basculant porté par le chariot ferme un circuit électrique chaque fois qu'il vient rouler sur de petites cornières placées le long de la voie; ces cornières sont espacées de façon à donner un contact tous les deux mètres ou tous les dix mètres à volonté.

Pour les faibles vitesses un commutateur à main met hors circuit le levier précédent que remplacent trois segments sur la jante d'une roue du chariot dont la circonférence mesure 60 c/m et qui donnent ainsi un contact tous les 20 c/m.

L'ENTRAINEMENT :

a lieu par un câble tracteur qui s'enroule sur des poulies portées par le chariot; ~~un autre jeu de poulies montées également sur le chariot,~~ un autre jeu de poulies montées également sur le chariot, compense automatiquement les variations de longueur du câble dans la partie tractrice et dans la partie tirée et permet ainsi, par la suppression des à-coups, le déplacement à vitesse parfaitement uniforme.

MACHINERIE DE COMMANDE

Un moteur asynchrone d'environ 20 chevaux, (fig 2) entraîne un "variateur de vitesse" comprenant les deux organes suivants dans un même carter étanche :

1) Une pompe rotative à huile,

2) Un récepteur de construction semblable, formant turbine, alimenté par la pompe précédente.

Une commande à main, par volant gradué, agit sur un tiroir réglant les orifices d'admission de l'huile dans la pompe et d'évacuation de la turbine. Par exemple on augmente la vitesse de rotation en tournant à droite le volant à main, ce qui, simultanément augmente le débit de la pompe et diminue la section de sortie de la turbine.

La marche en sens inverse s'obtient en renversant le sens de l'écoulement de l'huile dans les deux organes semblables du variateur de vitesse.

Ce dernier actionne directement un train d'engrenages qui divise les vitesses précédentes soit par 2 pour la marche rapide, soit par 20 pour les déplacements ne dépassant pas la vitesse d'un mètre environ.

L'ensemble précédent permet ainsi d'obtenir une vitesse quelconque bien régulière depuis 5 centimètres seconde, jusqu'à environ 5 mètres.

Entre le train d'engrenages et la poulie à gorges d'entraînement du câble sont interposés successivement :

(un accouplement électromagnétique
)
(un volant régulateur
)
(un second accouplement électromagnétique

Les accouplements électromagnétiques sont alimentés par une petite commutatrice. Le premier, dit de sécurité, joue dans le cas où, pour le démarrage du moteur, l'admission du variateur de vitesse n'aurait pas été ramenée sensiblement à zéro. Le deuxième, dit d'entraînement, embraye la poulie à gorges actionnant le câble tracteur lorsque, la vitesse de rotation de la machinerie étant préalablement réglée on veut entraîner le chariot.

La mise en route et le freinage en fin de course du chariot sont rendus automatiques par un groupe de contacts et relais. L'accouplement électromagnétique d'entraînement est commandé par simple pression sur une touche dite " de départ "; lorsque le chariot arrive en fin de course, il agit sur un contact qui, par l'intermédiaire d'un relais, débraye l'accouplement d'entraînement et laisse en même temps, se resserrer sur la poulie du câble (laquelle est aménagée à la fois en poulie à gorges et poulie-frein) les mâchoires d'un frein très puissant. Il est d'ailleurs possible d'obtenir également l'arrêt du chariot en un point quelconque de son parcours par pression sur une touche dite "d'arrêt" produisant un effet tout semblable à celui du contact de fin de course.

APPAREIL ENREGISTREUR: (fig 3)

Les principaux organes coopérant à l'enregistrement automatique

du temps,
des distances parcourues
des contacts des moulinets

sont les suivants :

a) une batterie d'accumulateurs à 4 volts

b) un pendule battant à volonté la seconde ou la demi-seconde.

c) un chronographe

Ce dernier comporte 6 électro-aimants portant chacun un stylet inscripteur; le premier indique les temps contrôlés par le pendule, le second les distances parcourues; les quatre autres inscrivent les contacts de chacun des quatre moulinets ....

tarés simultanément (ce qui est exceptionnel, du reste) contacts qui se produisent le plus souvent tous les 20 ou 25 tours du moulinet. La bande de papier qui reçoit les 6 enregistrements précédents, se déroule, à volonté, soit à la vitesse de 5 m/m seconde, soit à la vitesse de 30 m/m/s, suivant qu'il s'agit d'une petite ou d'une grande vitesse de déplacement du chariot.

Cette description quoique très succinte, permet cependant de dégager les caractéristiques de l'installation de tarage de Beauvert.

Grâce à la transmission hydraulique interposée entre le moteur et le train d'engrenages et au système compensateur porté par le chariot, on obtient non seulement une échelle continue des vitesses, mais un déplacement du chariot à vitesse parfaitement constante, sans à-coups et sans vibrations de la perche supportant le moulinet; c'est là un point de la plus grande importance.

Les manoeuvres, comme on le voit, sont réduites au minimum : mise en route de la machinerie et des appareils enregistreurs, puis, pression sur la "touche de départ". L'opérateur devient alors un simple observateur et toute possibilité d'erreurs personnelles disparaît.

-:-:-:-:-:-:-:-

CHAPITRE II.

DETERMINATION DE LA FORMULE D'ETALONNAGE D'UN MOULINET.

POINTE D'EPPER

-:-

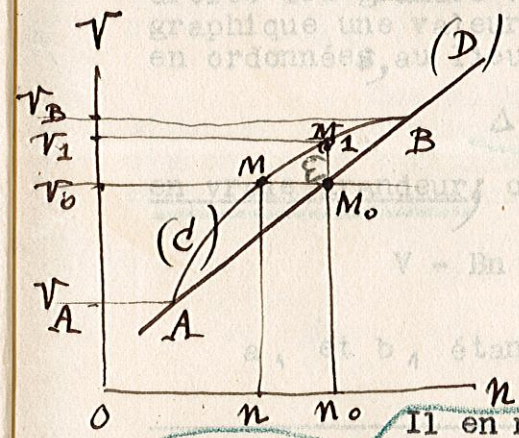
Sur la bande enregistreuse on relève, pour la région où la vitesse de déplacement du chariot et celle de rotation du moulinet sont bien constantes toutes les deux le nombre de tours n du moulinet correspondant à la vitesse du chariot V; on répète ce calcul pour chacune des vingt à vingt cinq expériences exécutées; on porte n en abcisses et V en ordonnées et on aurait ainsi la courbe de tarage cherchée :

$$V = f(n)$$

si le tarage en eau calme, dans un canal, ne présentait pas la singularité suivante :

Lorsque le moulinet est placé dans l'eau courante, il donne par exemple un nombre de tours à la seconde égal à no pour une vitesse Vo 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 Vo; celà tient à ce que la partie immergée de ce train mobile, composée de la perche (tige-support), du moulinet et de son carter émet des ondes dont les vitesses freinent la rotation du moulinet en diminuant d'autant celle qui provient de la vitesse V_1 du train mobile; on pourrait dire, d'une façon analogue, que si on déplace le moulinet dans l'eau calme avec la vitesse Vo les vitesses antagonistes des ondes abaissent le nombre de tours de no à n de sorte que le point figuratif du graphique V = f (n) passe de Mo à M_1



Il en résulte par rapport au graphique normal qui, dans les régions qui nous occupent, est constitué par une droite (D), une protubérance (C) que nous appellerons "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 Va et Vb 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.

Par exemple pour une profondeur d'eau H = 1,10 m donnant comme vitesse critique c = 3,285 m, on élimine les vitesses comprises entre 2;50 et 4,20 m/sec pour ne conserver que les vitesses allant de 0,05 à 2,50m. puis de 4,20 à 5,50m, ce dernier intervalle, réalisable à Beauvert, évite les risques résultant de l'extrapolation au delà des vitesses expérimentales réalisées à l'étalonnage lorsque ces vitesses ne dépassent pas 2,50 M/sec environ; nous indiquons, d'ailleurs au chap. VIII une méthode permettant d'accentuer encore la précision des tarages.

Les expériences et les calculs effectués par des techniciens avertis et bien au courant de la pratique de ces opérations donnent une très faible dispersion des points figuratifs du graphique d'étalonnage (1); dans les tarages de précision effectués à Beauvert, la dispersion des points - pour les moulinets de construction soignée - est pratiquement négligeable; elle correspond à des écarts relatifs de la vitesse qui sont de l'ordre de 3 à 4 millièmes pour les petites vitesses et diminuent progressivement pour ne plus dépasser le millième qu'exceptionnellement dès qu'on atteint 2 à 3 mètres de vitesse.

L'établissement d'un graphique d'étalonnage a lieu comme suit :

La courbe V = f(n) se remplace, avec une grande approximation par une ou plusieurs droites, trois au maximum et ceci de la façon suivante (fig.4 et 5)

Soit par exemple, V = a + bn l'équation définitive de la droite des grandes vitesses; B représentant, d'après ce premier graphique une valeur approchée du coefficient angulaire définitif b, on porte en ordonnées, au lieu de V, la différence,

$$\Delta V = V - Bn.$$

en vraie grandeur; on en déduit la droite (D_1) d'équation :

$$V - Bn = a_1 + b_1 n.$$

a_1 et b_1 étant relevées sur ce deuxième graphique.

---

(1) Pour donner un simple exemple des précautions à prendre, signalons que les deux premières expériences de chaque séance sont considérées comme nulles; elles donnent en effet des écarts supérieurs aux autres; ~~attribuables à une sorte~~ la mise en route du moulinet provoque probablement une égalisation du film d'huile de graissage qui se modifie par un repos prolongé.

L'équation définitive aux grandes vitesses est alors:

$$V = a_1 + (b_1 + B) n.$$

On opère de même pour la droite (D_2) et pour une troisième (D_3) si necessaire.

Le relèvement successif de ces droites dans l'ordre D_1 D_2 D_3 souligne l'influence croissante du frottement lorsque la vitesse diminue.

Ces frottements peuvent varier d'une façon importante suivant l'état du moulinet : serrage des pivots de l'axe de l'hélice avec plus ou moins de jeu, viscosité de l'huile de graissage, propreté du moulinet.

PRECISION DES ETALONNAGES

Le tarage en eau calme opéré avec tout le soin necessaire comporte, dans ses résultats, une précision naturellement en rapport avec le degré de perfection de l'appareillage utilisé. Nous avons déjà signalé précedemment la faible dispersion des points dans les graphiques établis au Laboratoire de la SOCIETE HYDROTECHNIQUE DE FRANCE : complétons ce point de vue en signalant que dans les tarages d'un même moulinet de bonne fabrication executés successivement à la station de Berlin, à celle de Berne, et à Beauvert, le graphique de Beauvert s'est placé entre les graphiques des premières stations, alors que les écarts maximum entre celles-ci étaient inférieurs à un pour cent dès les vitesses de 0,20 m. environ (fig 6).

Une méthode recommandable et que nous croyons devoir signaler en terminant consiste, dans les jaugeages exigeant une precision toute spéciale, à faire tarer le moulinet utilisé immédiatement après les mesures de jaugeage.

-:-:-:-:-:-:-:-

CHAPITRE III

-:-:-

ESSAI THEORIQUE D'EXPLICATION "A PRIORI" DE LA FORMATION DE LA POINTE D'EPPER

-:-:-:-

I/ NOTATIONS

b = largeur du canal à section rectangulaire contenant une hauteur d'eau H au repos.

h = hauteur d'une onde occupant toute la largeur du canal.

$c = \sqrt{gH}$ = célérité de cette onde.

W = b. W_1 = volume de cette onde, W_1 étant son volume par unité de largeur du canal.

u = vitesse moyenne horizontale du déplacement des molécules d'eau au passage de l'onde.

II/ ETUDE ANALYTIQUE

Dans le tarage des moulinets en eau calme le train mobile, composé de la perche (tige-support), du moulinet et de son carter provoque par son déplacement un double phénomène :

1) Tout d'abord il 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 la résistance au déplacement dans l'eau est plus grande; une perche à section piciforme par exemple sera à ce point de vue moins influente que le carter du moulinet lui-même; les vitesses antagonistes qui freinent la rotation de l'hélice lorsque les ondes la traversent seront ainsi en dépendance directe avec la forme des éléments du train mobile. Le carter étant très voisin de l'hélice agira de ce fait plus efficacement sur l'hélice que les parties supérieures de la perche dont l'action doit visiblement s'éteindre à mesure qu'on s'éloigne verticalement de l'hélice.

2) En second lieu le train mobile, en se déplaçant, soulève au-dessus de la surface libre un certain volume d'eau dont la grandeur est évidemment directement dépendante de la résistance au déplacement du train mobile, particulièrement dans la région

supérieure de sa partie immergée; ce volume d'eau, voisin de l'aplomb du moulinet, envoie sur celui-ci, tout en s'étalant progressivement dans le canal, des vitesses antagonistes qui se composent avec celles dûes aux ondes directes émises par la partie basse du train mobile.

Essayons de chiffrer cette double influence. On sait que les petites vitesses qui se produisent au passage d'une onde solitaire uniformément répartie sur toute la largeur d'un canal renfermant de l'eau au repos et la hauteur de l'onde sont données par les équations (1) et (2) ci-après :

$$\begin{cases} u = c \cdot \dfrac{h}{H} & (1) \\ h = \dfrac{3}{16} \cdot \dfrac{W_1^2}{H^3} & (2) \end{cases}$$

Eliminant h entre ces deux relations et remplaçant W_1 par $\frac{W}{b}$ la vitesse u prend la forme :

$$u = \frac{3}{16} \cdot \frac{c}{b^2 H^4} W^2 \qquad (3)$$

expression dans laquelle W représente le volume total d'une onde rectiligne, normale aux parois latérales, qui serait produite, par exemple, par le volume W déversé rapidement et également sur toute la largeur du canal à son origine (1).

Les vitesses u freinant la rotation du moulinet tant que - "a priori" du moins - la vitesse de déplacement de celui-ci est inférieure à la célérité $c = \sqrt{gH}$ des ondes; mais dans le cas présent, où l'hélice est atteinte directement avant que les ondes se soient réparties sur toute la largeur du canal, les vitesses u sont supérieures à celles de la formule (3) qui suppose le volume total W de l'onde uniformément réparti. Nous remplacerons donc le coefficient $\frac{3}{16}$ par un coefficient m que l'expérience sera chargée de déterminer et nous écrirons ces vitesses, représentées par le segment $\mathcal{E} = M_0 M_1$ de la fig. p.6 :

$$\mathcal{E} = m \cdot \frac{c}{b^2 H^4} W^2 \qquad (4)$$

D'autre part le volume W de l'onde produisant une action équivalente à celle du train mobile est en rapport direct avec la résistance du train; son expression est de la forme :

$$W = \lambda S \frac{V^2}{g} \qquad (5)$$

~~désignant le poids spécifique du liquide,~~

(1) Le volume total d'une onde de translation est égal à celui du volume d'eau qui lui a donné naissance.

V la vitesse de déplacement, S le contour apparent dans le sens du mouvement de la partie agissante du train mobile sur l'hélice du moulinet et λ une fonction du nombre de Reynolds qui, dans les limites de nos expériences, peut être considérée comme une constante. L'élimination de W entre (4) et (5) donne :

$$\mathcal{E} = A \cdot \frac{c\,S^2}{b^2 H^4} \left(\frac{V^2}{g}\right)^2 \qquad (6)$$

$\mathcal{E}$ correspond à l'écart entre la valeur théorique et la valeur mesurée

A étant une constante.

Disons de suite que toutes les conséquences de la formule (6) sont vraies qualitativement. L'expérience montre en effet que l'effet de freinage qui provoque la pointe d'Epper est :

(dans la région où $V < \sqrt{gH}$)

1°) D'autant plus grand que la vitesse V de déplacement et le contour apparent S de la partie immergée du train sont plus grands.

2°) D'autant plus petit que la largeur b du canal et la hauteur d'eau H dans le canal sont plus grands.

L'ANALYSE DIMENSIONNELLE ne peut nous donner qu'une forme générale de l'expression de $\mathcal{E}$; aidée de l'expression (6) elle nous donnera cependant une forme généralisée de celle-ci; les quantités $\mathcal{E}$ sont fonction des 5 grandeurs :

g b H S et V

dont les significations sont déjà connues; en particulier, la section mouillée bH et la célérité des ondes $c = \sqrt{gH}$ s'expriment en fonction de ces quantités et n'ont pas à intervenir.

Le rapport sans dimensions $\frac{\mathcal{E}}{c}$ est donc fonction (théorème de Waschy) de 5 - 3 = 2 paramètres de dimensions nulles formés avec ces 5 grandeurs; choisissons :

$$\frac{S}{bH} \quad \text{et} \quad \frac{V^2}{gH}$$

on a ainsi :

$$\frac{\mathcal{E}}{c} = F\left(\frac{S}{bH}, \frac{V^2}{gH}\right) \qquad (7)$$

L'équation (6) est bien de cette forme; elle s'écrit identiquement :

$$\frac{\varepsilon}{c} = A\left(\frac{S}{bH}\right)^2 \cdot \left(\frac{V^2}{gH}\right)^2$$

Sans altérer son homogénéité, généralisons-là par la substitution, aux exposants 2, d'exposants m et p indéterminés " a priori".

Nous écrivons finalement ;

$$\varepsilon = K.c\left(\frac{S}{bH}\right)^m \cdot \left(\frac{V^2}{gH}\right)^p \qquad (8)$$

L'expérience est ainsi chargée de déterminer les 3 quantités K, m, et p

-:-:-:-:-:-:-:-

Toutes les conséq. de (6) sont plus qualitatives et ... (voir p. 10)

Ce calcul que n/ n'avons présenté que pour donner l'idée

l'exp^e a montré que d'autres influences se manifestent

Remarquons toutefois que les conséquences etc... page 10

CHAPITRE IV

1ere PARTIE : CONSTATATIONS EXPERIMENTALES

Il nous paraît indispensable de résumer succintement les principales constatations faites à ce jour dans le tarage en eau calme des moulinets.

INFLUENCE DE LA PERCHE.- (fig. 9, 10 et 11) La quantité ε diminue ou augmente suivant que la section horizontale de la perche est plus ou moins bien étudiée au point de vue de sa résistance au déplacement dans l'eau; la section pisciforme, par exemple, est préférable à la section elliptique ou circulaire.

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.- (fig 12 et 13)

a) Le moulinet étant fixé à un endroit de la perche invariable, la quantité ε augmente quand on enfonce davantage le moulinet sous la surface libre; il y a lieu de remarquer en passant que l'influence particulière du carter du moulinet 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 14, 15 et 16)

(a) Les valeurs de ε sont d'autant plus grandes que la hauteur d'eau H est plus faible.

(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.

INFLUENCE DE LA LARGEUR DU CANAL.- Les valeurs de ε sont d'autant plus grandes que le canal est plus étroit.

REMARQUE : Comme nous l'avons signalé à la fin du chapitre précédent, tous ces faits sont en accord avec la formule (6) qualitativement,

Donnons maintenant quelques interprétations de ces faits :

2e partie. ESSAIS D'INTERPRETATION DES PHENOMENES

AMSLER LAFFONT invoque les ondes ou vagues qui suivent les corps se déplaçant dans un fluide; il existe, dit-il, des vitesses critiques où la configuration dépend en outre 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 :

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

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 $\varphi(V)$.

STATION PRUSSIENNE D'ESSAIS POUR L'HYDRAULIQUE ET LA MARINE.- KREY (1) dit que l'eau prend, devant le corps du moulinet la direction du mouvement du train puis qu'elle s'écarte pour couler en arrière le long de celui-ci. L'hélice n'est 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. Les interprétations précédentes sont comme on le voit, limitées à des indications générales sur le phénomène; elles ne le "chiffrent" pas; il n'en est pas de même de la solution suivante.

---

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

à la ligne

MM. FOCH ET LAURENT, dans une note parue en annexe au procès-verbal de la Séance du 14 Février 1930 du Comité Technique de la SOCIETE HYDROTECHNIQUE DE FRANCE (1) note à laquelle nous renvoyons le lecteur car nous ne pouvons la résumer ici, ont proposé une interprétation très ingénieuse de la présence de pointes dans le graphique du tarage; elle est basée sur la réflexion sur les parois du canal, d'ondes de surface, produites par des ébranlements périodiques que le moulinet provoque par son déplacement et sa rotation combinés.

LABORATOIRE DE BEAUVERT

Nous avons donné, dans les Chapitres II et III, une explication de la pointe d'Epper par l'effet des vitesses antagonistes crées par les ondes résultant du déplacement du train mobile.

Les conséquences s'en vérifient qualitativement et nous donnons, dans le chapitre suivant, les résultats de nos expériences ainsi qu'un essai de condensation de ces résultats en une formule pratique.

On pourrait donner une explication plus poussée de la pointe d'Epper et en particulier montrer pourquoi elle se prolonge même au-delà de la vitesse critique $\sqrt{gH}$ en admettant que le nombre de tours total du moulinet, au lieu d'être compté à partir du moment où ce nombre de tours est bien constant, est compté dès la fin du démarrage c'est-à dire dès que la bande enregistreuse révèle une vitesse bien constante du chariot. Le moulinet peut en effet, si le démarrage est instantané, échapper encore un laps de temps (1) aux ondes antagonistes ou bien, pour un démarrage non instantané, les subir encore un certain temps pour des vitesses du chariot supérieures à $\sqrt{gH}$; (2) nous avons éliminé des calculs - du moins dans toute la mesure du possible - cette région où le nombre de tours du moulinet ne ressort pas comme constant sur la bande enregistreuse; la pointe d'Epper persiste cependant et nous chercherons à élucider ce point par la suite.

OBSERVATION.-Les limites du parcours du chariot sont telles que dès qu'il atteint la vitesse de 2 m/sec, (où la pointe d'Epper se dessine à peine pour un tirant d'eau de 1,10 m,) le moulinet peut aller jusqu'à la fin de sa course sans être atteint par les ondes qui se réfléchissent à l'extrémité aval du canal; quant aux petites vitesses l'influence pertubatrice des ondes est inappréciable.

C'est pourquoi l'influence des ondes réfléchies n'intervient pas dans les présentes expériences.

-:-:-:-:-:-:-

(1) R.G.E. du 1er Novembre 1930

(1) le temps que l'onde met à parcourir la distance de la pointe de l'hélice

(2) parce que, pendant le démarrage, l'onde a pris une avance sur l'hélice

CHAPITRE V

RESULTATS GENERAUX D'EXPERIENCES.

1ere Partie

-:-

OBSERVATIONS PRELIMINAIRES

Au point de vue qualitatif il n'y a aucun écart entre les phénomènes et les conséquences de la formule (6) établie " a priori"; en d'autres termes : les ordonnées de la pointe d'Epper sont d'autant plus grandes que le contour apparent est plus grand; elles sont d'autant plus faibles que la largeur b du canal et la hauteur d'eau H qu'il contient sont plus grandes.

Au point de vue quantitatif elle doit subir une modification qu'il faut attribuer soit à des phénomènes non encore décelés soit à des phénomènes qui échappent aux mesures expérimentales. Pour simplifier l'exposé d'une question singulièrement complexe, pour laquelle nous avons exécuté plus de 2000 expériences (dont certaines séries ont été répétées plusieurs fois), disons tout d'abord que certaines causes peuvent, au point de vue quantitatif, altérer les prévisions de la formule (6) du chapitre III; en voici quelques-unes :

1°) Vibrations de l'hélice.- Elles ne nous paraissent pas perceptibles; mais aux grandes vitesses il est difficile d'affirmer qu'elles sont nulles, surtout avec des perches de faible section.

2°) Contraintes de l'hélice.- Il est assez probable que le bourrelet d'eau qui se forme devant le carter du moulinet impose, à partir de certaines vitesses, une contrainte à la rotation de l'hélice.

Une autre contrainte peut résulter du frottement, particulièrement en ce qui concerne la butée de l'hélice dont...

l'influence peut ne pas être uniforme, aux grandes vitesses surtout.

3°) Viscosité de l'huile de graissage.- Elle est spécialement envisagée au chapitre VI. Contentons-nous ici de signaler que la viscosité d'une huile donnée est susceptible de varier pendant la course du moulinet du fait de l'élévation de température résultant du frottement de roulement, surtout aux grandes vitesses.

Les pertubations dûes aux influences précédentes doivent être assez faibles, mais leur résultante, en raison de la petitesse des grandeurs qu'il s'agit d'évaluer, peut atteindre une fraction appréciable de leur valeur.

4°) Partie agissante du contour apparent du train mobile.-

Rappelons que dans la formule à établir donnant les ordonnées de la pointe d'Epper le contour apparent S ne doit varier que du fait de la profondeur d'immersion; par exemple le même moulinet monté d'une part avec une perche ronde de 20m/m d'autre part avec une perche ovoïde de 40 X 20 m/m forme deux trains mobiles différents et la constante de la formule ne peut pas être la même.

Nous avons désigné par S le contour apparent de la partie du train mobile qui agit effectivement sur l'hélice; 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 non seulement sa forme est plus résistante au déplacement que celle de la perche mais il est situé tout près de l'hélice immédiatement à l'aval; l'action sur cette dernière, par unité de surface du contour apparent, doit présenter une notable prépondérance de la part du carter; cela conduit à penser que la "partie agissante" du contour apparent n'est qu'une fraction, d'autant plus petite que le degré d'immersion est plus grand, du contour apparent total S.- (1)

Effectivement, 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 (8) devrait comporter le même exposant pour S et pour la largeur b du canal donne l'exposant $\frac{1}{2}$ pour S et 1 pour b.

(1) Nous avons déjà signalé que les expériences qui consistent à laisser S et H constants, en faisant glisser le moulinet sur une perche dont la hauteur immergée est invariable, décèlent une influence nulle ou négligeable de la profondeur d'immersion du moulinet coulissant sur sa perche (fig 13)

Ces observations préliminaires faites, nous allons en déduire une formule pratique caractérisant approximativement la pointe d'Epper.

2eme PARTIE

-:-

FORMULE EMPIRIQUE DONNANT LE MAXIMUM DE LA POINTE

Etant donnée l'altération de l'homogénéité que nous venons d'indiquer nous avons, d'après nos graphiques et les résultats publiés antérieurement à l'étranger (1) recherché directement les influences séparées des diverses grandeurs

V b H et S

précédemment définies.

Une difficulté a surgi dès l'abord pour exprimer l'allure de la pointe (de la partie ascendante s'entend puisque la partie descendante caractérise un phénomène altéré - voir chapitre III-) c'est-à dire pour exprimer la variation des ordonnées ε en fonction de la vitesse V de déplacement; l'exposant p de la formule (8) varie non seulement avec le type du moulinet, le pas et le nombre de pales de l'hélice, mais surtout avec le diamètre extérieur de celle-ci; on a environ p = 3 pour des hélices de 6 cm et p = 5 pour des hélices de 12,5 cm. Pour nous dégager, dans leur ensemble, des phénomènes qui ne paraissent guère être inclus - et ne l'ont pas été jusqu'ici - dans une formule et éviter de nous engager dans des opérations d'une utilité incertaine exigeant, du reste, un temps et des moyens dont nous ne disposions pas, nous avons adopté, pour concrétiser nos résultats, une forme simplifiée d'ailleurs très suffisante au point de vue pratique. Nous supposons - cette hypothèse est suffisamment approchée et se trouve, au surplus, corrigée numériquement par la valeur des constantes de la formule - que le maximum ε_m de la pointe, [que seul nous exprimerons analytiquement, laissant de côté l'expression de la variation de ε en fonction de V,] se produit exactement pour la valeur de la vitesse V égale à la célérité $c = \sqrt{gH}$ des ondes pertubatrices.

Nous synthétiserons alors la pointe d'Epper par les deux côtés A B et B C d'un triangle dont la hauteur BD est le maximum ε_m de ε et dont la base, graduée en vitesses V,

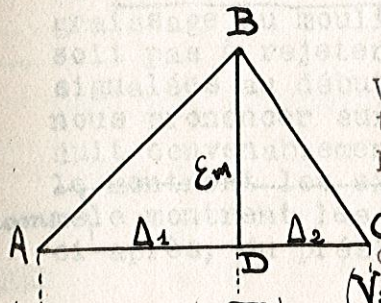
---

(1) Firme OTT à KEMPTEN (Bavière); Station Prussienne à BERLIN.

représentera l'amplitude de la pointe 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 trois rapports :

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

D'après l'équation (8) dans laquelle on remplace c et V par $\sqrt{gH}$ l'expression de ε_m devient : (*)

$$\varepsilon_m = a \cdot \frac{S^m}{b^m H^{m-1/2}} \qquad (9)$$

Les expériences de Beauvert indiquent que, toutes choses égales, la variation de ε_m est sensiblement proportionnelle à la racine carrée du contour apparent et en raison inverse de la profondeur d'eau H; nous n'avons pû disposer du temps et des crédits qu'auraient nécessité l'étude expérimentale de l'influence de la largeur b du canal; de quelques essais antérieurs effectués à la Station de Berlin sur des canaux de 0,30 m à 0,87 m de largeur et qui demanderaient à être complétés par les largeurs courantes de 1,50 m .- 2m.- et 3 m, nous avons conclu à une valeur voisine de 1 pour l'exposant de b quoique les expériences de Berlin n'aient pas tenu compte de l'influence du contour apparent immergé.

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

$$\varepsilon_m = \alpha \cdot \frac{\sqrt{S}}{b \cdot H} \qquad (10) \qquad \varepsilon_m = a \frac{\sqrt{S}}{bH}$$

(*) Si au lieu et place du paramètre $\frac{S}{bH}$ (h = hauteur de l'onde uniformément répartie) on $\frac{S}{bh}$ on aurait été conduit à l'expression :

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

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

Si on égale les exposants de b et de H (ou si on les égale à l'unité) on a des impossibilités. $E=0$; $m=-3$; $m=-1$

qui fait apparaître une déformation du fait que le contour apparent du train mobile n'agit pas pour sa totalité dans le phénomène; pour être homogène, la formule (10) assignerait à (a) la forme: $a = \alpha \cdot \nu$, α étant une constante et ν un coefficient de viscosité cinématique, celui de l'huile de graissage du moulinet par exemple; quoique cette hypothèse ne soit pas à rejeter " a priori" les difficultés que nous avons signalées au début de ce chapitre ne nous permettent pas de nous prononcer sur ce point; au surplus l'expression (10) traduit convenablement les faits au point de vue pratique comme le montrent les exemples numériques de la troisième partie, ci-après, du présent chapitre.

3eme PARTIE

-:-

RESULTATS NUMERIQUES.

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

1°) UN MOULINET A (fig 7); 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 X 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 A2,P20 signifie : moulinet A avec hélice N° 2 monté sur perche ronde de 20 m/m de diamètre.

2°) UN MOULINET B (fig.8); son carter est à section rectangulaire; il a 26 m/m 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 X 35; comme

Br P75

précédemment la notation 02, P 75 par exemple signifie : moulinet 02 avec hélice N° 2 monté sur perche ovoïde de 75 X 35.

B

Les tableaux ci-après donnent quelques résultats typiques tirés des fig. ~~9, 10 et 11~~ 14, 15 et 16 :

MOULINET AU CENTRE DE LA SECTION D'EAU

b = 2 m. Hauteur d'eau H variable { H = 0m60 $\sqrt{gH}$ = 1m71 ; H = 1m10 $\sqrt{gH}$ = 2m42 ; $\sqrt{gH}$ = 3m28

Type / Valeur de a	H (m)	S (mq)	ε m : mesuré (m)	ε m : calculé (m)	Ro	R_1	R_2
01, P 75 (h=15)	0,30	0,014	0, 104	0, 102	0,060	0,13	0,09
02, P 75 (h=50)							
-----	0,60	0,0195	0, 061	0, 060	0,026	0,10	0,07
a = 0,52	1,10	0,028	0, 040	0, 039	0,013	0,08	0,05
R 1, P 40	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
a = 0,33	1,10	0,021	0, 020	0, 022	0,007	0,05	0,03

2 poles

La quantité Ro, donne le pourcentage du maximum de la pointe par rapport à la vitesse correspondante ; on voit qu'il varie de quelques centièmes pour une profondeur d'eau de 0,30 m seulement au voisinage de un centième pour la profondeur de 1,10 m et que l'influence de la grosseur 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 y ait lieu de les préciser davantage.

Pour ce qui concerne l'enfoncement sous la surface libre du moulinet invariablement lié à sa perche, la hauteur d'eau dans le canal restant constante le moulinet 01, P 75 nous a donné les résultats ci-après :

HAUTEUR D'EAU H = 1,10 m.

PROFONDEURS D'IMMERSION h VARIABLES

Type ---- Valeur de a	h (m)	S (mq)	ε_m mesuré	ε_m calculé
0 1, P 75	0, 25	0,017	0, 0225	0, 031
--------	0, 55	0,028	0, 031	0, 039
a = 0,52	0, 85	0,045	0, 0335	0, 050

Il n'y a pas de figure correspt à ces tarages

Ceci appelle quelques observations :

1°) Pour h = 0,55 m (moulinet au centre de la section) nous avons ici ε_m = 0,031 au lieu de ε_m = 0,039 du premier tableau; cet écart de 2,5 pour mille par rapport à la vitesse correspondante est imputable, partie à l'approximation des expériences, partie à la différence des températures (de 10 degrés à 18 degrés soit 8 degrés de plus) entre les deux séries d'expériences; l'importance de la pointe doit ici normalement se ressentir non seulement de la variation de viscosité de l'huile de graissage mais encore de l'atténuation, résultant de la variation (de 20 % environ) du coefficient de viscosité de l'eau, des ondes pertubatrices.

freine

2°) Comme nous l'avons déjà dit la partie supérieure immergée de la perche ~~trouble~~ d'autant moins la rotation du moulinet que celui-ci est plus enfoncé sous la surface libre. La figure 12 et le tableau précédent montrent en effet, que les deux courbes h = 0,55m. et h = 0,85 m. sont très voisines l'une de l'autre. La formule (10), bonne pour des hauteurs d'eau H variables avec moulinet au centre, ne saurait être étendue à des immersions indéfinies qui n'ont d'ailleurs qu'un intérêt spéculatif et ne se présentent pas dans la pratique du tarage.

Nous allons examiner maintenant d'un peu plus près l'influence de la viscosité de l'huile (Chapitre VI) et celle de l'obliquité du moulinet par rapport au courant (Chap VII)

-:-:-:-:-:-:-:-

α, d'ailleurs,

CHAPITRE VI

INFLUENCE DE LA VISCOSITÉ DE L'HUILE DE GRAISSAGE

Dans notre moulinet Ott de type normal, l'axe et les roulements baignent dans l'huile que contient le moyeu de l'hélice formant réservoir. Il est naturel de penser que la viscosité de cette huile influe sur la rotation du moulinet et principalement aux petites vitesses pour lesquelles les frottements prennent une importance ~~prépondérante~~ relativement plus grande.-

Quelques tarages nous ont permis d'apprécier la valeur de cette influence par le tracé des graphiques, fig 17 et 18. Nous avons utilisé de l'huile fournie par la Maison Ott et deux huiles Shell dénommées : Voltol Gleitol 0 et Voltol Gleitol I, ainsi que du pétrole.

La viscosité de ces huiles a été mesurée à l'aide d'un viscosimètre d'Engler de type normal ayant les caractéristiques imposées par les normes allemandes. Ce viscosimètre comprend deux récipients concentriques, la partie annulaire comprise entre les deux récipients étant remplie d'un liquide maintenant à une température fixe l'huile contenue dans le récipient central. Cette huile a un volume bien déterminé, soit 240 centimètres cubes, on en laisse écouler 200 centimètres cubes par l'ajutage fixé à la partie inférieure, ajutage qui est obturé par un pointeau pendant le remplissage; on mesure le temps de cet écoulement et l'on obtient le degré Engler de l'huile en divisant ce temps par celui que met l'eau distillée pour laquelle on a fait la même opération.

Nous avons obtenu la gamme des viscosités suivantes mesurées à 10° C.

$$E = \frac{T_{huile}}{T_{eau}}$$

$$\nu_{cgs} = 0{,}072 . E$$

$\nu_{cgs} \simeq 0{,}072 . E$ (?)

Lubrifiant	Degrés Engler	Viscosité cinématique
Pétrole	1, 15	0,024 ~~0, 083~~ ν_{cgs} ???
Huile Ott	4, 5	0,316 ~~0, 32~~
Voltol Gleitol I	22, 2	1,62 ~~1, 60~~
Voltol Gleitol O	44	3,22 3, 17

De plus nous avons fait des mélanges d'huile Voltol Gleitol O ou I avec du pétrole pour obtenir une viscosité équivalente à celle du mélange Ott. Les tarages ont été effectués dans une eau à une température un peu inférieure (soit 6°5) mais on peut remarquer que l'huile dans la partie tournante ne reste pas à cette température, son échauffement croît avec la vitesse.

Les deux graphiques relatifs aux deux hélices à 2 pales et à 3 pales montrent que les courbes sont sensiblement parallèles pour des vitesses inférieures à 2 m/sec, et qu'elles ont tendance à se rejoindre pour les grandes vitesses.

-:-:-:-:-:-:-

— L'écart est faible entre le pétrole et l'huile à 4°5 Engler

— Mais avec des huils à 20° Engler on atteint 1 c/m d'écart (absolu) avec les premières et presque 2 c/m si on passe à l'huile à 44° E

— Avec G. V. cet écart s'atténue beaucoup

— Les montinés doivent donc être utilisés avec l'huile qui a servi au tarage

CHAPITRE VII

ESSAIS D'OBLIQUITE

-:-:-

Lorsqu'on jauge le débit d'une rivière ou d'un canal à l'aide de moulinets, on mesure les vitesses de l'eau dans une section qu'on choisit le plus souvent verticale et normale à l'axe du courant, les moulinets étant déplacés dans cette section toujours parallèlement à eux-mêmes. S'il arrive qu'en une zone, certains filets soient en oblique par rapport à la direction générale du courant, le moulinet ne mesure plus la vitesse V des filets. Son nombre de tours n_α par seconde est réduit et cela d'autant plus que l'angle α de la direction du filet avec celle du moulinet est plus grand. Il serait intéressant que ce nombre de tours n_α introduit dans la formule (1) du moulinet $V = a + bn$, donnât une vitesse V_α égale à la composante de la vitesse V suivant la normale à la section de jaugeage, c'est-à dire que l'on eût :

$$V_\alpha = a + b\,n_\alpha = V.\cos\alpha \qquad (2)$$

En effet, le débit élémentaire du courant est égal au produit de l'aire infinitésimale de S qu'on peut découper dans la section de jaugeage par la composante V cos α de la vitesse oblique V. Par conséquent, sans avoir à mesurer l'angle α d'obliquité et la vitesse V en orientant le moulinet suivant cette direction, on aurait par une seule mesure le produit V cos α, et la méthode applicable dans le cas de filets tous parallèles serait encore exacte dans le cas d'obliquité des filets.

Pour voir si la relation (2) était vérifiée, on a fait l'essai suivant à la Station d'étalonnage du Laboratoire de Beauvert.

Le moulinet a d'abord été taré en l'orientant suivant la direction de déplacement du chariot. En portant la vitesse d'entraînement suivant la direction de déplacement du chariot V en fonction du nombre de tours/sec, on a pu tracer une ou plusieurs droites d'équation :

$$V = a + bn \qquad (1)$$

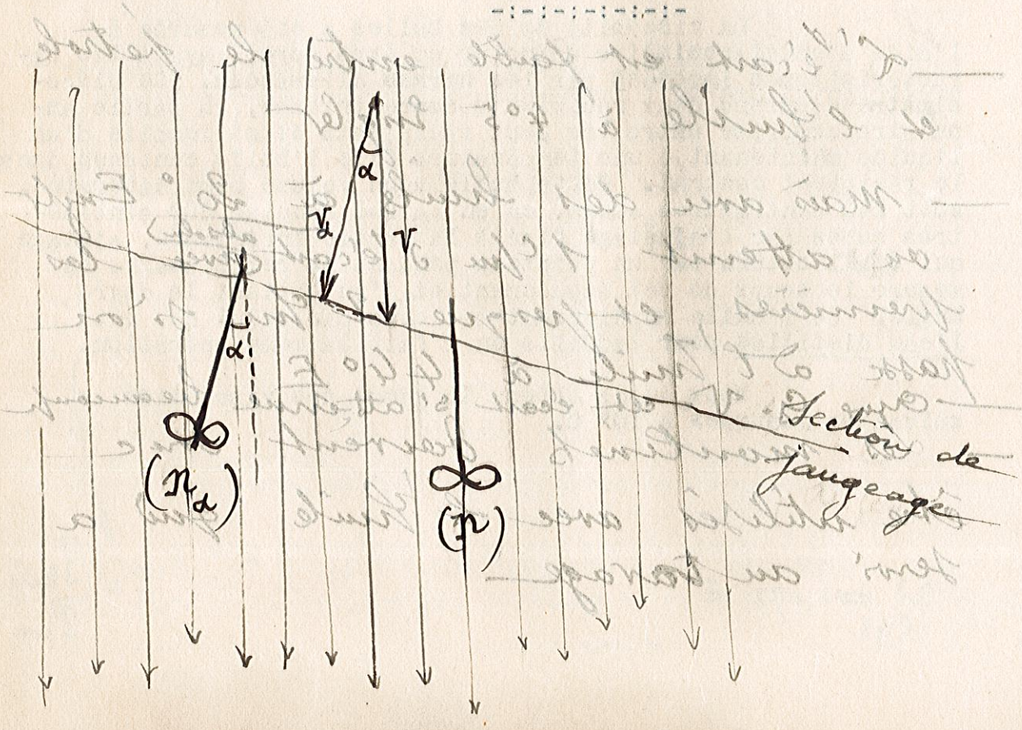
Puis le moulinet a été orienté de façon à présenter un angle α avec la direction de déplacement du chariot. Pour chaque angle α on a pu tracer comme précédemment une ou plusieurs

Lubrifiant	Pertes finales	Viscosité cinématique
Pétrole	1, 15	0, 089
Huile Ott	4, 5	0, 32
Voltol Dieltol I	22, 2	1, 60
Voltol Dieltol O	44	3, 17

De plus nous avons fait des mélanges d'huile Voltol Dieltol O ou I avec du pétrole pour obtenir une viscosité équivalente à celle du mélange Ott. Les tarages ont été effectués dans une eau à une température un peu inférieure (soit 6°5) mais on peut remarquer que l'huile dans la partie tournante ne reste pas à cette température, son échauffement croît avec la vitesse.

Les deux graphiques relatifs aux deux huiles à 2 pales et à 3 pales montrent que les courbes sont sensiblement parallèles pour des vitesses inférieures à 2 m/sec, et qu'elles ont tendance à se rejoindre pour les grandes vitesses.

-:-:-:-:-:-:-



angle 0° .- Le tarage donne : $V = a + bn$ (1)

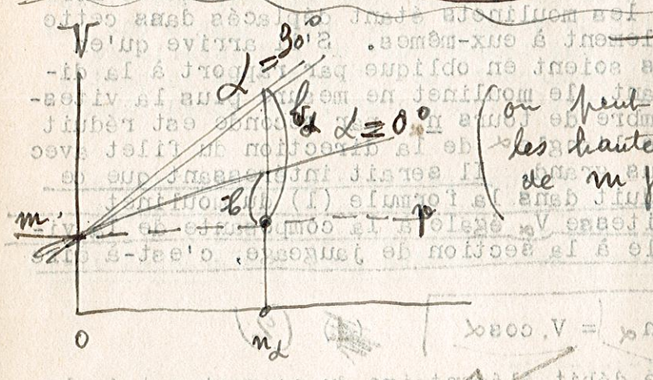
angle α .- " " " : $V = a_\alpha + b_\alpha . n_\alpha$ (3)

Considérant un nb de tours n_α ; à ce nb de tours correspond pour l'angle 0° la vitesse $V_\alpha = a + b . n_\alpha$ (2') exacte pour $\alpha = 0$

La vraie vitesse pour l'angle α est donnée par (3) c'à.d. $V = a_\alpha + b_\alpha . n_\alpha$ (3')
et le nb de tours n_α

Pour que $V_\alpha = V \cos\alpha$ il faut que (calcul immédiat, en supposant égaux a et $a_\alpha \cos\alpha$) :

$b = b_\alpha \cos\alpha$ d'où le tableau p. 26



on peut prendre pour b et b_α les hauteurs au-dessus de mp

droites (graphiques Nos 19 à 28) d'équation :

$$V = a_\alpha + b_\alpha . n_\alpha \quad (3)$$

V étant la vitesse d'entraînement et n_α le nombre de tours-seconde du moulinet.

Pour un certain nombre de tours $n\alpha$ du moulinet faisant un angle α, la relation (2) donne une certaine vitesse $V\alpha$:

$$V\alpha = a + bn_\alpha$$

et la relation (3) donne la vitesse d'entraînement V :

$$V = a_\alpha + b_\alpha n_\alpha$$

La relation (2) sera vérifiée si :

$$V_\alpha = V \cos\alpha \quad \text{ou :}$$

$$a + b.n_\alpha = (a_\alpha + b_\alpha . n_\alpha) \cos\alpha$$

c'à.d. pour un même nb de tours

Tout revient à voir si pour une même abcisse n_α les ordonnées des droites représentatives des relations (2) et (3) sont dans le rapport

$$\frac{V_\alpha}{V} = \cos\alpha$$

Comme il s'agit seulement de déterminer l'ordre de grandeur de l'erreur commise, on peut faire l'approximation suivante : a et a_α sont en général très petits vis à vis de bn_α et $b_\alpha n_\alpha$ pour des valeurs moyennes de n_α et ils sont sensiblement égaux. La différence $a - a_\alpha \cos\alpha$ est négligeable et la condition précédente peut s'écrire :

$$b = b_\alpha . \cos\alpha$$

Il suffit donc de comparer les coefficients angulaires des droites représentatives des étalonnages, pour $\alpha = 0°$ et α quelconque.

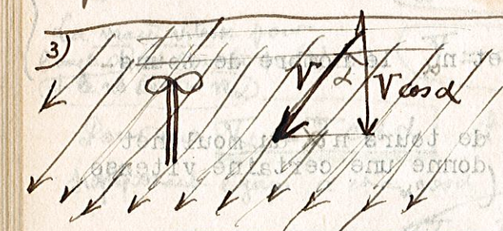
Les tableaux donnent les écarts en % et montrent pour les types d'hélices, celles qui conviennent le mieux dans le cas de courants obliques.

Résumé

1) Le tarage sans obliquité donne $V = a + bn$ (1)

2) Soit $V_\alpha = a + b.n_\alpha$ (2) la vitesse qu'indique la formule (1) pour une inclinaison α

3)



Il serait intéressant que l'on eut
$V_\alpha = V \cos\alpha$
V étt la vitesse vraie du courant

4) Pour voir si on a cela tarons sous l'angle α
On trouve pour la vraie vitesse V du courant (c'a'd du chariot)

$$V = a_\alpha + b_\alpha n_\alpha \quad (3)$$

5) on n'aura donc $V_\alpha = V.\cos\alpha$ que si
$a + bn_\alpha = (a_\alpha + b_\alpha n_\alpha)\cos\alpha$
ou semblt $b = b_\alpha \cos\alpha$

6) Or on trouve $b < b_\alpha \cos\alpha$
c'a'd $V_\alpha < V.\cos\alpha$
c'a'd que le moulinet indique (par la formule $V_\alpha = a + b\,n_\alpha$) une vitesse plus petite que la composante $V\cos\alpha$ de la vitesse réelle.

CONCLUSION

7) Les moulinets doivent donc être tarés spécialement à l'obliquité quand ils doivent être utilisés dans de telles conditions

Manque b_{20}

Moulinets	Coefft Angulaire	Produit $b_\alpha \cos\alpha$	Ecart %	$\frac{b_\alpha \cos\alpha - b}{b} \times 100$
type V 816 avec ce à 2 s à arêtes biaises de 0,247m pas	$b_{0°} = 0,247$ "pas" $b_{10°} = 0,257$ $b_{20°} = 0,280$ $b_{30°} = 0,333$	$b_{10°} \times \cos 10° = 0,253$ $b_{20°} \times \cos 20° = 0,263$ $b_{30°} \times \cos 30° = 0,288$	2,4 % 6,5 % 16,6 % 4 pales	Ce tableau montre que $V_\alpha < V.\cos\alpha$ c'est-à-dire que la vitesse V_α calculée avec le tarage sans obliquité
type V 816 avec ce à 2 pa à arêtes ses pas ,493 m pas	$b_{0°} = 0,493$ "pas" $b_{10°} = 0,518$ $b_{20°} = 0,585$ $b_{30°} = 0,713$	$b_{10°} \times \cos 10° = 0,510$ $b_{20°} \times \cos 20° = 0,550$ $b_{30°} \times \cos 30° = 0,617$	3,5 % 11,6 % 25,2 % 2 pales	
type V ,181 hélice à ales à pas de m.	$b_{0°} = 0,261$ "pas" $b_{10°} = 0,266$ $b_{20°} = 0,287$ $b_{30°} = 0,331$	$b_{10°} \cos 10° = 0,262$ $b_{20°} \cos 20° = 0,270$ $b_{30°} \cos 30° = 0,287$	0,4 % 3,4 % 9,9 % 3 pales	(au lieu de donner $V_\alpha = V\cos\alpha$ donne une vitesse plus petite que la vitesse
type IXa ,911 héli 3 pales tes biai nneau cteur, le 0,268m.	$b_{0°} = 0,268$ "pas" $b_{20°} = 0,283$	$b_{20°} \cos 20° = 0,266$	- 0,7 % anneau protecteur 3 pales	réelle du courant multipliée par $\cos\alpha$
rd, l modèle 4 hélice ales à s biai- as de	$b_{0°} = 0,315$ "pas" $b_{10°} = 0,327$ $b_{20°} = 0,364$	$b_{10°} \cos 10° = 0,322$ $b_{20°} \cos 20° = 0,342$	2,2 % 8,6 % 3 pales	

Il ressort de ces quelques essais que pour la plupart des moulinets étudiés, la vitesse qu'ils indiquent est inférieure à la composante de la vitesse oblique; on a $V_\alpha < V.\cos\alpha$

Les hélices à trois pales semblent donner de meilleurs résultats et comme pour un des modèles l'erreur est de sens contraire on voit qu'il est possible d'obtenir une hélice convenant aux cas d'obliquité du courant.

-:-:-:-:-:-:-:-

CHAPITRE VIII

OBSERVATIONS GENERALES ET CONCLUSIONS

-:-

Le problème auquel le Laboratoire de Beauvert s'est attaché présente, comme on a pû s'en rendre compte, une réelle complexité. Nous ne le considérons pas comme suffisamment résolu par nos travaux à ce jour et espérons le parfaire avec le temps.

Quoique toutes nos prévisions théoriques, explicitées par la formule (9) se verifient qualitativement, celle-ci a dû être amendée pour répondre aux résultats correspondant au champ qu'il nous a été permis d'explorer.

-Un résultat pratique ressort de nos essais : c'est qu'avec notre installation, qui nous permet d'atteindre facilement 5 m de vitesse il nous est possible 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 2m/sec alors que les points à grandes vitesses et grande hauteur d'eau présentent une dispersion qui décèle des phénomènes secondaires difficilement analysables; cette dispersion d'ailleurs n'est pas excessive, elle est au plus de 1 %; on peut, en celà, 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 3m à 5 m/sec il n'y aura que 0,30 m à 0,35 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 m 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 fatique 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.

En dehors de quelques points délicats en suspens dont nous poursuivons l'étude, il reste une question qui ne pourra définitivement être élucidée qu'ultérieurement en raison de la dépense qu'elle occasionnera et qui nécessite la construction d'un canal inclinable raccordé au canal existant et à nos déversoirs; les débits qui correspondraient à de grandes vitesses dans nos canaux sont en effet hors de la capacité de nos pompes : cette question est de savoir si la pointe d'Epper se

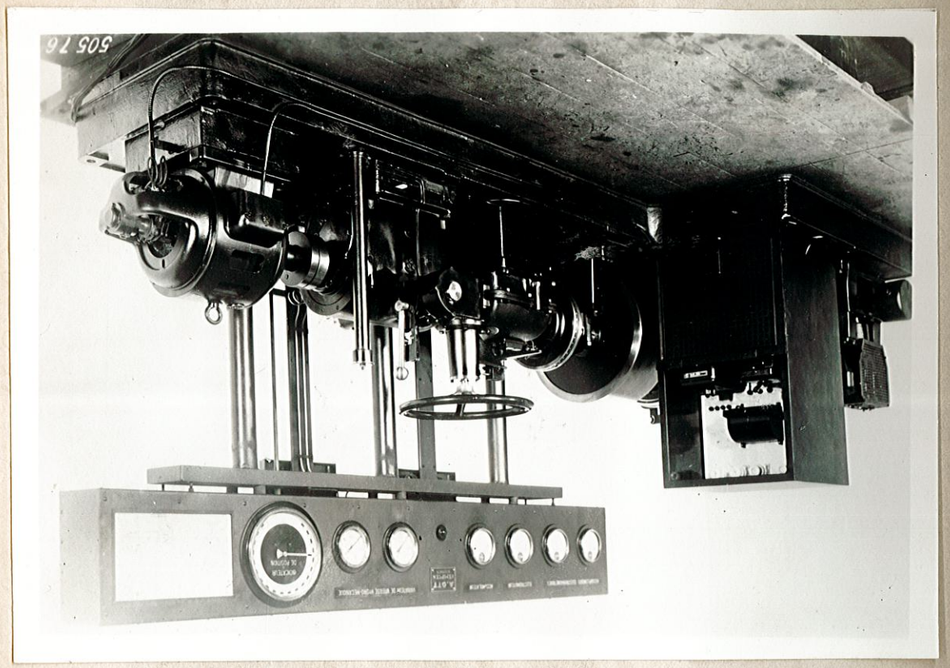
produit ou non en eau courante; à notre sens, si elle persiste, elle doit être faible car elle ne peut provenir que d'ondes réfléchies sur le train mobile. que d'ondes prenant naissance sur la perche et qui se réfléchissent sur le train mobile

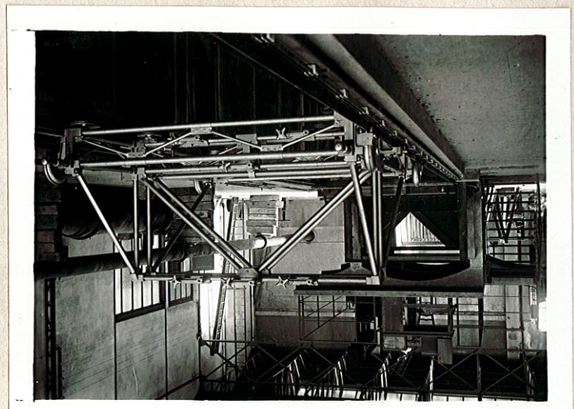
Beauvert, le 30 Octobre 1936.

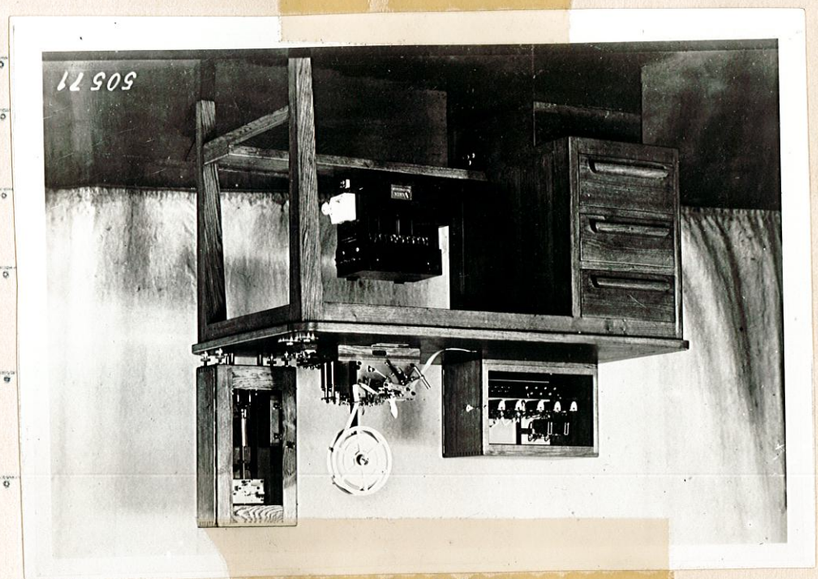
TABLE DES MATIERES.

	Pages
Avant-propos	1
Chap. I.- Description de l'installation de tarage des moulinets	2
Chap. II.- Détermination de la formule d'étalonnage d'un moulinet. Pointe d'Epper	6
Chap. III.- Essai théorique d'explication "a priori" de la formation de la pointe d'Epper	9
Chap. IV.- Constatations expérimentales et Essais d'interprétation des phénomènes	12
Chap. V.- Résultats généraux d'expériences	15
Chap. VI.- Influence de l'huile de graissage	22
Chap. VII.- Essais d'obliquité	24
Chap. VIII.- Observations générales et conclusions	27.

-:-:-:-:-:-:-

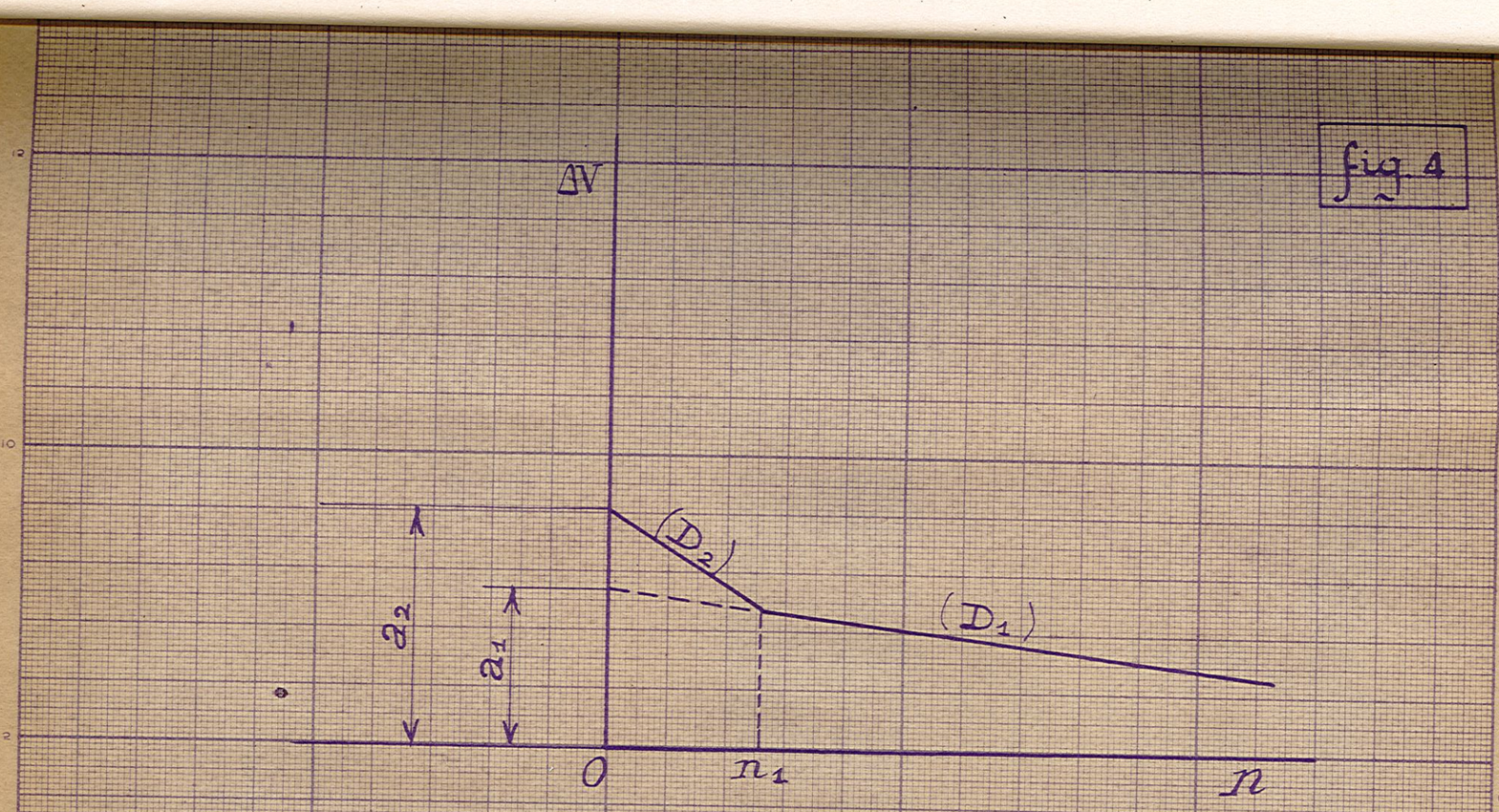






Chap. II.- Déformation de la formule
de passage des moulinets 5
Chap. I.- Description de l'installation
Appareil-photo 1

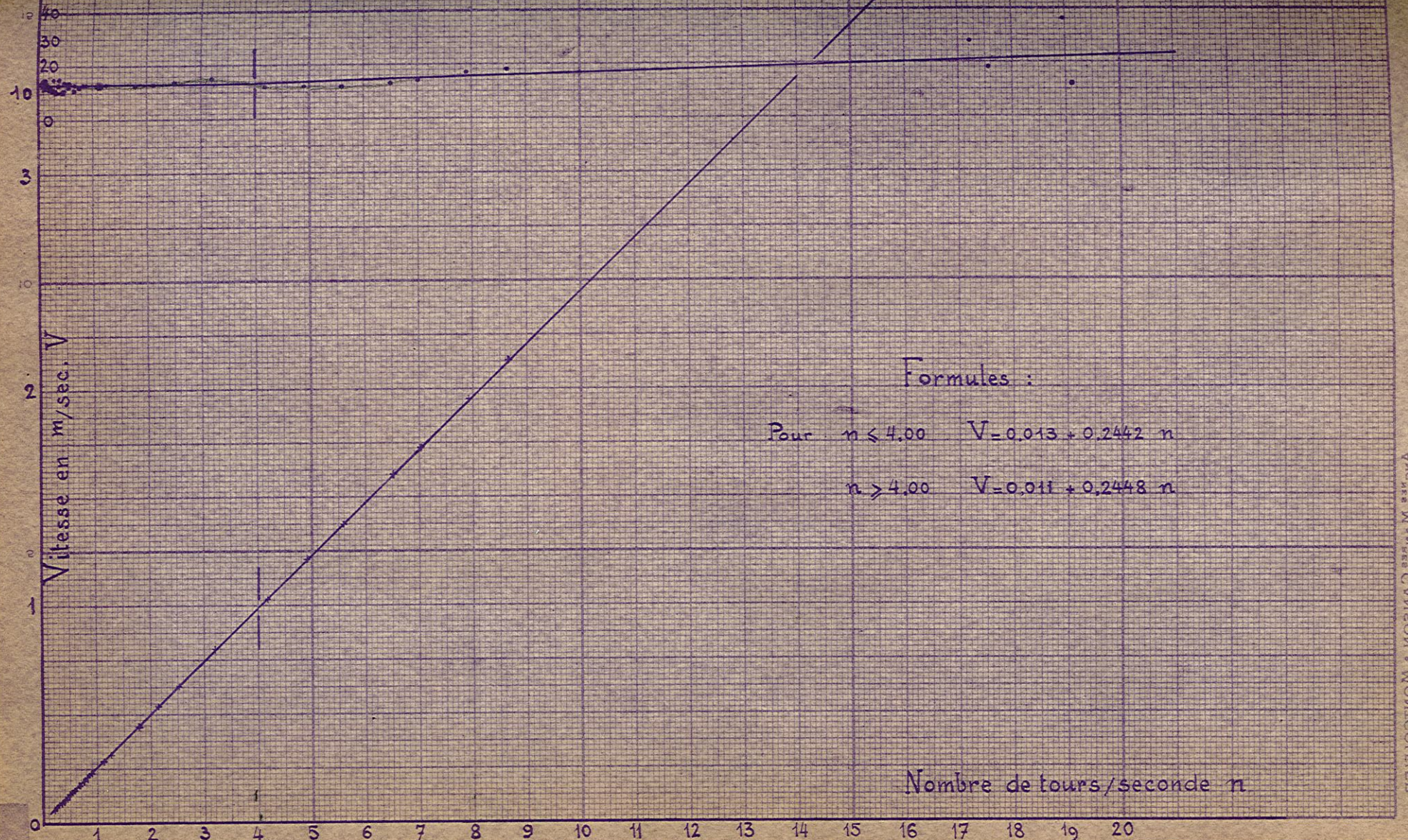
fig 4



Etalonnage du moulinet [redacted] B 1, P 75

fig. 5

V = 0,2442 n mm/sec



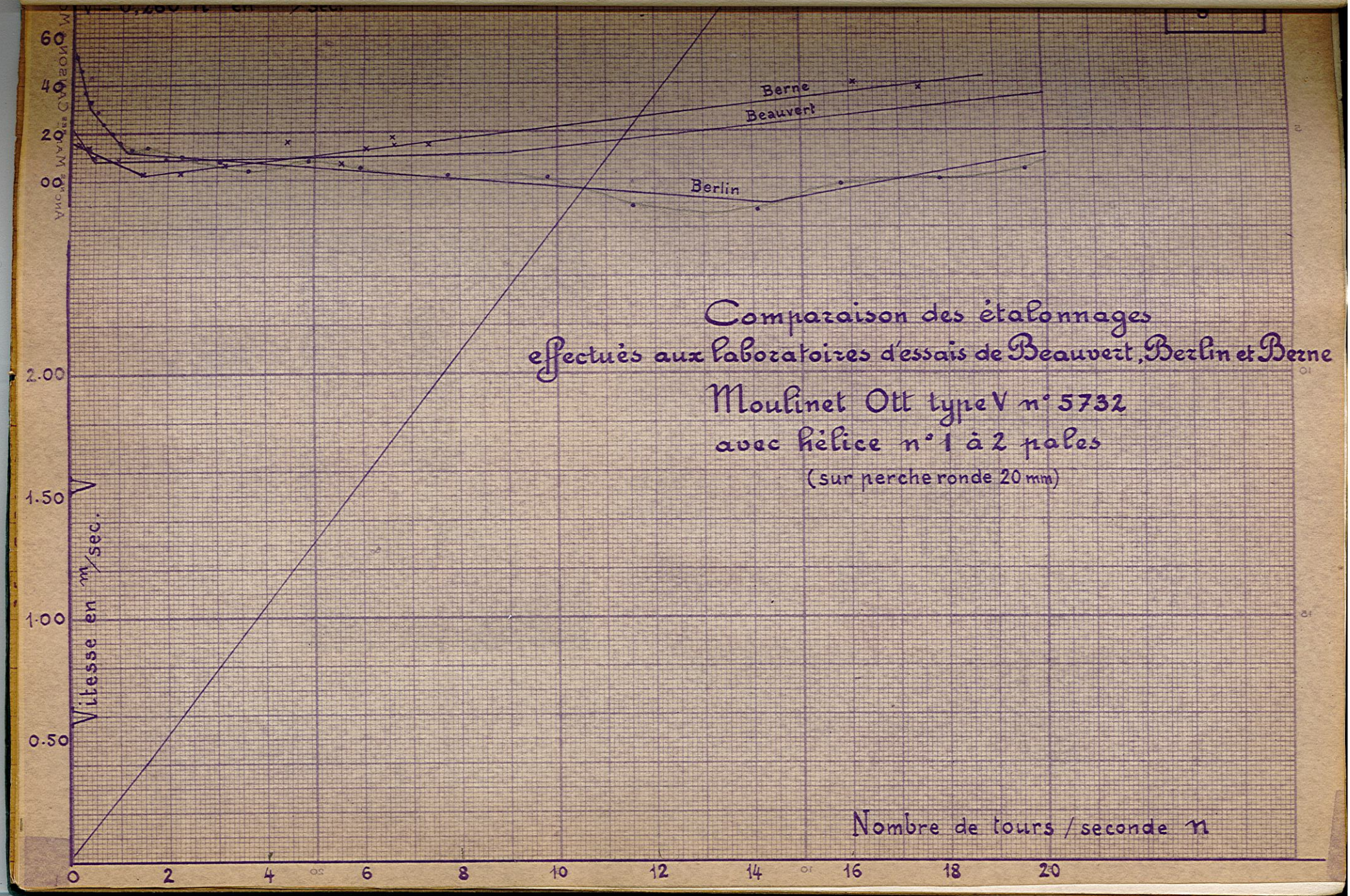
Formules :

Pour $n \leq 4.00$ $V = 0.013 + 0.2442\ n$

$n > 4.00$ $V = 0.011 + 0,2448\ n$

Nombre de tours/seconde n

ANCRE MARINE CANSON & MONTGOLFIER


Berne
Beauvert
Berlin
Comparaison des étalonnages
effectués aux laboratoires d'essais de Beauvert, Berlin et Berne
Moulinet Ott type V n° 5732
avec hélice n° 1 à 2 pales
(sur perche ronde 20 mm)
Vitesse en m/sec. V
Nombre de tours / seconde n
0.50
1.00
1.50
2.00
0
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20

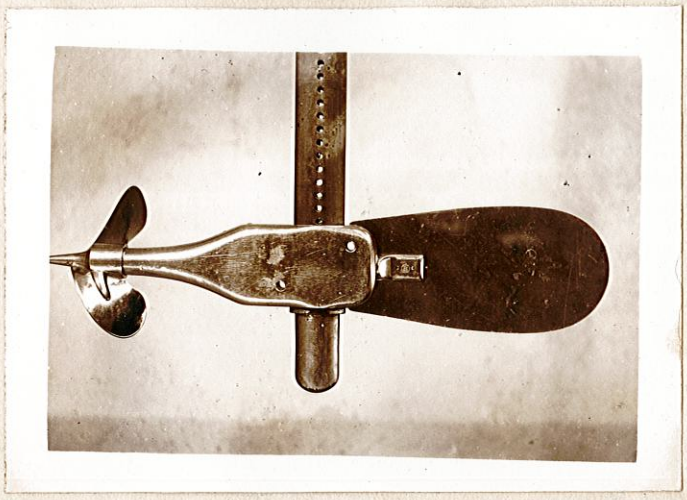


fig. 7

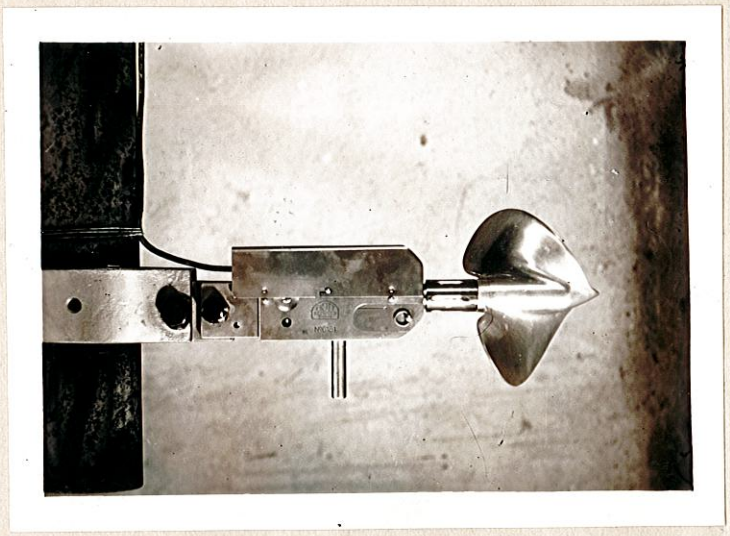


fig. 8

Influence du profil de la perche

fig. 9

Moulinet 01, P75

" " , P20

$\theta_{eau} = 7,5$

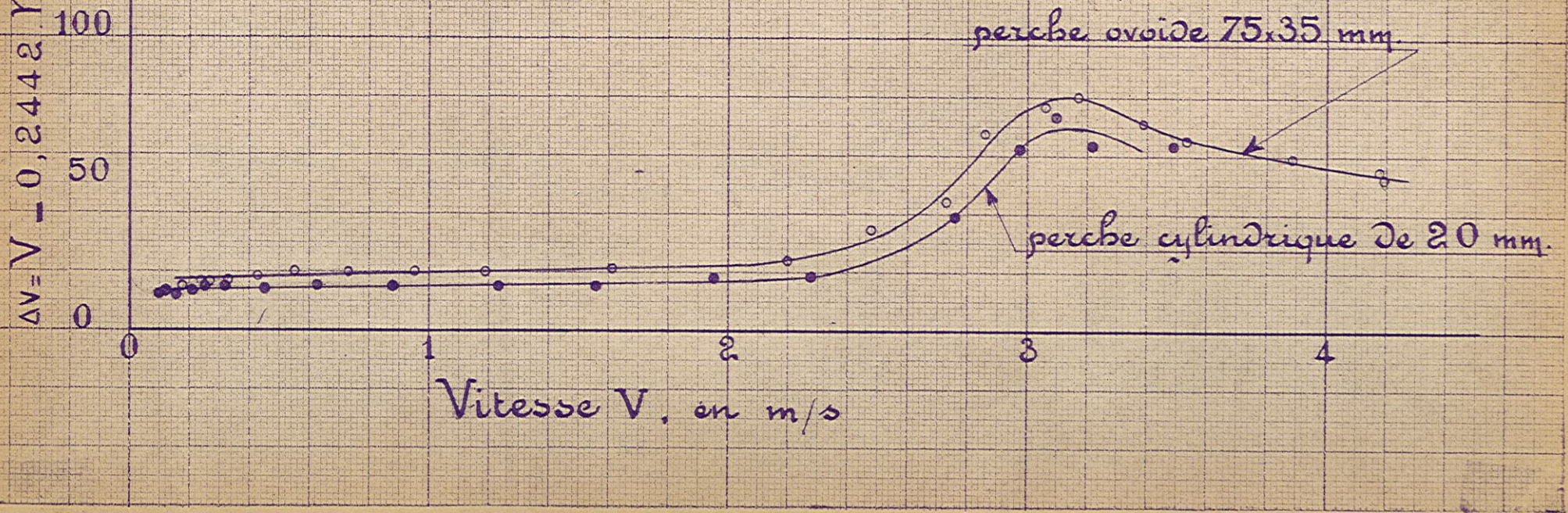
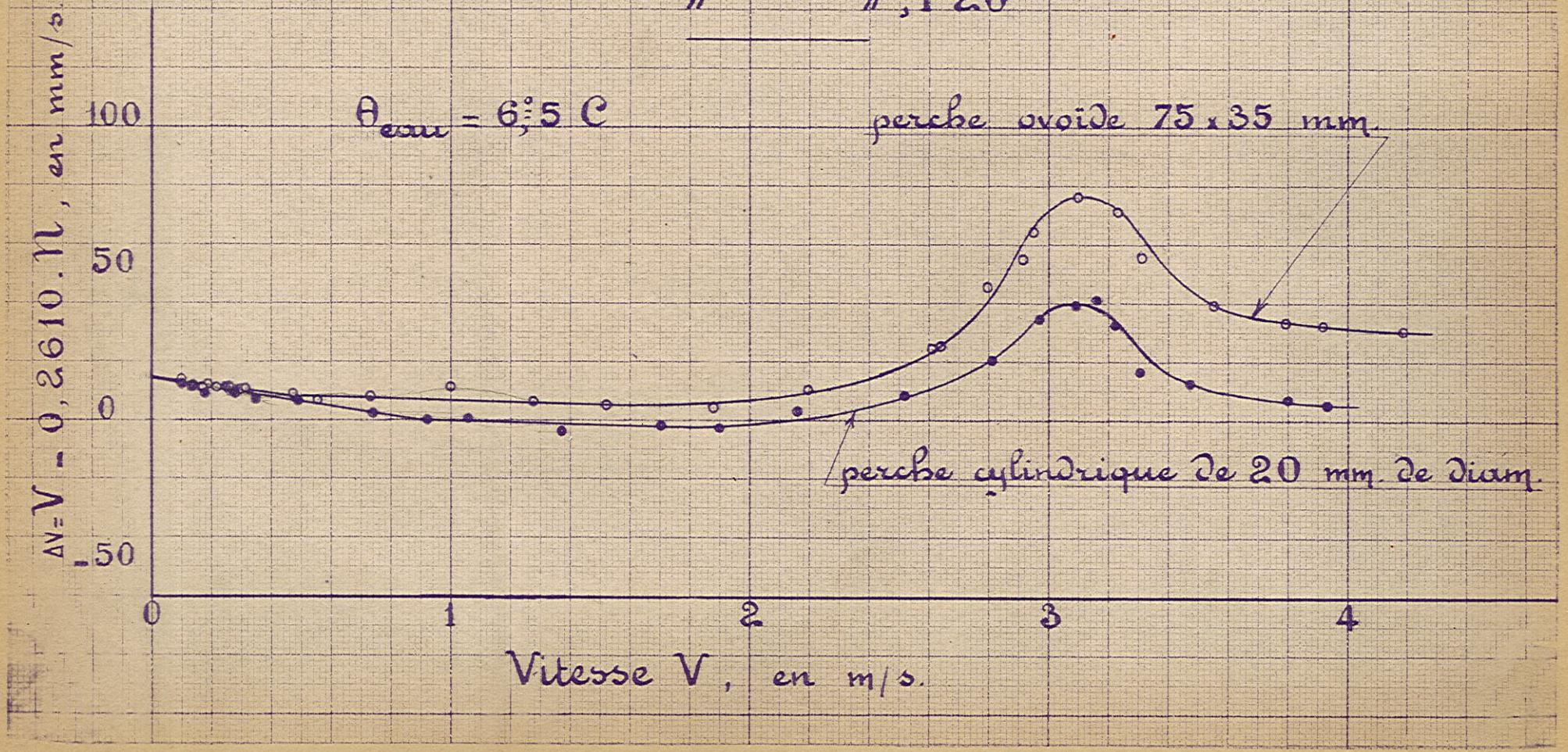


fig. 10

Influence du profil de la perche

Moulinet 03, P75
" " , P20



Influence du profil de la perche

fig. 11

Moulinet R 1, P 40
" " P 20

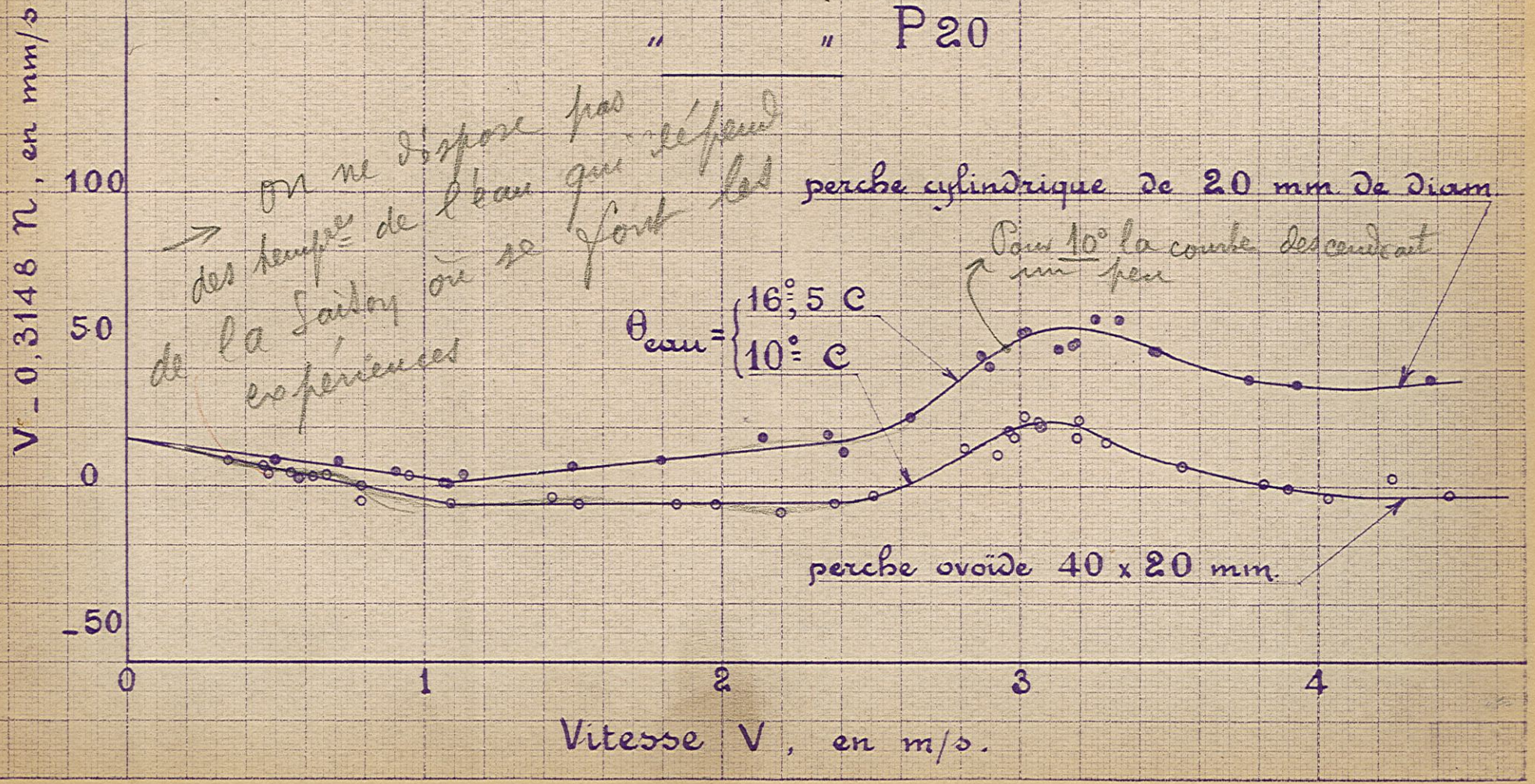


fig. 12

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

Moulinet O1, P75

Hauteur d'eau dans le canal = 1,10 m.

Immersion du moulinet	Longueur de perche immergée
0,25 m.	0,38 m.
0,55 m.	0,68 m.
0,85 m.	0,98 m.

$\theta_{eau} = 18° C$

$h = 0,55$ et $h = 0,85$ différent peu puisque la partie sup^{re} de la perche agit d'autt moins que le moulinet est plus enfoncé. (voir p. 21)

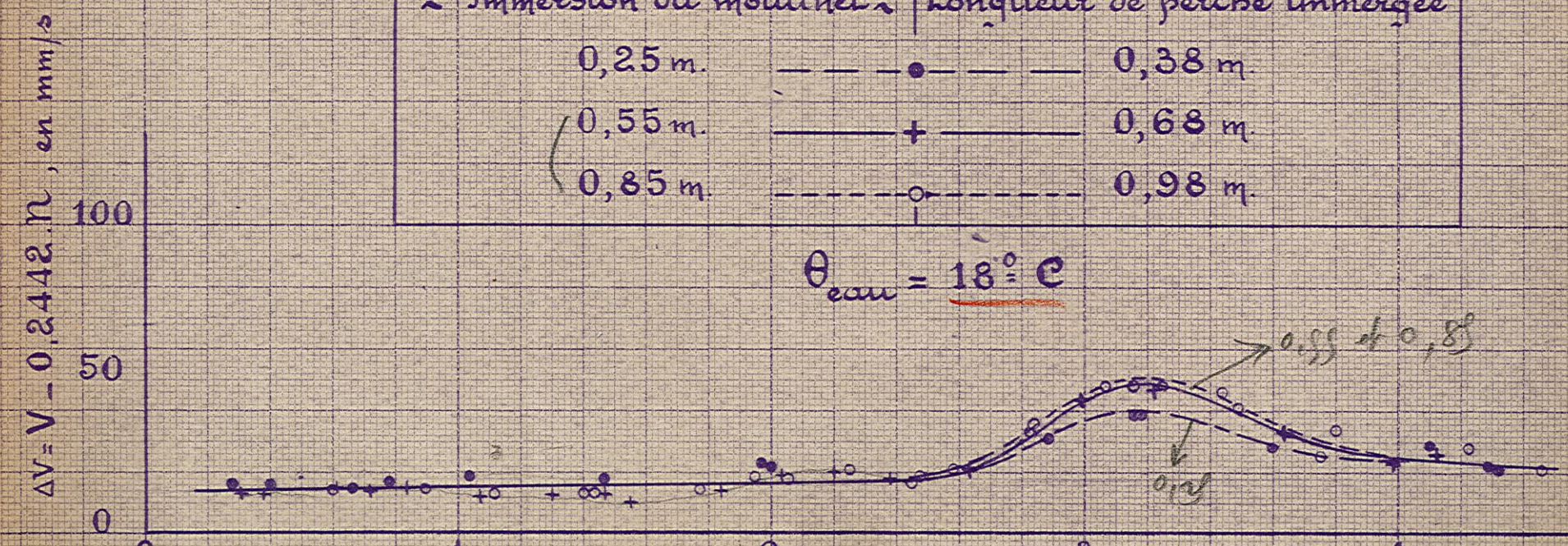


fig. 13

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

Moulinet O1, P75

$\theta_{eau} = 10°C$

Hauteur d'eau dans le canal = 1,10 m.

Moulinet à { 0,25 m. / 0,55 m. / 0,85 m. } de la surface

Longueur de perche immergée = 0,98 m.

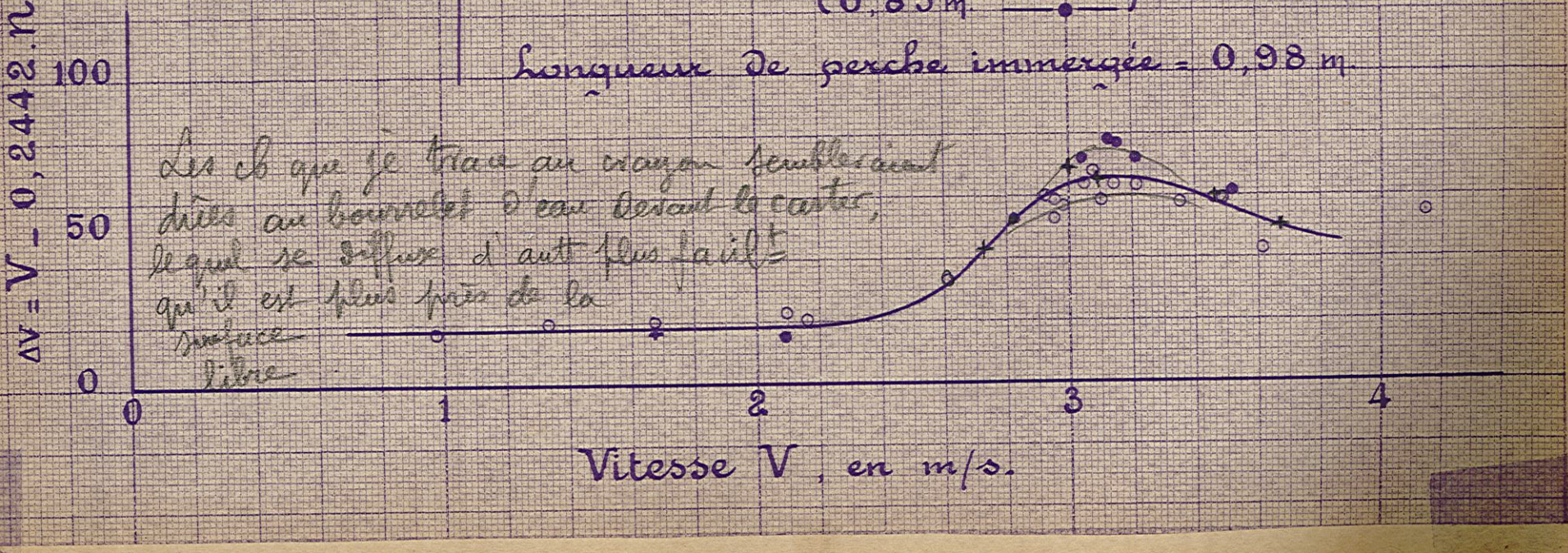


fig 14

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

Moulinet 01, P75.

Essayer de tracer $\frac{V}{\sqrt{gH}}$

Trou absolu : 8%

$\theta_{eau} = 12\ ^{\circ}C$

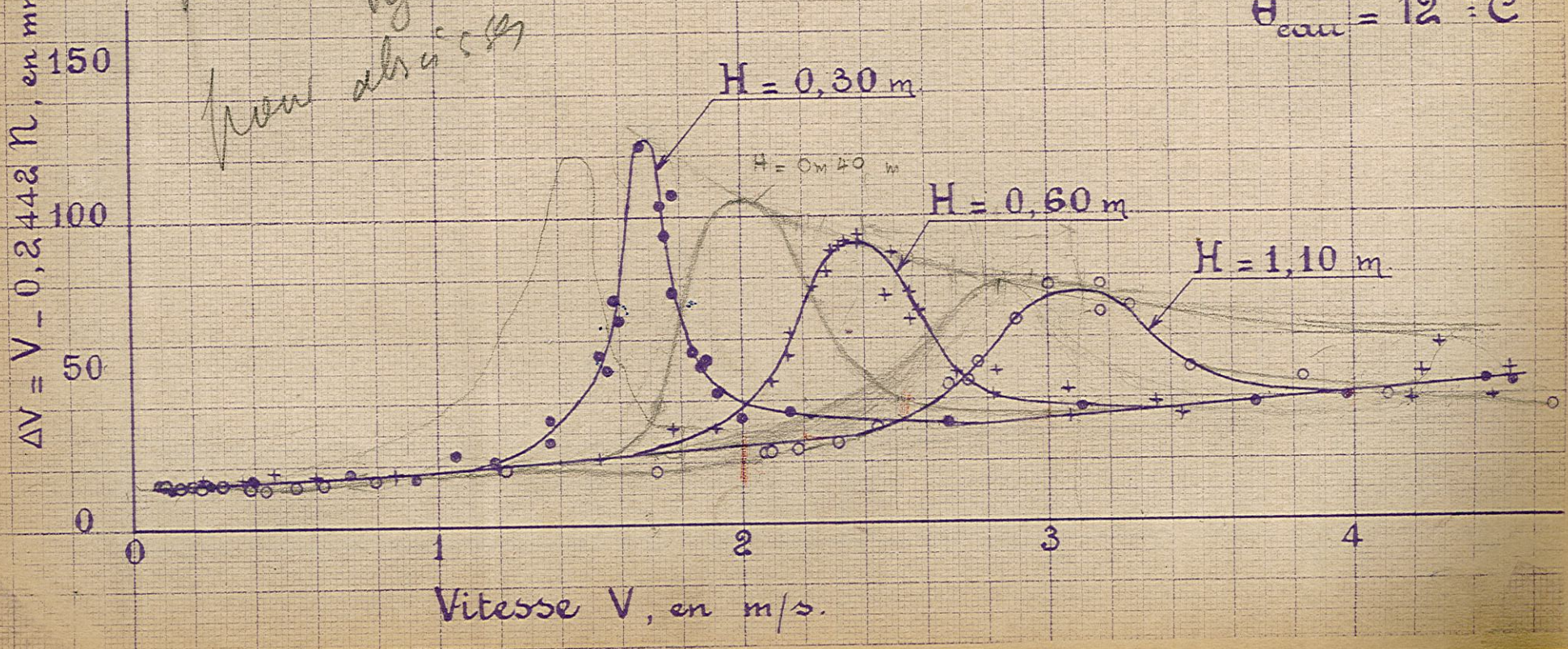


fig. 15

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

Moulinet 02, P75.

$\theta_{eau} = 15°C$

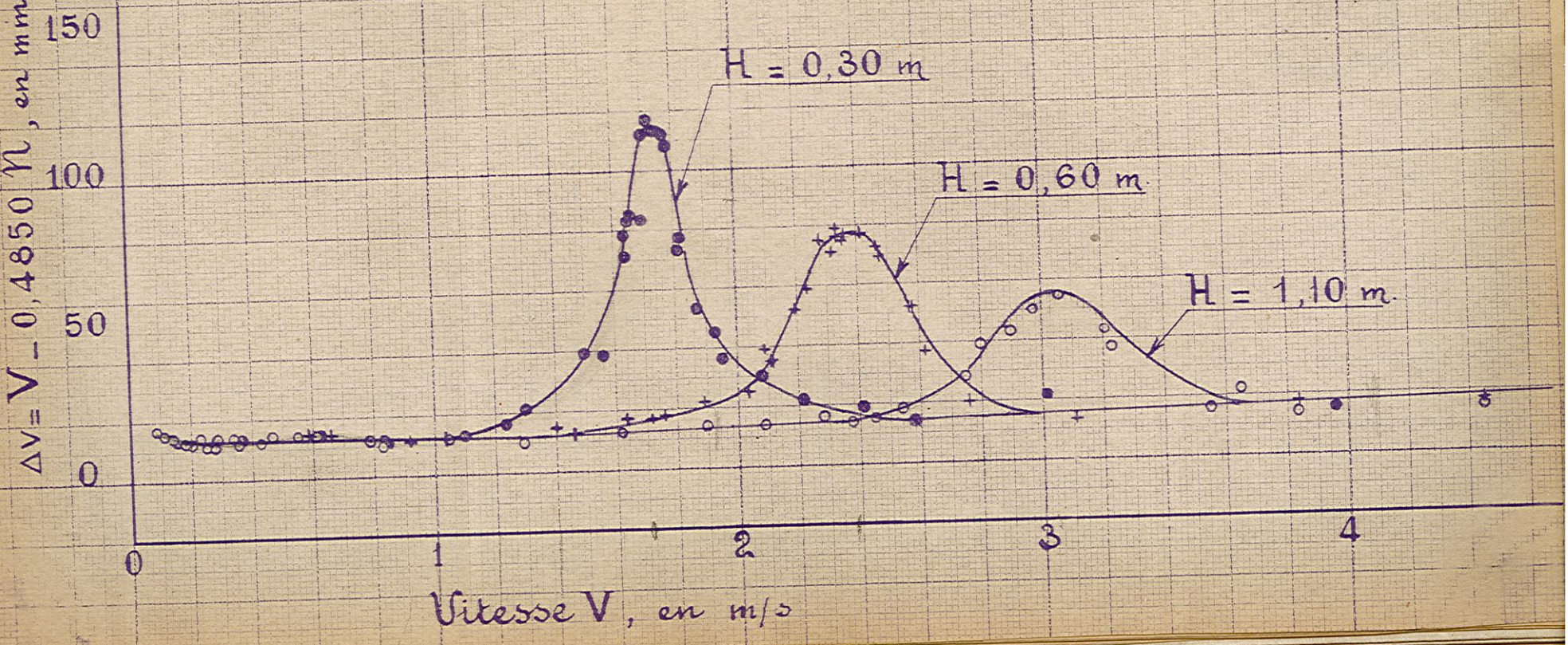
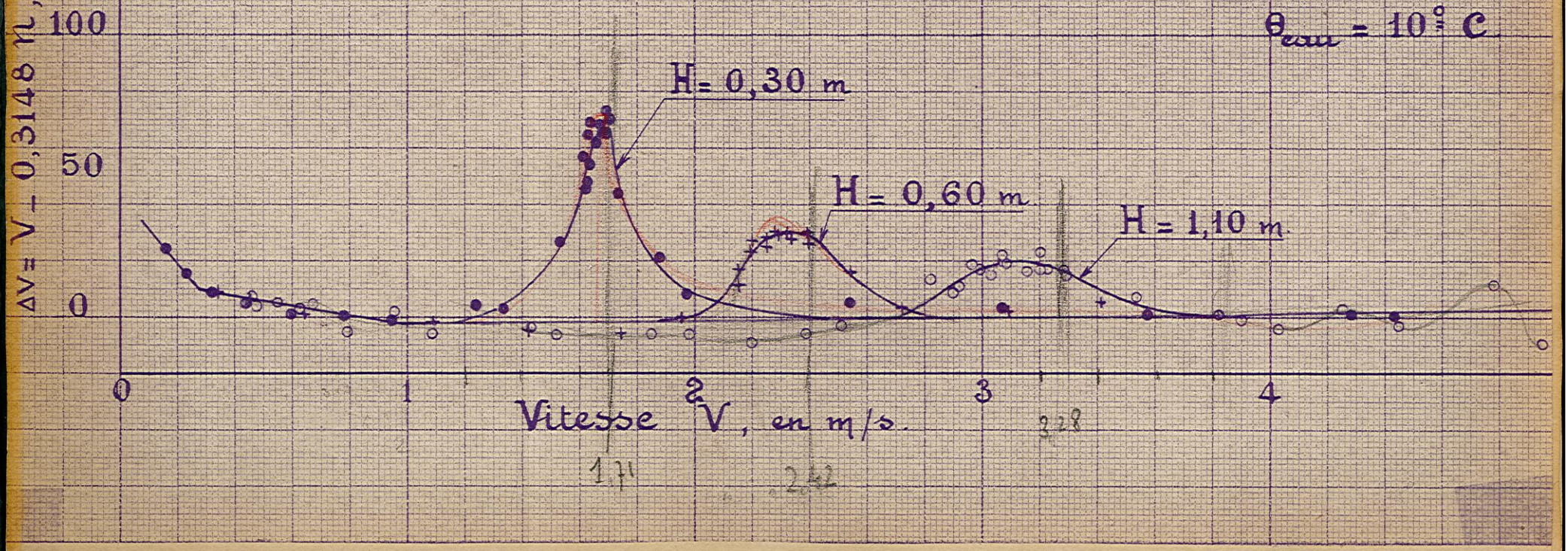


Fig. 16

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

Moulinet R1, P40

Valeurs de $c = \sqrt{gH}$: 1,71 ; 2,42 ; 3,28



Influence de l'huile de graissage

fig. 17

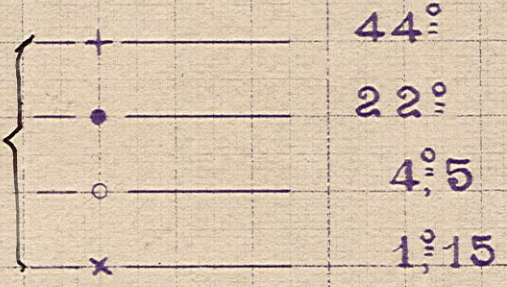
$V = a + bn$

$V - bn = a =$ écart sur la vitesse mesurée en valeur absolue

E+) 20 cm (2 dm) pour une vitesse de 1 m entre les huiles extrêmes soit ≈ 1 à 2 %

Moulinet 01, P 75

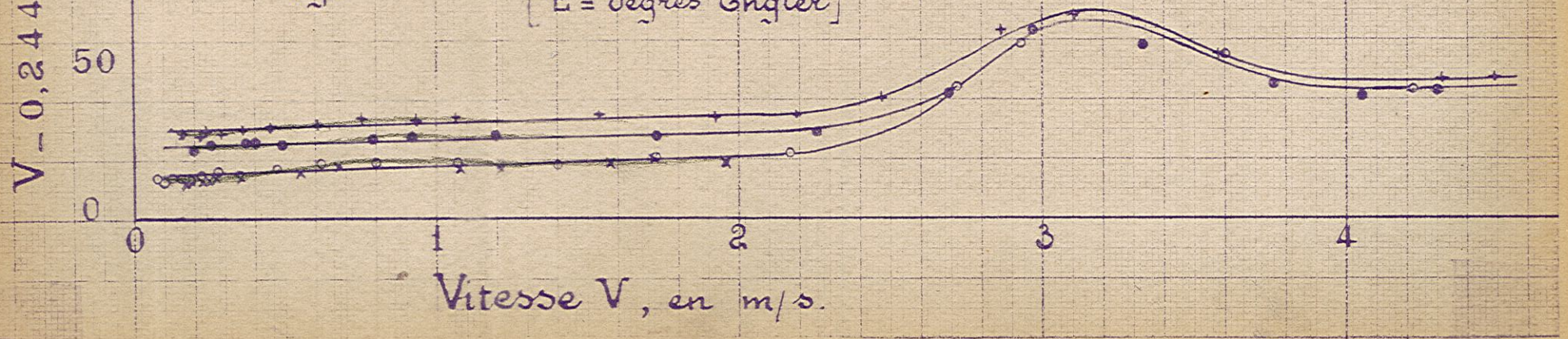
Viscosité, en Degrés Engler, à la température de 10° C, des différentes huiles de graissage :



Pour 1m,10 d'eau dans le canal

$\theta_{eau} = 6°,5$ C

$V_{cgs} = 0,072\ E$ [E = Degrés Engler]



Influence de l'huile de graissage

fig. 18

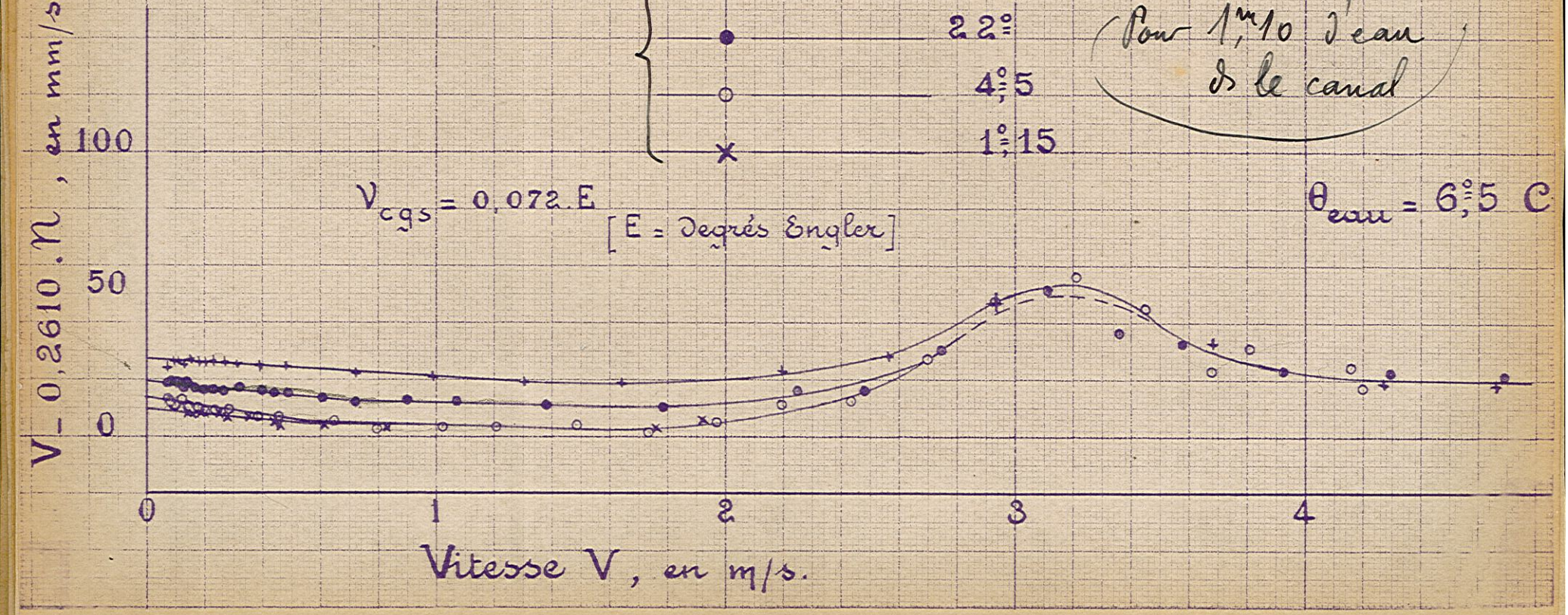
Moulinet 03, P75

Viscosité, en Degrés Engler, à la température de 10°C, des différentes huiles de graissage :

(Pour 1m,10 d'eau de la canal)

$V_{cgs} = 0{,}072\,E$ [E = Degrés Engler]

$\theta_{eau} = 6°,5$ C

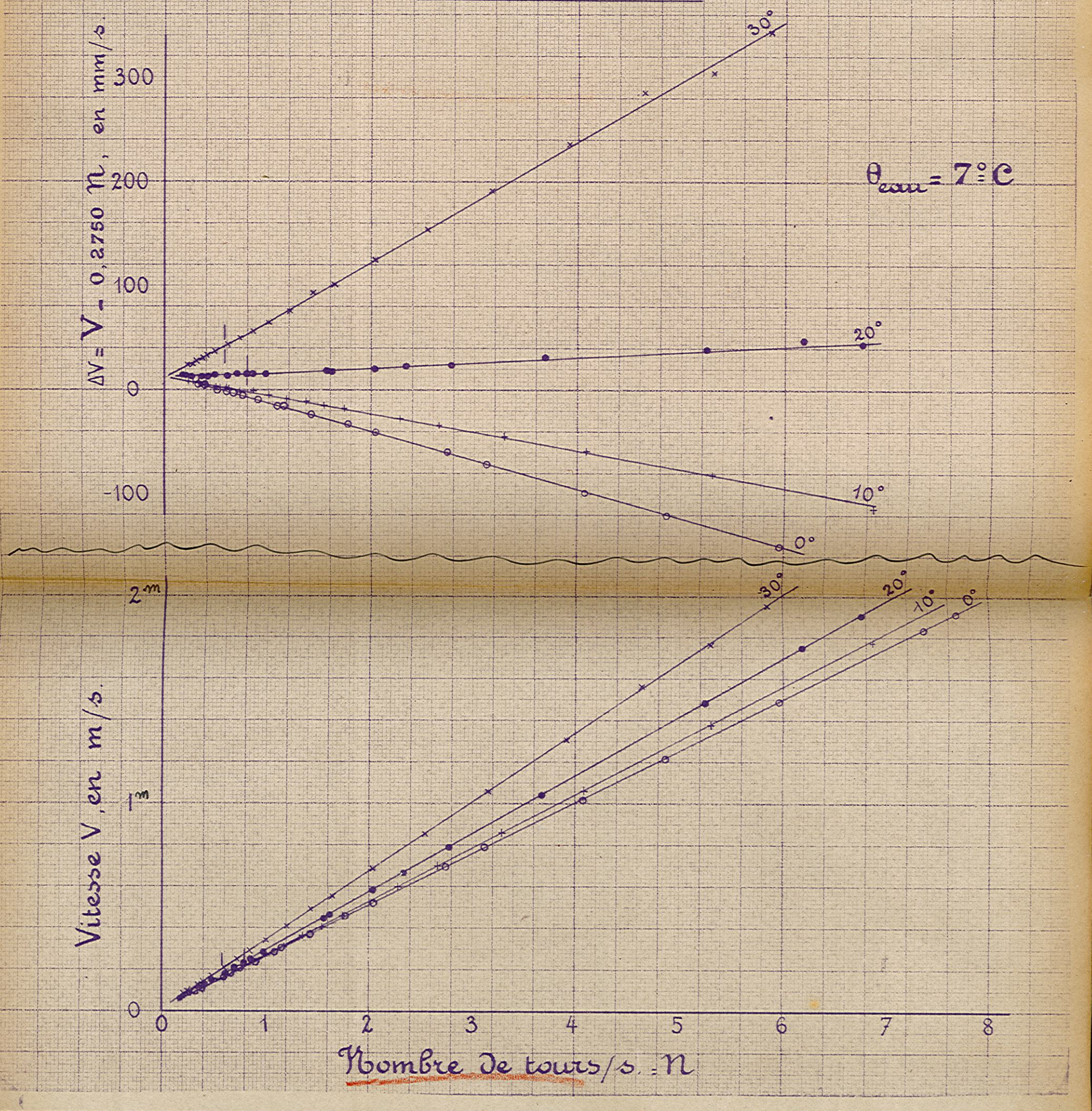


Influence de l'obliquité

fig. 19

Moulinet 0'1, P75

$\theta_{eau} = 7°C$

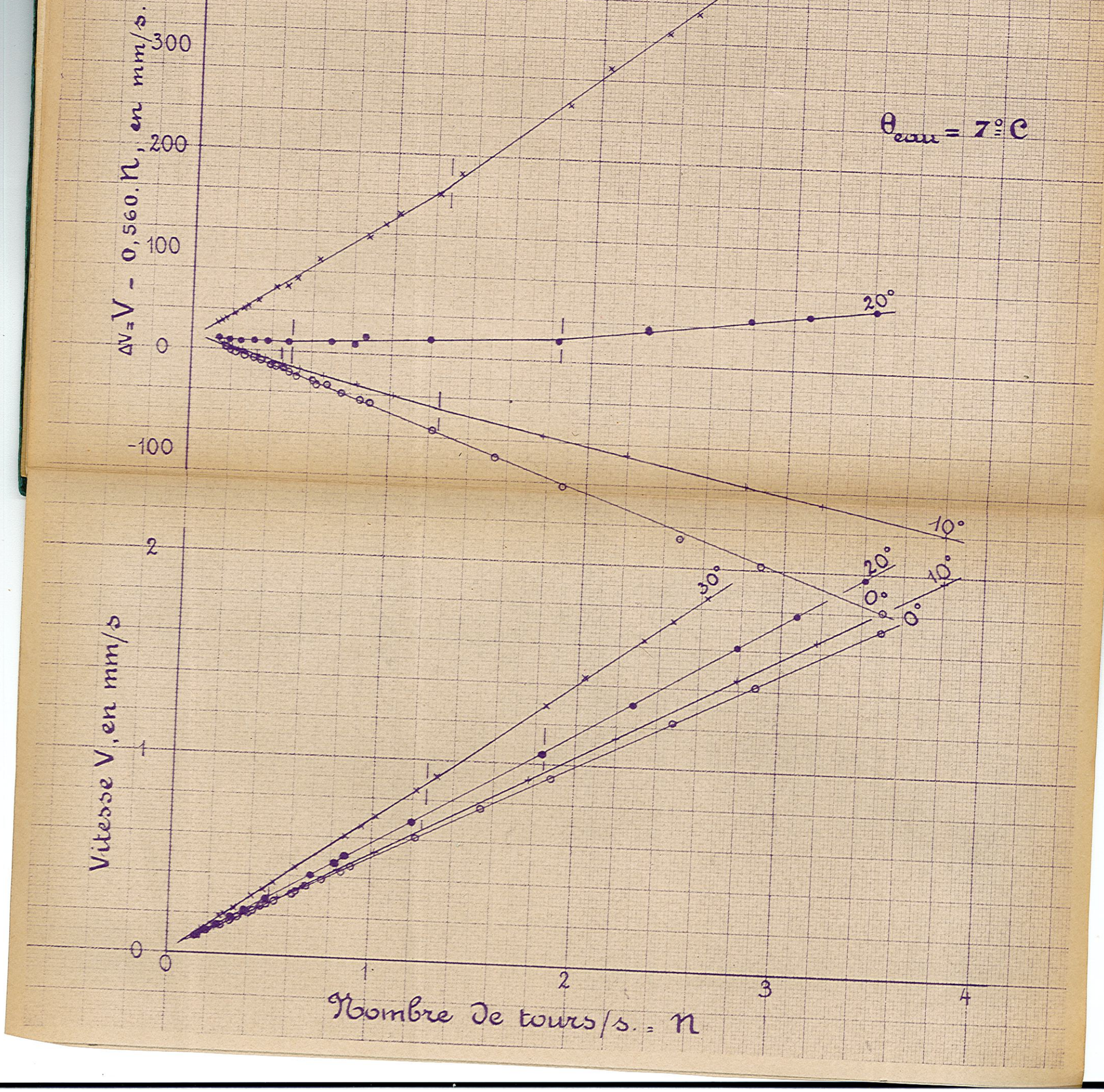


Influence de l'obliquité

Moulinet 0'2, P75

fig. 20

$\theta_{eau} = 7°C$



Influence de l'obliquité

fig. 21

Moulinet 03, P75

$\theta_{eau} = 6°,5\ C$

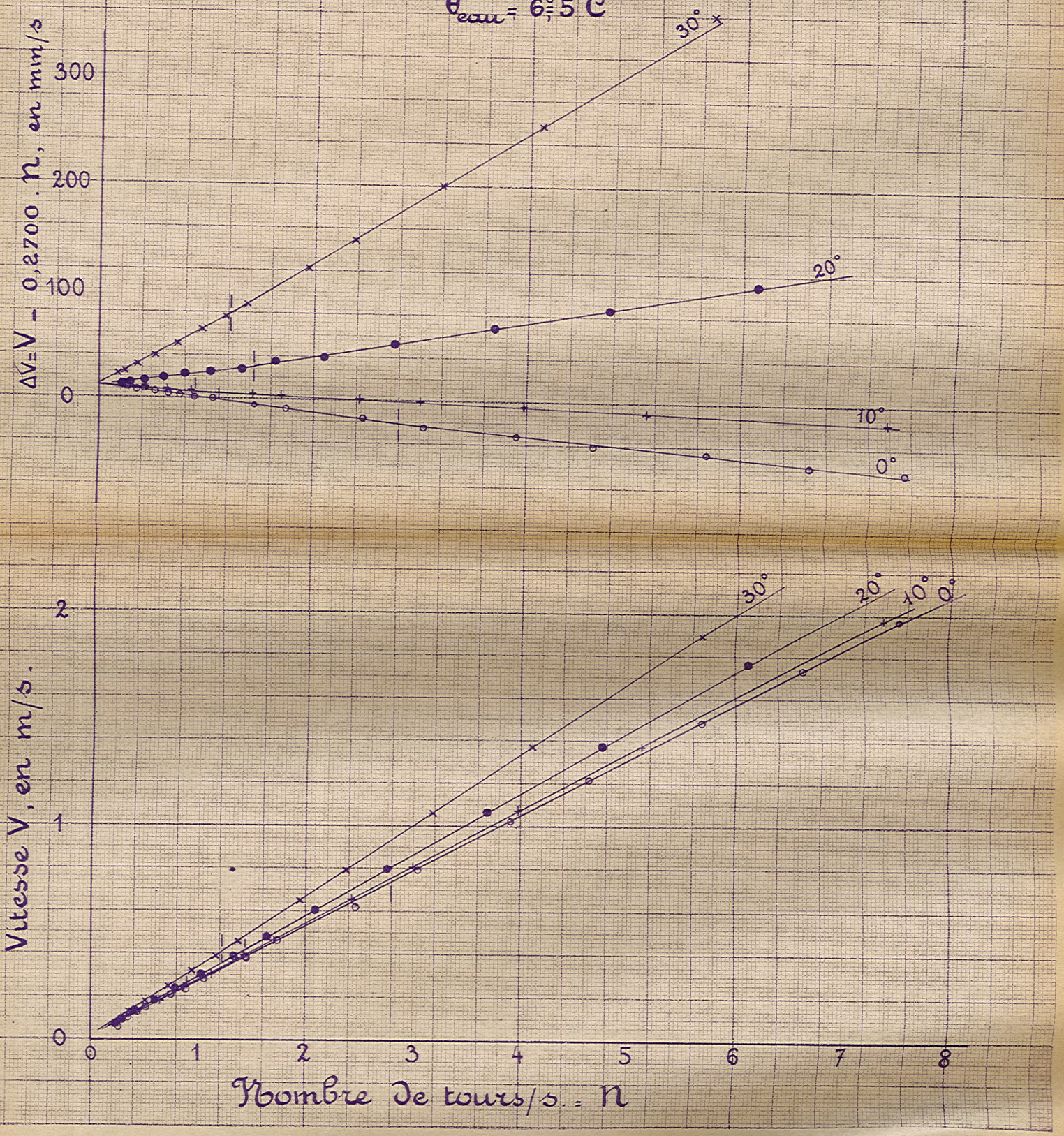
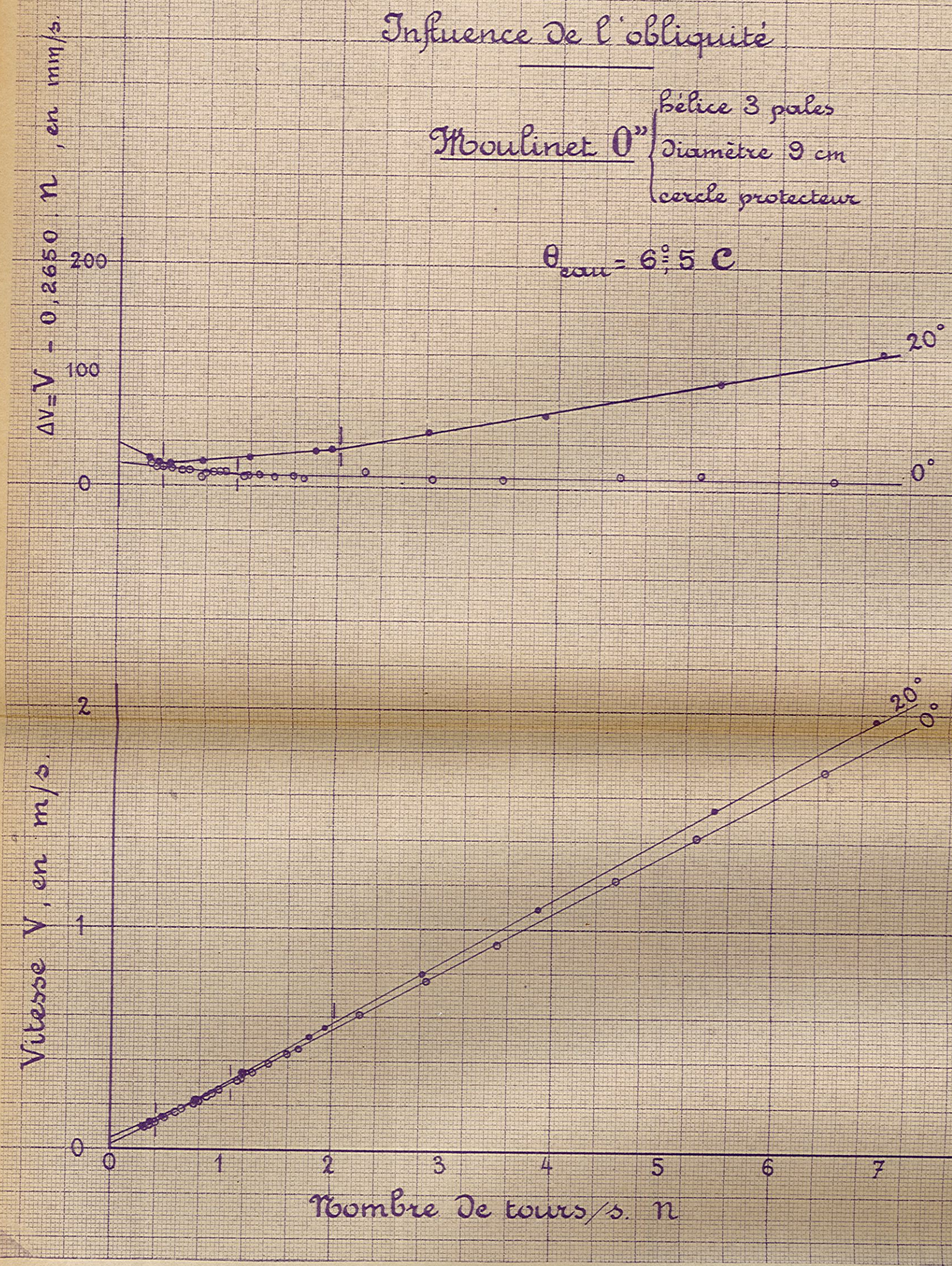


fig. 22.

Influence de l'obliquité

Moulinet O" { hélice 3 pales ; diamètre 9 cm ; cercle protecteur

$\theta_{eau} = 6°,5$ C

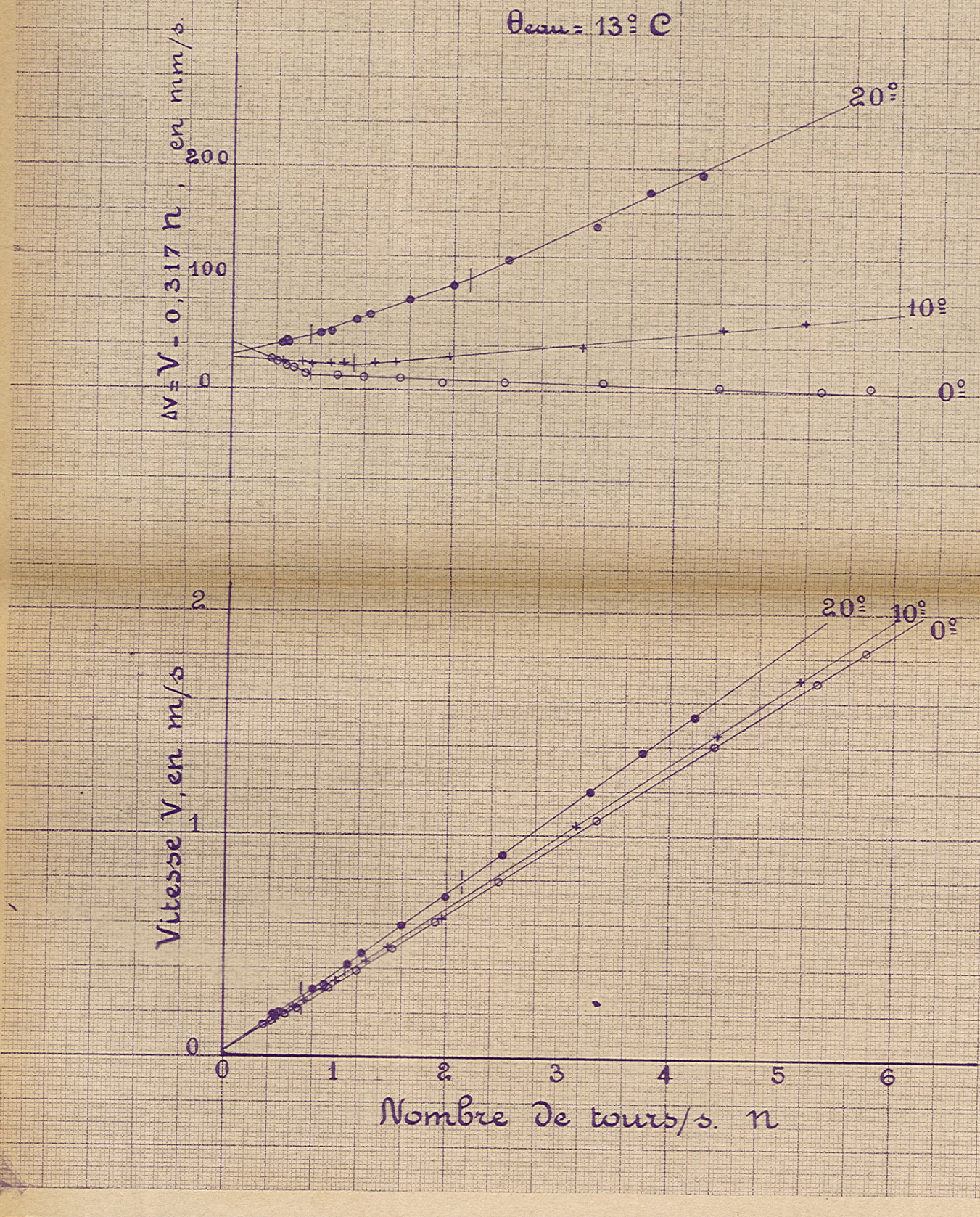


Influence de l'obliquité.

fig. 23

Moulinet R'2, P 40

$\theta_{eau} = 13°$ C



Vitesse varie de 1 m/s à 4 m/sec sur une longueur de 15 m

équation du mouvement

$V = \gamma t + V_0$ vanne de vitesse de 3 m/sec

$L = \int_{t=0}^{t=t} V\,dt = \int (\gamma t + V_0)\,dt$

$L = V_0 t + \frac{1}{2}\gamma t^2$

$\begin{cases} L = \frac{1}{2}\gamma t^2 = 15 \\ V = \gamma t \end{cases}$ $\begin{cases} \frac{1}{2}\gamma t_1^2 = 15 \\ \gamma t_1 = V = 3 \end{cases}$

Calcul de γ : on élimine t

$L = \frac{1}{2}\gamma t^2$

$V^2 = \gamma^2 t^2$

$\gamma = \frac{V^2}{2L} = \frac{9}{30} = 0,30$

$\frac{1}{2} t_1 = \frac{15}{3}$

$t_1 = 10''$

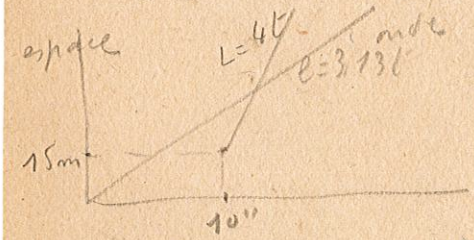
$\gamma = \frac{3}{10} = 0,3$ sec

Hauteur d'eau dans canal 1 m

$c = \sqrt{g\,h} = 3,13$ m/sec

équation d'espace de l'onde

$l = Vt = 3,13\,t$



Pour le chariot

équation des espaces : $L = Vt = 4t + a$

si $t = 10$ $L = 15 = 40 + a$; $a = -25$

$\begin{cases} L = 4t - 25 \\ l = 3,13t \end{cases}$ $4t - 25 = 3,13t$

$0,87t = 25$

$t = \frac{25}{0,87} \simeq 28''$

$L = 4t - 25 = 4 \times 28 - 25 = 97$ m.

le chariot doit rattraper l'ondée en bout de canal, ce qui explique le balancement de la longueur mesurée sur les bandes quand aux moulinets ; et non sur le graphique position du chariot