
	<h2 style="color: red;">Fiche 4.2 :</h2> <h1 style="color: red;">Le moulinet d'hydrométrie à axe horizontal à hélice</h1> <h2 style="color: red;">Etalonnage, équation du mouvement, facteurs d'influence</h2>	
<p><u>Rédacteur</u> : Perret C., famillecperret@orange.fr</p> <p><u>Vérificateurs</u> : Belleville A. Hauet A. (EDF DTG), Lang M. (Irstea), Le Coz J. (Irstea)</p>		<p><u>Mise à jour</u> :</p> <p>juillet 2017</p>

1. Introduction	1
2. Historique sur le dispositif de tarage ou d'étalonnage de l'instrument.....	2
3. Mise en équation de la relation entre vitesse d'écoulement et vitesse de rotation	4
4. Comparaison des différentes formulations	6
5. La principale limite de l'étalonnage en canal : la pointe d'Epper.....	7
6. Influence du support du moulinet	9
7. Influence de la température de l'eau	10
8. Influence de l'huile de lubrification	11
9. Fluctuation de vitesse - Influence de la masse et de la forme des hélices.....	11
10. Effet auto composant de l'hélice	12
11. Répétabilité des opérations d'étalonnage	16
12. Variabilité dans le temps des opérations d'étalonnage.....	19
13. Bibliographie	20

1. Introduction

La présente fiche propose un approfondissement technique concernant le moulinet d'hydrométrie. Elle se place dans la continuité de la fiche 4.1 qui a présenté l'évolution de l'instrument à travers l'expérience française. On aborde ici les questions plus spécifiques au bon fonctionnement de l'instrument telles que :

- ✓ l'étalonnage,
- ✓ la mise en équation du mouvement,
- ✓ les facteurs d'influence.

Comme dans la fiche 4.1, on s'appuie sur l'expérience française dans ces domaines grâce à l'abondante bibliographie disponible.

2. Historique sur le dispositif de tarage ou d'étalonnage de l'instrument

Le moulinet d'hydrométrie permet d'estimer la vitesse locale d'écoulement de l'eau v (fluide) à partir de la mesure de la vitesse de rotation de l'hélice n .

$$v = f(n) \quad (1)$$

L'opération qui consiste à établir empiriquement cette relation a d'abord été nommée « tarage » (Baumgarten, 1847). Cette dénomination a été employée durant tout le 19^{ème} siècle notamment par Ritter (1885) qui décrit de manière très détaillée l'état de l'art de son époque. Au début du 20^{ème} siècle, le terme « étalonnage » commence à faire son apparition (Camichel Eydoux, 1918). Bourgeat (1936) emploie principalement le terme « étalonnage » lorsqu'il décrit les opérations mais le terme « tarage » est encore parfois employé. Les travaux effectués après la deuxième guerre mondiale (Irmay, 1954) (Gabaudan et Noiret, 1969) (CHR, 1987) et les laboratoires qui pratiquent l'exercice de nos jours, adoptent quant à eux le plus souvent, le terme « étalonnage ». Dans la suite de cette note, on adoptera le terme étalonnage pour désigner l'opération qui consiste à établir la relation (1).

D'Aubuisson des Voisins (1834) donne une description sommaire de l'opération d'étalonnage sans en dévoiler les détails pratiques. Baumgarten (1847) fait une description précise du dispositif expérimental qu'il a mis en place : « *Le bras de la Garonne, dit de Col de Fer, qui est fermé complètement en amont, présentait une eau parfaitement tranquille sur une longueur de 700 mètres environ en ligne droite, et une largeur de 40 mètres ; la profondeur à l'étiage était de 1,50 à 2 mètres ; c'était un endroit éminemment propice pour faire ces expériences. La tige du moulinet était fixée à 1 mètre du bord d'une petite yole, et le moulinet était plongé à 0.70 mètre sous la surface de l'eau* ». La yole était halée par des hommes sur une longueur de 130 mètres matérialisée par des jalons, soit à partir d'un bateau lorsque le tirage se faisait de l'aval vers l'amont, soit à partir des chemins de halage lorsque le tirage se faisait de l'amont vers l'aval. Baumgarten a également eu le souci de comparer les étalonnages effectués en eaux calmes avec des mesures en eaux vives. Ces comparaisons ont porté sur des vitesses proches de la surface.

Ritter (1885) a donné une description très détaillée de trois modes opératoires qu'il a expérimentés pour l'étalonnage de son moulinet. Il a procédé par halage en eau calme à l'instar de Baumgarten et par immersion dans une veine de laboratoire pour les faibles vitesses. Enfin, il a également procédé par comparaison en rivière avec un tube de Darcy directement adapté sur le moulinet.

Latérade (1858) évoque la technique du manège pour l'étalonnage des moulinets sans décrire toutefois le dispositif technique. Rateau (1898) l'évoque à nouveau en précisant qu'elle lui paraît être une technique acceptable. Côte (1908) annonce la mise en place d'une « station de tarage » consistant en « un manège électrique » dans un des fossés de la fortification de Grenoble. Il précise avec satisfaction que jusque là « le tarage des moulinets avait lieu à Munich¹ ou à Berne ». Cent dix ans plus tard, on relèvera, non sans regret, que l'on est revenu à la situation du début du 20^{ème} siècle.

A travers cette description du cheminement technique des utilisateurs des moulinets pour l'établissement des lois d'étalonnage durant le 19^{ème} siècle, on constate que deux questions ont guidé leurs démarches : était-on fondé à étalonner les moulinets en eaux calmes alors que leur utilisation se fait souvent en eaux vives ? Pouvait-on simplifier le processus en utilisant un manège électrique qui permettait de réduire l'emprise de l'installation ?

Il est difficile de dire avec précision à quelle date ces questions ont été tranchées mais Montagné (1929) affirme que « *Les hydrauliciens paraissent maintenant d'accord pour admettre que la courbe de tarage d'un moulinet, en déplaçant celui-ci d'une vitesse uniforme, en eau calme, coïncide avec la courbe de tarage obtenue en eau courante* ». Il cite les travaux de Camichel, Escande et Ricaud (sans donner toutefois de références) qui s'inscrivent à la suite de la création de la station de tarage de l'université de Toulouse des Ponts Jumeaux au port de l'Embouchure en 1913 (Sentenac, 1921).

¹ Il est possible que l'auteur ait cité Munich mais que ce soit en fait Kempten

La Société Hydrotechnique de France (SHF) a inauguré le laboratoire d'hydraulique de Beauvert en 1922 (Anonyme, 1922) mais c'est au début des années 1930 - Bourgeat (1936) ne précise pas la date exactement- que ce dernier a été doté d'un canal d'étalonnage pour les moulinets (cf. Tableau 1). L'entraînement du chariot était réalisé par un moteur asynchrone de 20 chevaux muni d'un régulateur de vitesse. Ce canal a été repris après la deuxième guerre mondiale par Electricité de France (EDF) et a fonctionné jusqu'à la fin des années 1990 après une automatisation du système d'acquisition au milieu des années 1980.

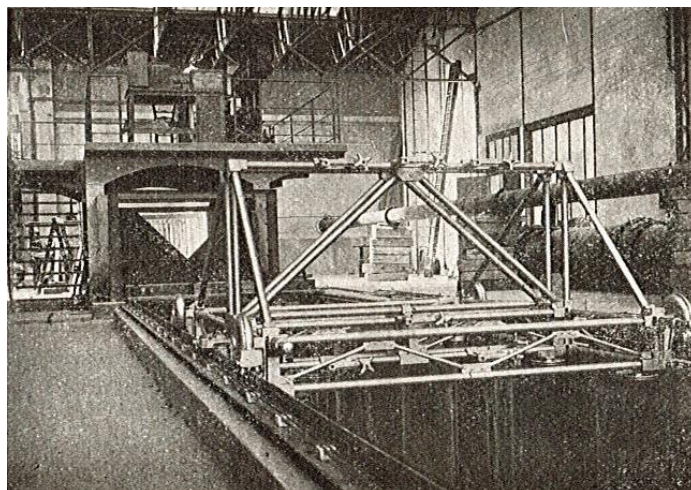


Figure 1 : Chariot de la station d'étalonnage de Beauvert

Une étude relativement récente a été effectuée par la Commission Internationale de l'Hydrologie du bassin du Rhin (CHR, 1987). Elle a consisté à faire réaliser des étalonnages de lots de moulinets par différents laboratoires. On reproduit tableau 1, l'inventaire des laboratoires qui ont participé à cette étude, ce qui permet de dresser un état intéressant mais non exhaustif des dispositifs d'étalonnage à la fin du 20^{ème} siècle. De nos jours, les moulinets sont majoritairement étalonnés selon le principe du chariot tracté. On remarque que l'organisme néerlandais utilise un procédé différent.

Lieux	Organismes	Adresse	Longueur [m]	Largeur [m]	Profondeur [m]	Vitesse max. [m/s]
Vienne	Bundesanstalt für Wasserbauversuche und Hydrometrische Prüfung	A- 1090 Vienne IX	40,65	2,25	2	3,3
Hambourg	Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) Außenstelle Küste	D-2000 Hambourg 56	93	1,5	1,2	5
Berne	Service hydrologique et géologique national	CH-3003 Berne	140	3,98	1,86	10
Kempten	Firma Ott	D-8960 Kempten	85	2,5	1,6	7,5
Rijswijk	Rijkswaterstaat Dienst Getijdewateren Hoofdafdeling Hydro-Instrumentatie	NL-2288 BB Rijswijk (ZH)	Canal fermé de forme annulaire complètement rempli d'eau propulsé par des groupes et dirigée vers la section de mesure à vitesse constante. A la section de mesure, le diamètre de la conduite vaut 2,30 mètres. La vitesse de référence est mesurée par ultra-sons.			

Tableau 1 : Inventaire des laboratoires ayant participé à l'étude CHR (1987)

3. Mise en équation de la relation entre vitesse d'écoulement et vitesse de rotation

La relation d'étalonnage d'un moulinet donnée de nos jours sous la forme d'une succession d'équations du premier degré de la vitesse de l'eau en mètres par seconde en fonction de la vitesse de rotation de l'hélice en tours par seconde, nous semble aujourd'hui bien triviale tant elle paraît évidente et d'usage très simple. Pourtant, lorsqu'on se penche sur les pratiques des hydromètres depuis le déploiement des moulinets au milieu du 19^{ème} siècle, on constate que la mise en équation du mouvement de l'hélice du moulinet a fait l'objet de nombreuses études et publications qui s'étalent sur plus d'un siècle.

L'équation qui décrit la rotation d'un moulinet idéal placé dans un écoulement uniforme est donnée par la relation suivante :

$$v = A.n \quad (2)$$

avec :

- v : vitesse de l'écoulement [m/s]
- A : pas géométrique de l'hélice [m]. C'est la distance de deux points consécutifs situés sur une même génératrice.
- n : vitesse de rotation [tours/ s]

L'équation (2) est décrite par D'Aubuisson des Voisins (1834). En pratique, l'hélice doit vaincre les frottements et elle tournera un peu moins vite que ne l'indique l'équation 1 et elle ne se mettra en mouvement qu'au-delà d'une vitesse minimale. Latérade (1858) signale que Chasles dans son cours à l'École Polytechnique, propose une autre formulation mais malgré de nombreuses recherches, il n'a pas été possible de retrouver le cours de M. Chasles qui justifie la formulation suivante :

$$v = A.n + B \quad (3)$$

avec :

- B : vitesse initiale de démarrage [m/s]

Les expérimentateurs se sont aperçus assez vite que cette formulation n'était pas complètement satisfaisante car dans les opérations de tarage des moulinets, ils ont pu observer la non-linéarité de la réponse de l'instrument pour les faibles et fortes vitesses (Baumgarten, 1847). L'article est très complet et outre une description précise du fonctionnement du moulinet de Woltmann et une proposition d'amélioration, il propose une formulation analytique à partir d'une étude théorique qu'il conforte ensuite par des expériences que l'on peut assimiler à des étalonnages de laboratoire (cf. section 1). Il a proposé la formulation suivante de type hyperbolique valable pour le moulinet de Woltmann dans sa version d'origine et pour l'instrument qu'il a perfectionné en donnant une forme hélicoïdale aux ailettes (cf. Bonus de la Charte Qualité de l'Hydrométrie Fiche 4.1). Les coefficients A , B , C sont calés à partir des expérimentations :

$$v = A.n + \sqrt{B.n^2 + C} \quad (4)$$

avec :

- C un paramètre qui dépend de l'instrument.

Il faut noter que cette formulation hyperbolique n'a pas fait l'objet d'un accord immédiat entre les praticiens français. Certains comme Latérade (1858) préféreraient la formulation linéaire de Chasles car probablement d'emploi plus facile. Latérade justifie cependant son choix en s'appuyant sur des mesures expérimentales, mais L'Eveillé (1860) démonte pas à pas son argumentaire en montrant grâce à d'autres essais que son choix de la relation linéaire ne se justifiait que par l'emploi d'un moulinet peu sensible et de vitesses relativement élevées. Il retient que la formule de Baumgarten

est justifiée pour mieux définir le fonctionnement à faibles vitesses. Ritter (1885) revient une nouvelle fois sur la question en préférant la formulation linéaire en arguant de la trop grande différence entre les conditions d'étalonnage en eaux calmes et les mesures en eaux courantes.

L'étude a été reprise plus tard par Rateau (1898). Ce dernier part d'une analyse mécanique du fonctionnement en égalant analytiquement les couples moteur et résistant de l'hélice. Ce faisant, il obtient une formulation hyperbolique proche de celle de Baumgarten.

$$v = A.n + B + \frac{C}{v} \quad (5)$$

Les utilisateurs des moulinets ont rapidement renoncé à utiliser les formes hyperboliques de l'équation. Ils l'ont remplacée par une succession de segments de droite. Il n'est pas aisé de préciser formellement à qui l'on doit cette évolution qui persiste encore aujourd'hui. Bourgeat (1936) l'a décrite de manière complète. Il considère que l'équation du moulinet peut être décrite par des segments de droite. Chaque segment peut être formulé de la manière suivante :

$$v = (A + \alpha).n + B \quad (6)$$

où

- α représente une correction du pas théorique de l'hélice [m].
- B représente la vitesse de démarrage de l'hélice [m/s]

Pour déterminer α et B qui sont les deux inconnues, on peut exprimer la relation d'une autre manière :

$$v - A.n = \alpha.n + B \quad (7)$$

En portant sur un graphe cette relation, on trouve facilement α et B pour chacun des segments. La figure 2 donne la représentation graphique de cette formulation appliquée aux résultats de l'étalonnage d'un moulinet Ott C2 muni d'une hélice dont le pas théorique A vaut 0,10 mètre. Cette représentation est puissante puisqu'elle permet de faire apparaître les ruptures de la relation d'étalonnage. Dans l'exemple proposé, une rupture apparaît pour une vitesse de rotation n valant environ 2 tours par seconde et on peut identifier deux droites pour lesquelles on détermine facilement les valeurs respectives de α et b :

Pour les faibles vitesses :

$$v - A.n = 0,0003.n + 0,0395$$

Pour les vitesses plus fortes :

$$v - A.n = 0,0042.n + 0,0343$$

La formule d'étalonnage du moulinet se déduit facilement :

Pour $n < 2$ tr/s :

$$v = 0,1003.n + 0,0395$$

Pour $n \geq 2$ tr/s :

$$v = 0,1042.n + 0,0343$$

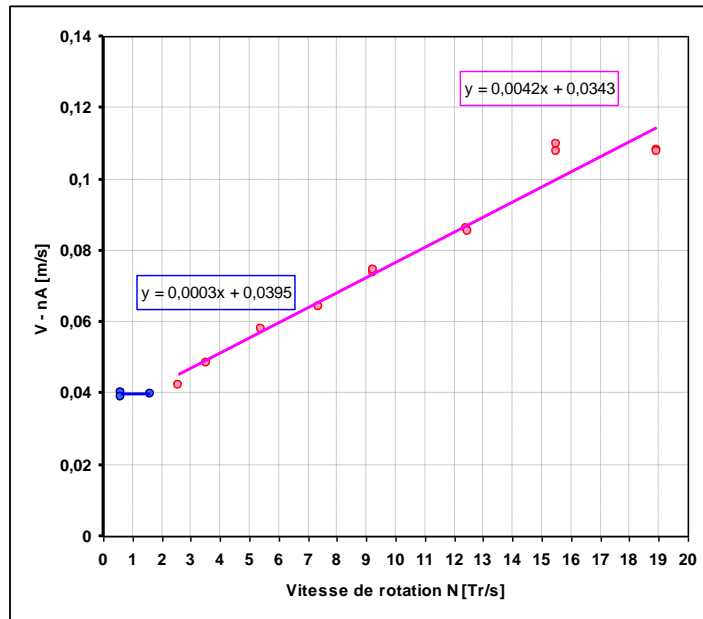


Figure 2 : Détermination des segments linéaires de l'équation d'un moulinet

Les laboratoires d'étalonnage utilisent toujours cette méthode pour caractériser l'équation des moulinets.

Le laboratoire de l'OFEV à Berne avait donné pour ce moulinet :

Pour $n < 1,7568$ tr/s :

$$v = 0,1006 \cdot n + 0,039$$

Pour $n \geq 1,7568$ tr/s :

$$v = 0,1043 \cdot n + 0,0325$$

Dans la suite du document, on retiendra cette équation.

4. Comparaison des différentes formulations

Les différentes méthodes ont été appliquées et on obtient les formulations suivantes :

Formule de D'Aubuisson des Voisins :

$$v = 0,1068 \cdot n$$

Formule de Chasles (linéaire) :

$$v = 0,1042 \cdot n + 0,0352$$

Formule de Baumgarten :

$$v = 0,1054 \cdot n + \sqrt{-2,52 \cdot 10^{(-6)} n^2 + 0,00095}$$

Formule de Rateau :

$$v = 0,1042 \cdot n + 0,0344 + \frac{0,00017}{v}$$

La formule de Bourgeat correspond à celle proposée par le laboratoire de Berne.

Les écarts entre la vitesse mesurée du chariot et la vitesse calculée du moulinet à partir des différentes méthodes ont été calculés et sont présentés tableau 2.

Vitesse de rotation (tr/s)	0,6	1,6	2,6	3,5	5,4	7,4	9,3	12,4	15,5	18,9
D'Aubuisson des Voisins	-36,0%	-14,5%	-8,2%	-6,2%	-3,5%	-1,8%	-1,1%	-0,1%	-0,3%	1,0%
Chasles	-2,4%	1,0%	1,3%	0,4%	0,0%	0,2%	0,0%	0,1%	-0,6%	0,3%
Baumgarten	-5,9%	-0,2%	0,8%	0,2%	0,2%	0,5%	0,4%	0,4%	-0,4%	0,1%
Rateau	-1,5%	1,0%	1,2%	0,3%	-0,1%	0,2%	0,0%	0,0%	-0,6%	0,3%
Bourgeat	-0,8%	0,0%	0,4%	-0,2%	-0,3%	0,0%	-0,1%	0,0%	-0,6%	0,3%

Tableau 2 : Ecart en % entre la vitesse mesurée et la vitesse calculée à partir de différentes formulations

Sans surprise, il ressort que la méthode qu'appliquait d'Aubuisson des Voisins n'est pas adaptée pour les vitesses de rotation faibles à moyennes contrairement à celle de Chasles qui reste finalement acceptable.

Quant aux tenants de la formulation hyperbolique, Baumgarten et Rateau, notre analyse montre que cette formulation n'apporte que peu de gain relativement à la formulation linéaire de Chasles. Il faut cependant préciser que le moulinet testé est un instrument moderne dont la plupart des frottements ont été réduits à néant ou presque (cf. fiche 4.1) ce qui n'était pas le cas à l'époque où ces auteurs ont établi leur théorie.

La méthode de Bourgeat appliquée aujourd'hui par les laboratoires de Kempten et de Berne est la mieux adaptée car elle minimise les écarts sur toute la gamme de mesure.

5. La principale limite de l'étalonnage en canal : la pointe d'Epper

La méthode du chariot tracté utilisé comme moyen d'étalonnage des moulinets, comporte néanmoins un inconvénient décrit par Rateau (1898, 1902) qui publie les résultats des travaux de l'ingénieur Epper effectués à Berne. Celui-ci a mis en évidence que les résultats des mesures d'étalonnage présentaient une singularité pour certaines vitesses de traction du chariot. A l'époque l'entraînement de ce dernier était effectué à bras d'hommes et on pouvait suspecter que la vitesse de traction résultante n'était pas suffisamment régulière. Il remarque néanmoins que l'irrégularité observée est dépendante de la géométrie du canal et de l'encombrement du support du moulinet et qu'il se manifeste pour une gamme de vitesses encadrant la célérité c de la propagation des ondes de surface dans le canal :

$$c = \sqrt{gH} \quad (8)$$

où :

- g est l'accélération de la pesanteur [$m.s^{-1}$]
- H est la profondeur d'eau dans le canal

Le phénomène a été baptisé « Pointe d'Epper » ou « Effet Epper ». Il est dû à la réflexion sur les parois des ondes induites par la partie immergée du train mobile formé par le moulinet et son support.

Pour le laboratoire de Beauvert, la hauteur d'usage du canal était de 1,10 mètre et par conséquent, la pointe d'Epper était observée pour une vitesse du chariot voisine de 3,2 m/s.

Bourgeat (1936) lorsqu'il présente les premiers résultats des étalonnages effectués à Beauvert, décrit de manière très détaillée le phénomène. La traction du chariot étant alors électrique, il concentre son analyse sur les facteurs d'influence. La figure 3 montre le résultat de ses expériences pour un moulinet type Ott KANSAS muni d'une hélice de 0,125 mètre de diamètre.

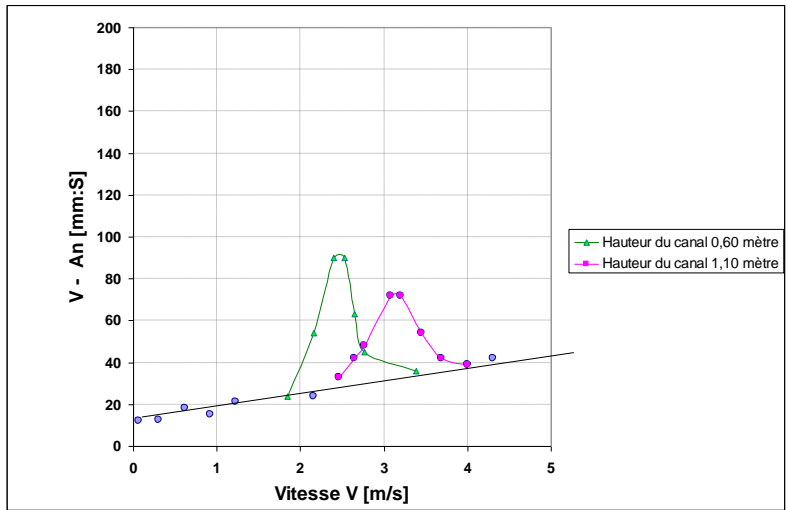


Figure 3 : Représentation de l’anomalie « Pointe d’Epper » pour deux hauteurs différentes dans le canal de Beauvert pour un moulinet muni d’une hélice au pas de 0,25 mètre d’après Bourgeat (1936)

On constate d’abord que le maximum de la perturbation est bien observé pour la vitesse du chariot correspondant à la célérité des ondes pour la profondeur d’eau du canal. On observe ensuite que l’erreur maximum induite serait de l’ordre de 1% pour une profondeur de 1,10 mètre et de l’ordre de 3% pour une profondeur de 0,60 mètre.

Il effectue aussi une étude analytique pour proposer une loi générale qui tienne compte des caractéristiques géométriques du canal, de la profondeur d’eau et des caractéristiques du train mobile immergé. De son propre aveu, cette dernière n’est pas complètement satisfaisante et c’est à partir de ses expérimentations qu’il propose une formule qui permet de quantifier l’amplitude de la perturbation. C’est selon cette approche qu’il présente l’ensemble de ses résultats dans un document plus récent mais non daté (Bourgeat, probablement 1942).

L’équation (7) est d’abord modifiée de la manière suivante :

$$v = A.n + B + \varepsilon \tag{9}$$

où

- ε représente une quantité variable qui représente l’effet Epper.

Bourgeat (1936, non daté) propose d’exprimer la valeur maximum de ε soit ε_m de la manière suivante :

$$\varepsilon_m = K \frac{\sqrt{S}}{b.H} \tag{10}$$

où :

- S représente l’aire du contour apparent immergé du train mobile [m²]. Pour une perche de 9 mm et un moulinet muni d’une hélice de 0,125 mètre de diamètre, immergé au centre du canal réglé à une profondeur de 1,10 mètre, S valait 0,028 m².
- b est la largeur du canal [m]
- H est la profondeur du canal [m]
- K est un coefficient qui dépend du moulinet et du type de montage.

Les opérateurs du laboratoire de Beauvert tenaient compte évidemment de la perturbation en n'effectuant pas de mesure pour les vitesses qui étaient critiques en fonction du type de support qui était utilisé. La figure 4 reproduit les résultats d'un étalonnage de moulinet effectué à Beauvert vers 1987. Elle montre bien qu'aucun essai n'a été réalisé pour des vitesses comprises entre 2,1 et 3,2 m/s.

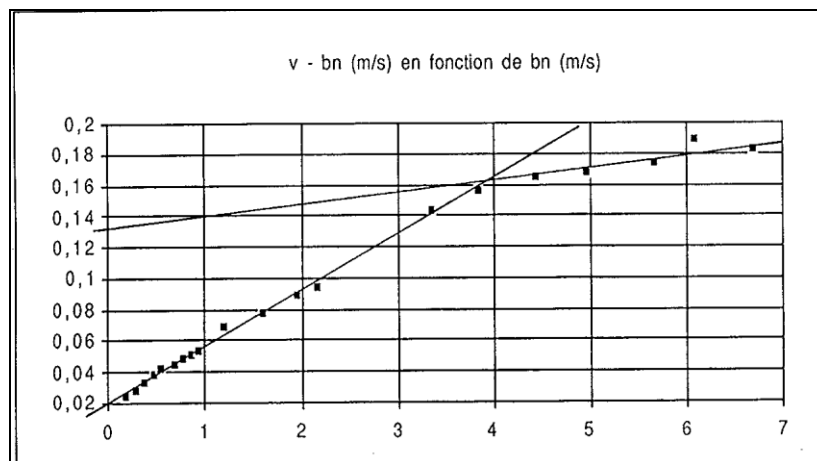


Figure 4 : Représentation des essais d'étalonnage d'un moulinet type TEXAS modifié au laboratoire de Beauvert d'après Perret (1992).

A titre de comparaison, on peut signaler que le canal exploité à Berne par l'institut fédéral de métrologie Suisse (METAS) a une longueur de 140 mètres, une largeur de 4 mètres et une profondeur pouvant aller jusqu'à 2,40 mètres. Le METAS indique dans le certificat d'étalonnage qu'il délivre pour un moulinet Ott C2 monté sur une perche de 9 mm de diamètre et muni d'une hélice de 0,03 mètre de diamètre, que l'effet Epper est sensible autour d'une vitesse de 3,5 m/s et entraîne une incertitude un peu plus élevée dans cette zone. Le moulinet est immergé à 0,20 mètre sous la surface d'après le schéma annexé au certificat. Compte tenu de la largeur et de la profondeur importante de ce canal, si on applique la formule (10) proposée par Bourgeat en prenant K égal à 1, pour évaluer le biais de mesure maximal engendré par l'effet Epper, on obtient la valeur 0,2% alors qu'à Beauvert on aurait obtenu 1%.

6. Influence du support du moulinet

Si le type de support utilisé a une influence sur l'importance de l'effet Epper comme on vient de le voir, il en a également sur les coefficients des formules d'étalonnage. Des essais ont été conduits en 1981 par EDF DTG au laboratoire d'étalonnage de Berne. Le tableau 2 présente les résultats pour un moulinet type CRTG 80 (Moulinet Ott KANSAS modifié par DTG avec contact électromagnétique) muni d'une hélice kralastic au pas de 0,50 mètre.

Type de support	Vitesse de rotation en tr/s		
	0,4	1	5
Perche 20*40	0,2098	0,5157	2,58
Saumon 45 kg	0,211	0,5182	2,6
Saumon 80 kg	0,2158	0,5285	2,629
Ecart entre perche et saumon 45 kg	0,57%	0,48%	0,78%
Ecart entre perche et saumon 80 kg	2,86%	2,48%	1,90%

Tableau 3 : Comparaison des mesures de vitesse effectuées avec des supports différents pour une hélice kralastic au pas de 0,50 mètre

Si les écarts entre les mesures sur perche et saumon de 45 kg restent inférieurs à 1%, ils dépassent 2% lorsqu'on utilise un saumon de 80 kg.

Un autre essai a été effectué avec le même type de moulinet mais avec une hélice en alliage d'aluminium (ALPAX) au pas de 0,25 mètre.

Type de support	Vitesse de rotation en tr/s						
	0,4	0,8	1	2	5	10	20
Perche 20*40	0,1042	0,1945	0,2396	0,4652	1,142	2,2528	4,4488
Saumon 45 kg	0,103	0,1948	0,2407	0,4702	1,1501	2,2801	4,4943
Ecart entre perche et saumon 45 kg	-1,15%	0,15%	0,46%	1,07%	0,71%	1,21%	1,02%

Tableau 4 : Comparaison des mesures de vitesse effectuées avec des supports différents pour une hélice ALPAX au pas de 0,25 mètre

L'écart entre les deux supports reste modéré de l'ordre de 1% pour la majeure partie de la gamme de vitesse.

Une autre source, CHR (1987), indique que les différences entre les étalonnages de moulinets au saumon et ceux de moulinets sur perche, sont de l'ordre de 1% et atteignent parfois 1,5%. Le document n'indique pas dans quelles conditions exactes ces constatations ont été faites, notamment pour le type de saumon utilisé.

L'étude CHR (1987) effectuée avec des moulinets C31 montés soit sur perche de 20 mm, soit sur saumon de 100 kg, conclut sur un écart de 1% entre les deux modes de suspension. Toutefois, l'examen des essais qui ont été faits dans trois laboratoires (Vienne, Hambourg et Kempton) montre que ceux réalisés à Hambourg laissent apparaître des écarts qui vont jusqu'à plus de 2% lorsque la vitesse est supérieure à 2 m/s. Ces constats se rapprocheraient donc de ceux effectués par EDF DTG quelques années plus tôt.

On retiendra que lorsqu'on utilise un saumon de 80 ou 100 kg, il est préférable d'employer une formule d'étalonnage qui tient compte de ce type de support sous peine de produire des mesures entachées d'un biais pouvant être supérieur à 2%.

7. Influence de la température de l'eau

Il est légitime de se poser la question de l'influence de la température de l'eau sur le fonctionnement du moulinet. On peut en effet supposer que le couple résistant de l'équipage mobile est modifié car la température de l'eau influence la viscosité de l'huile de lubrification. On présente figure 5 le résultat d'un essai effectué à Beauvert sur un moulinet TEXAS. La vitesse mesurée à une température de 9°C a été prise en référence.

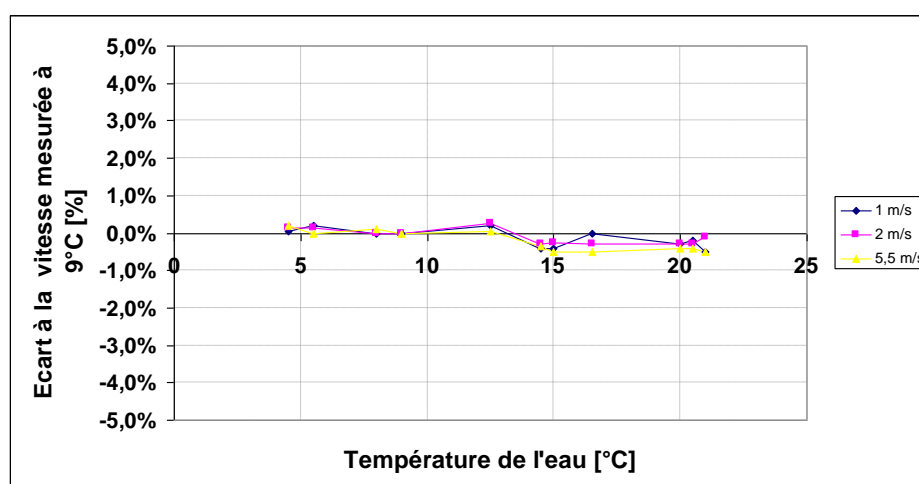


Figure 5 : Influence de la température de l'eau pour l'étalonnage d'un moulinet TEXAS muni d'une hélice ALPAX au pas de 0,25 mètre.

On peut noter d'abord que la gamme des températures testées (5°C à 22°C) ne couvre pas celle que l'on peut rencontrer dans la nature (0°C à 35°C).

L'essai montre que l'effet de la température est réduit, probablement du fait de la qualité de l'huile utilisée. On notera que le moulinet testé comportait encore des pièces mécaniques (vis sans fin, pignon) qui augmentaient le couple résistant. Il est probable que l'effet de la température soit encore plus réduit sur les moulinets de la dernière génération. L'étude CHR (1987) confirme cette hypothèse sans toutefois le démontrer formellement.

8. Influence de l'huile de lubrification

Il est fortement recommandé de n'utiliser que l'huile préconisée par le constructeur du moulinet pour la lubrification. Bourgeat (1936) présente déjà une étude comparative d'étalonnages effectués avec des huiles différentes. D'autres essais ont été menés dans les années 1960 pour quantifier le biais induit par l'emploi d'huile de viscosité variable. L'étude la plus complète a été réalisée par JP Ravet en 1961 dans le canal de SOGREAH à Grenoble. Il n'a pas été possible de retrouver le document d'origine mais le résultat principal est reproduit à partir d'un document rédigé plus tardivement (Perret, 1992).

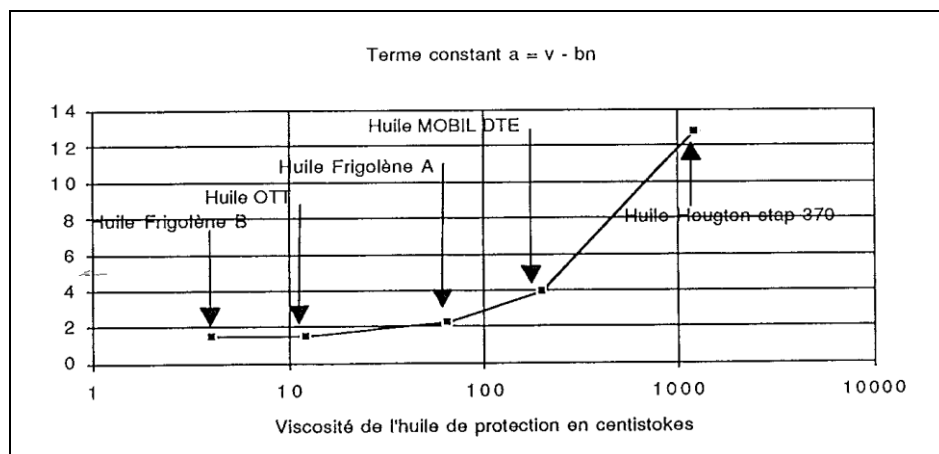


Figure 6 : Influence de la viscosité cinématique de l'huile de lubrification sur le terme constant de l'équation d'étalonnage (en cm/s) d'après Ravet (1961) cité par Perret (1992)

La figure 6 montre que le biais induit par l'emploi d'une huile très visqueuse peut atteindre 0,1 m/s soit 10% pour une vitesse de 1 m/s. Ce cas est sans doute extrême. Gabaudan et Noiret (1969) évoquaient un écart de 0,01 m/s sur le terme constant de l'équation entre une huile visqueuse (50 centistokes) et une huile fluide (7 centistokes), comme quoi la notion de « fluidité » reste très relative.

9. Fluctuation de vitesse - Influence de la masse et de la forme des hélices

Rateau (1898) a démontré analytiquement que l'hélice d'un moulinet devait être la plus légère possible pour intégrer les fluctuations de vitesse. Il propose l'équation suivante pour exprimer l'accélération angulaire :

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{SR \sin(2\alpha) K}{2g} \frac{\omega v (v - \rho \Omega)}{H} \quad (11)$$

Avec :

S : la surface balayée par les ailes du moulinet [m²]

R : le rayon du moulinet [m]

g : l'accélération de la pesanteur [m/s^2]

α : l'angle d'inclinaison des ailes sur le plan perpendiculaire à l'axe du moulinet

K : un coefficient de construction

ϖ : le poids spécifique du fluide [N/m^3]

v : la vitesse du fluide [m/s]

ρ : le pas géométrique de l'hélice [m]

Ω : la vitesse angulaire de l'hélice [$radian/s$]

H : le moment d'inertie de l'hélice [$kg.m^2$]

L'ICMG (International Current Meter Group) a publié en 1971 une étude de synthèse sur les travaux réalisés par différents laboratoires sur l'impact des fluctuations de vitesse. Perret (1992) cite ce document et reprend les principales conclusions notamment celle de Monsieur Fischer, émises à partir d'essais conduits au laboratoire de Berne :

- Les fluctuations radiales de vitesse ont pour effet général de ralentir les hélices indépendamment de la fréquence de fluctuation et de la densité du matériau constituant l'hélice. Seule la forme de l'hélice a une influence sur l'importance du ralentissement.
- Les fluctuations axiales de vitesse provoquent une accélération de tous les types d'hélice. La fréquence de la fluctuation et la densité du matériau constituant l'hélice influencent la réponse de l'hélice. L'accélération est d'autant plus forte que la fréquence de fluctuation est plus forte et que l'hélice est plus lourde.

Il en résulte les indications pratiques suivantes :

- L'hélice doit être courte
- L'épaisseur des pales doit être faible
- Le pas de l'hélice doit être grand
- Le matériau constituant l'hélice doit être de faible densité.

On constate que ces conclusions sont en parfaite concordance avec l'équation (11).

Les expérimentateurs du 19^{ème} siècle n'ont pas été très prolixes quant à la description des matériaux qu'ils ont employés pour la construction des palettes ou des hélices. La notion de masse de l'hélice n'est d'ailleurs pas évoquée. C'est Rateau (1898) qui le premier met en évidence le rôle de l'inertie de l'hélice dans la capacité de celle-ci à synchroniser sa rotation avec la vitesse du fluide.

Pour répondre à cette exigence de légèreté, les constructeurs ont d'abord utilisé les alliages d'aluminium comme le Duralumin (Anonyme, 1930) qui était déjà utilisé dans l'aéronautique, ou l'Alpax. L'introduction des matières plastiques date des années 1960. Le bronze a également été employé. Perret (1992) cite une étude de Villa datant de 1963 qui précise la masse respective des hélices testées dans le laboratoire de Padoue : Araldite (42 à 48 grammes), Aluminium (90 à 100 grammes), Bronze (260 à 290 grammes).

10. Effet auto composant de l'hélice

L'effet auto composant d'une hélice est la capacité de cette dernière à mesurer la composante axiale de la vitesse lorsque celle-ci a un angle d'incidence non nul avec l'axe du moulinet. Bourgeat (1936) étudie déjà l'effet auto composant des hélices qu'il teste au laboratoire de Beauvert. Les hélices qu'il emploie à l'époque n'ont pas vocation à être utilisées dans des courants obliques. Aussi cherche-t-il à évaluer seulement leur limite d'utilisation dans des conditions non standard.

Plus tard, les expérimentateurs ont cherché à fabriquer des hélices pouvant être utilisées dans des écoulements non parallèles aux parois pour tenir compte de la géométrie parfois complexe des pertuis d'entrée des groupes hydroélectriques de basse chute.

Toutes les hélices ont une capacité auto composante qui est spécifiée par le fabricant. L'effet auto composant est exprimé en valeur d'angle en degré. En général, les hélices utilisées en hydrométrie des cours d'eau ont un effet auto composant jusqu'à un angle d'incidence de 5°. Certaines hélices sont spécialement conçues pour proposer à l'utilisateur un effet auto composant jusqu'à un angle supérieur qui peut atteindre 45°. Elles sont surtout utilisées pour mesurer les écoulements dans des pertuis d'amenée de centrales hydrauliques qui ont une forme convergente.

Si l'effet auto composant est parfait, lorsqu'une hélice est désaxée d'un angle α par rapport à la direction de l'écoulement ou si l'écoulement forme un angle α par rapport à l'axe de rotation du moulinet, la vitesse mesurée par le moulinet vaut logiquement :

(12)

$$V_a = \cos(\alpha) V_e$$

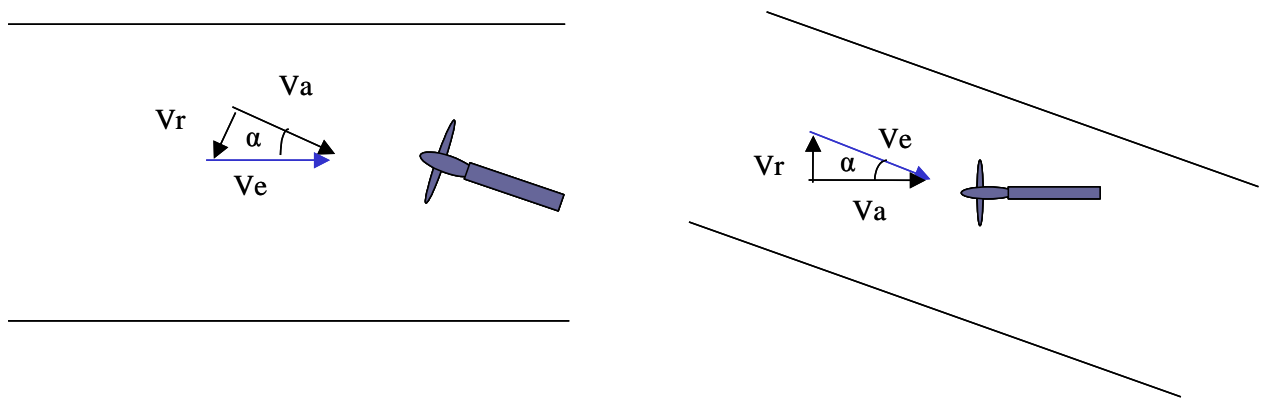


Figure 7 : Positionnements possible d'un moulinet dans un écoulement et effet auto-composant de l'hélice mesurant la composante axiale de la vitesse

On pose α' l'angle calculé à partir de la mesure des vitesses avec :

$$\cos(\alpha') = \frac{V_a}{V_e}$$

Pour quantifier le caractère auto composant de l'hélice, on calcule l'écart relatif δ en pour cent entre $\cos(\alpha')$ et $\cos(\alpha)$:

$$\delta = \frac{\cos(\alpha') - \cos(\alpha)}{\cos(\alpha)}$$

Pour les besoins d'essais de réception réalisés sur des usines hydroélectriques du Rhône et du Rhin, Bonnafoux (1964) a cherché à quantifier le biais induit par l'emploi de la loi (7) pour des hélices « ordinaires » type Ott TEXAS d'une part, et des hélices auto composantes d'autre part, lorsqu'elles étaient positionnées avec un angle α par rapport à l'écoulement. L'essai a été réalisé au laboratoire de Toulouse et au bassin de carène de l'armée (adresse non spécifiée). La figure 8 montre le résultat.

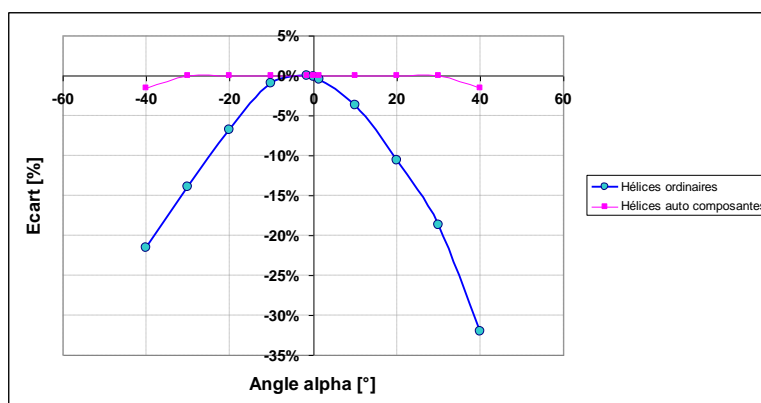


Figure 8 : Ecart relatif δ pour deux types d'hélice déterminé à partir d'essais en laboratoire d'étalonnage.

La figure 8 montre que les hélices auto composantes testées sont entièrement conformes dans la gamme (-30° +30°). Les hélices ordinaires ont un effet auto composant seulement lorsque l'angle reste limité (-5° +5°). Au-delà, le biais de mesure négatif augmente très vite.

L'effet auto composant d'un lot d'hélices Ott de pas valant 0,10 m garanties avec un effet auto composant jusqu'à 30°, a été étudié par EDF en 1955 à l'usine de Plan d'Arem dans les Pyrénées. L'étude a débuté par une vérification des garanties dans les laboratoires d'étalonnage de Toulouse et de Beauvert.

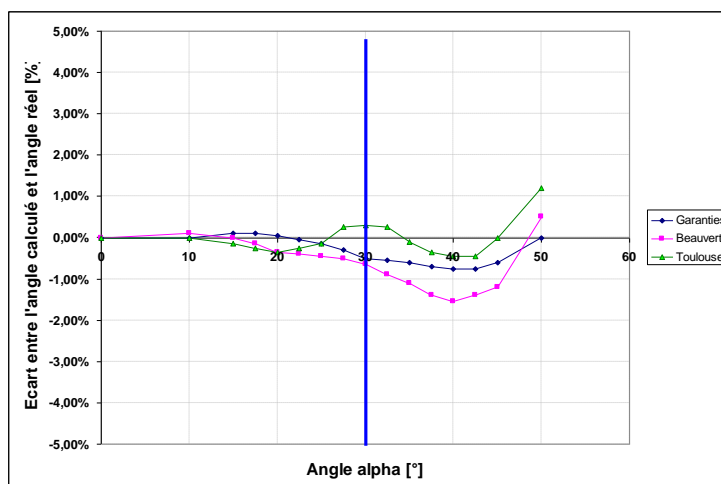


Figure 9 : Ecart entre l'angle calculé à partir de la vitesse donnée par le moulinet et la vitesse axiale du chariot et l'angle formé par le moulinet et l'axe du canal.

On constate que l'effet auto composant est bien observé jusqu'à un angle de 30° avec toutefois des effets divergents en fonction du laboratoire à partir de 20°.

L'essai de Plan d'Arem proprement dit avait pour but de vérifier l'effet auto composant dans des conditions réelles de mesure et non plus dans celles d'un canal d'étalonnage. Deux sections A et B de jaugeages ont été installées dans le canal rectangulaire de l'usine. La section B était conçue de manière à pouvoir régler l'inclinaison des moulinets.

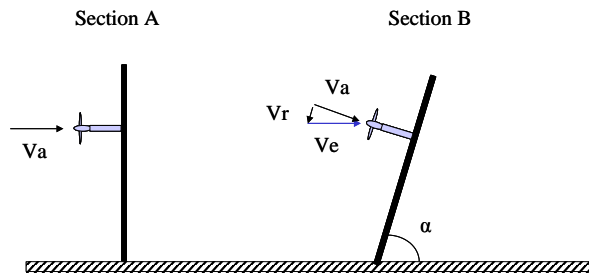


Figure 10 : Dispositif d'essai pour l'évaluation de l'effet auto composant des hélices à Plan d'Arem.

Les moulinets de la section B devaient mesurer la composante axiale V_a de la vitesse. L'étude a consisté à comparer l'angle α à celui α' calculé à partir de la mesure de V_a (Sections A et B).

La section de mesure a été découpée en 4 secteurs :

1	7	2
5	9	6
3	8	4

Figure 11 : sectorisation de la section de mesure

Secteur I : 1, 2, 3, 4

Secteur II : 5, 6

Secteur III : 7, 8

Secteur IV : 9

La figure 12 présente les résultats de δ pour les quatre secteurs. Ils montrent que la mesure de la vitesse V_a est conforme aux attentes pour le secteur IV qui constitue la partie centrale de l'écoulement. Pour le secteur I, c'est à dire pour les mesures situées aux marges de la section d'écoulement, dès que l'angle dépasse 10°, on observe une accélération apparente qui atteint 12% pour un angle de 35°. Pour les secteurs II et III, l'écart observé est moins important.

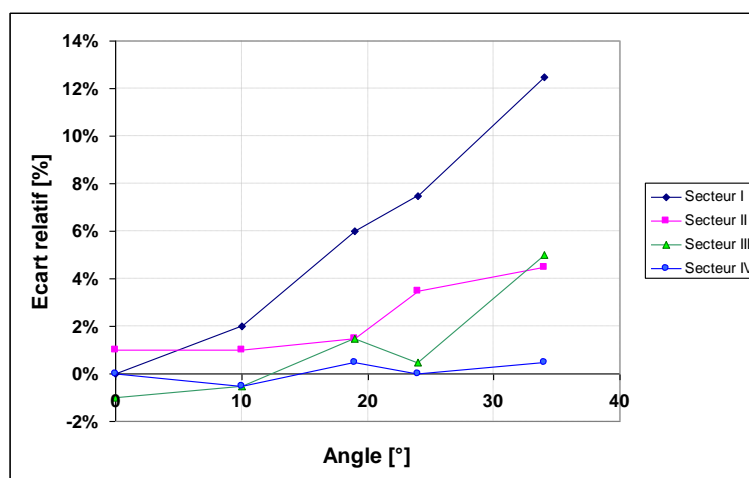


Figure 12 : Ecart relatif entre l'angle géométrique α et l'angle α' calculé à partir des mesures des vitesses V_a et V_e

Cet essai montre que l'effet auto composant des hélices peut être perturbé par les parois ce qui doit inciter les hydromètres à ne pas trop compter sur cette propriété des hélices lorsque la profondeur est réduite et près des berges.

En pratique en hydrométrie, on peut rencontrer deux cas qui sont représentés figure 13.

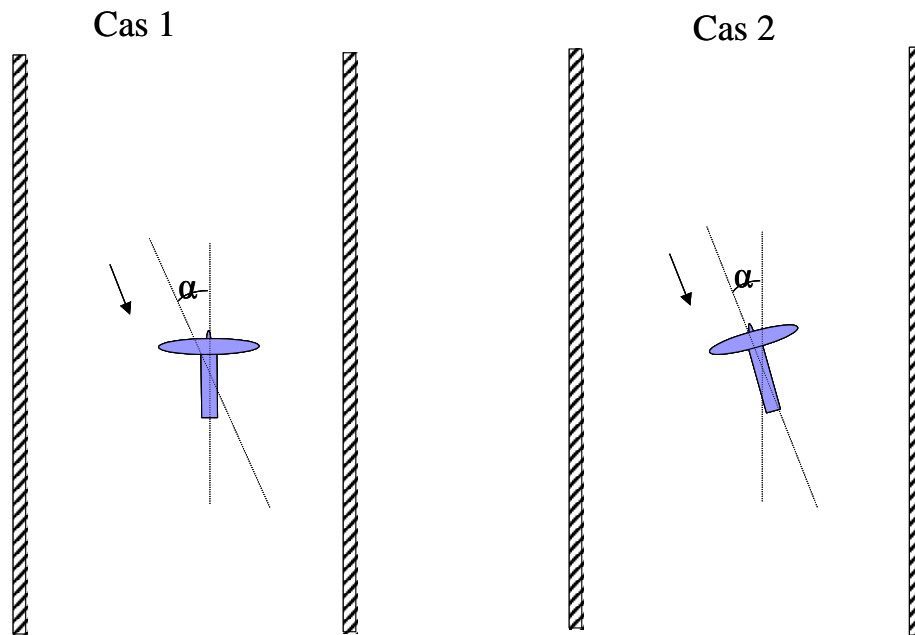


Figure 13 : Positions possibles d'un moulinet dans un écoulement non parallèle aux berges

Le cas 1 représente la situation d'un jaugeur « à pied dans la rivière » qui maintient une position perpendiculaire à la direction principale du lit. Il mesure la composante axiale de la vitesse s'il reste dans les limites de la capacité d'auto composition de l'hélice qu'il emploie en tenant compte toutefois des réserves exprimées plus haut.

Le cas 2 représente la situation du saumon qui grâce à sa mobilité autour du câble qui le suspend et de l'empennage dont il est muni, prend naturellement position dans l'axe de l'écoulement effectif. Dans ce cas, la vitesse mesurée doit être corrigée du cosinus de l'angle formé par l'axe de la vitesse mesurée et l'axe du chenal d'écoulement.

11. Répétabilité des opérations d'étalonnage

Une question peut être légitimement posée à propos de l'étalonnage :

- Jusqu'à quel niveau de détail quant à la configuration de l'instrument et à son mode d'utilisation est-il utile d'associer une formule d'étalonnage ? Autrement dit, peut-on utiliser une formule d'étalonnage unique pour un type d'hélice associé à un type de support ?

Pour répondre à cette question, les opérateurs ont dû d'abord s'intéresser à la variabilité des opérations d'étalonnage car y répondre positivement revient à considérer que l'incertitude sur le processus d'étalonnage est nettement supérieure à celle induite par les spécificités de fabrication des hélices.

Une expérimentation menée par Gabaudan et Noiret (1969) d'EDF DTG mérite d'être présentée. Elle a consisté à comparer les résultats de 124 étalonnages d'une même hélice avec l'étalonnage de 124 hélices. Un lot de 400 hélices kralastic (diamètre 0,125 m, pas de 0,50 m) a d'abord été sélectionné dans une population de 500 sur des critères de qualité de fabrication. Les 124 hélices testées ont été tirées au hasard dans le lot des 400 et une hélice a été choisie comme référence. Il faut noter que l'équipage mobile (axe palier) a été le même pour toutes les hélices. C'est au laboratoire de Beauvert que l'opération a eu lieu. Les résultats sont présentés à la figure 14.

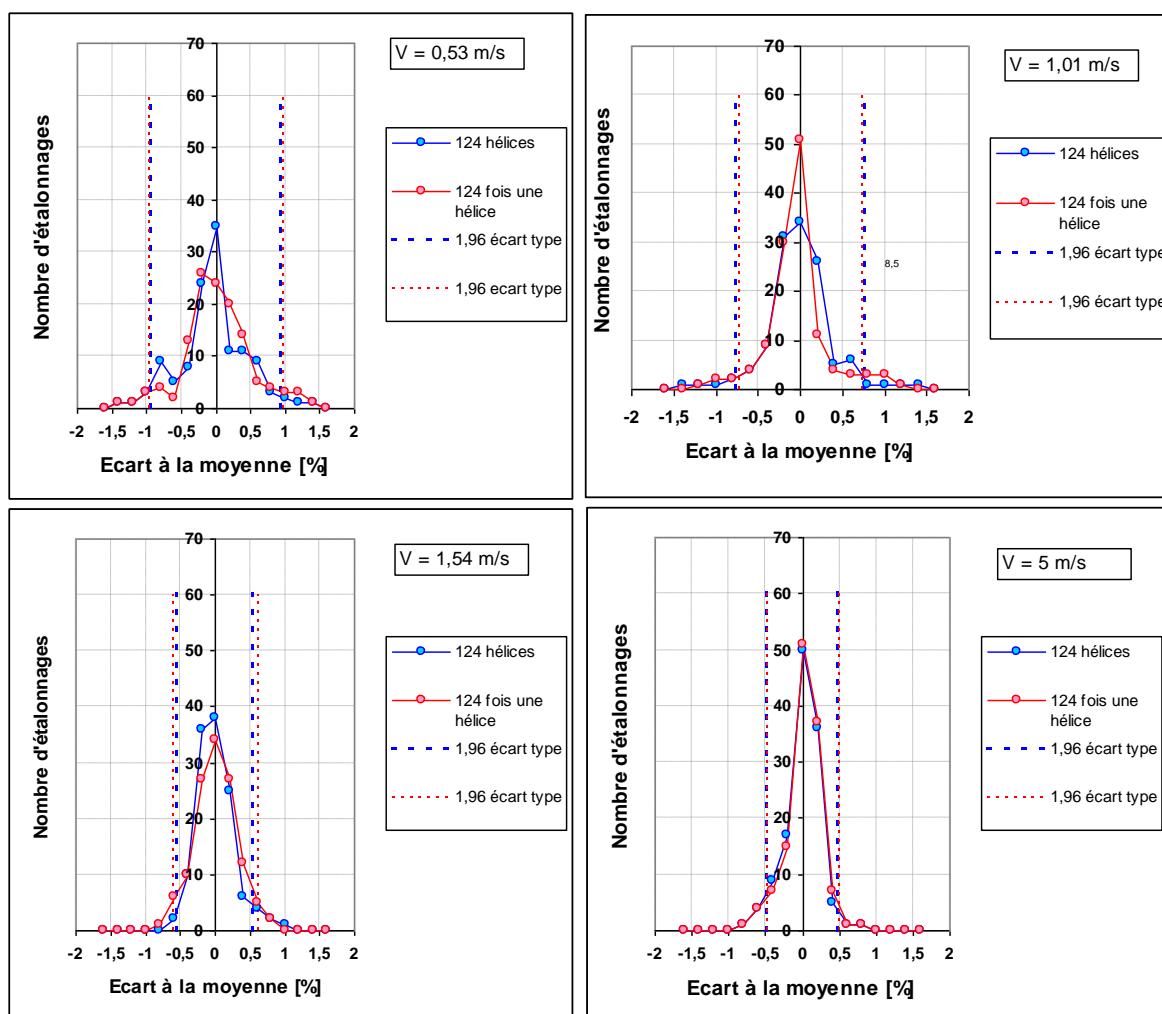


Figure 14 : Distribution des résultats des étalonnages (écarts en % à la moyenne des étalonnages) pour quatre vitesses différentes.

La figure 14 montre très nettement que la distribution des étalonnages de 124 hélices et celle correspondant à 124 étalonnages de la même hélice, sont très proches. On remarque toutefois que la comparaison est d'autant meilleure que la vitesse de référence du chariot augmente.

Comme l'équipage mobile a été le même pour toutes les hélices, en comparant les distributions des écarts d'étalonnage de 124 hélices différentes d'une part, et celle de 124 étalonnages de la même hélice d'autre part, les opérateurs ont conclu que les résultats obtenus mettaient en évidence la variabilité du processus d'étalonnage.

La forme manifestement gaussienne des distributions avec une moyenne des écarts quasiment égale à 0 permet de quantifier la part d'incertitude (hors effet de biais toujours possible) liée au processus d'étalonnage à partir de l'écart type des écarts. Sur la figure 14, on a fait figurer la valeur élargie à deux écarts types des écarts obtenus. Ceux ci sont repris dans la figure 15 qui permet finalement d'estimer la part d'incertitude liée au processus d'étalonnage. On constate que cette dernière croît lorsque les vitesses deviennent faibles en remarquant toutefois que Gabaudan et Noiret n'ont pas fait de tests en dessous de la valeur de 1 tour par seconde. Pour cette valeur, l'incertitude d'étalonnage serait de l'ordre de 1% au seuil de confiance de 95% alors qu'elle ne vaudrait que 0,5% à partir de 3 tours par seconde.

(Gabaudan et Noiret, 1969) ont cité une étude du « Geological Survey » avec les mêmes résultats sur un lot de 140 moulinets « Price » provenant de trois constructeurs différents et qui concluait qu'une équation unique pour un type d'hélice était aussi représentative qu'une équation individualisée.

Gabaudan et Noiret ne vont pas jusque là car leur centre d'intérêt n'était pas l'hydrométrie des cours d'eau mais plutôt la réception des machines hydroélectriques. Ils considèrent que, le constat obtenu sur les écarts : « 90% des hélices s'écartent de la valeur moyenne de plus ou moins 0,5% », n'est pas suffisant pour aller vers l'équation unique et ils concluent qu'un résultat à plus ou moins 0,1% changerait leur point de vue.

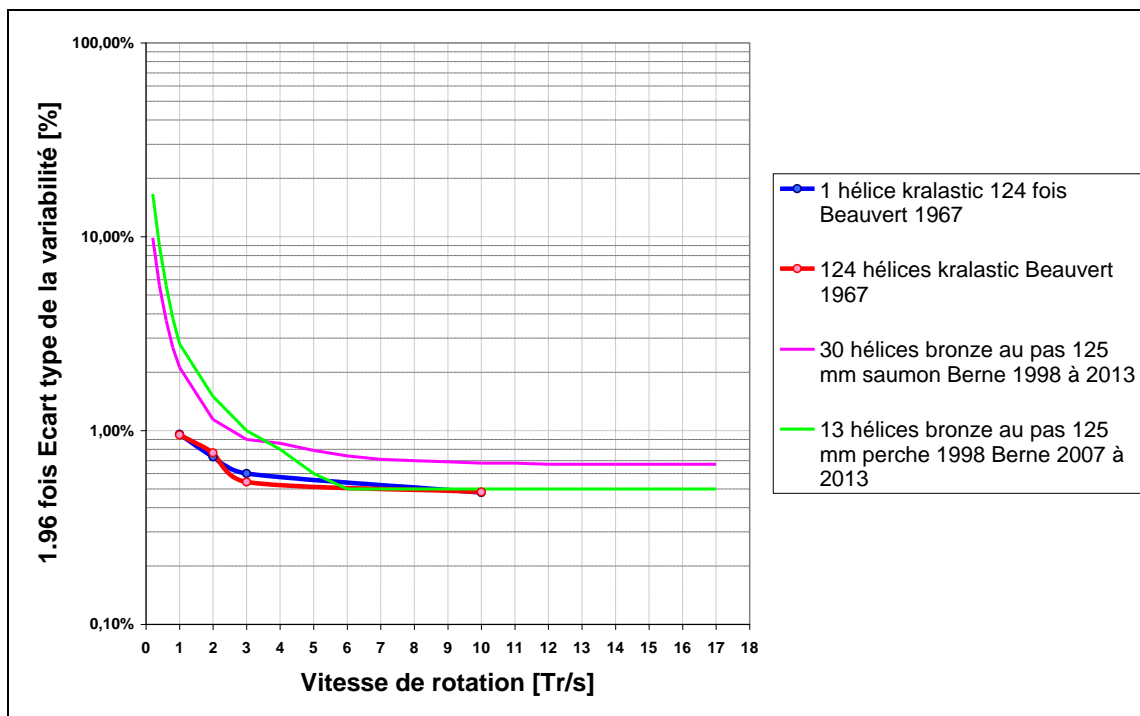


Figure 15 : Estimation de l'incertitude d'étalonnage (seuil de confiance de 95%) à partir de plusieurs expériences de répétabilité.

Les hydromètres d'EDF DTG n'ont pas eu les mêmes réserves que leurs collègues hydro-mécaniciens car leurs objectifs de précision étaient plus modestes. En 1980, ils décident de ne plus attribuer d'équation individuelle à chacun des moulinets qu'ils utilisent mais de procéder par équation unique dédiée à une association moulinet hélice et type de support comme par exemple : moulinet CRTG 80 muni d'une hélice en ALPAX de 0,25 mètre monté sur un saumon de 80 kg. Cette manière de faire a perduré jusqu'en 2000, date à laquelle une mauvaise interprétation de la norme ISO 9001 a conduit les utilisateurs à revenir à l'identification d'une équation par appareil. On peut parler de mauvaise interprétation car la norme ISO 9001 ne demandait pas de garanties sur la valeur métrologique des mesures effectuées mais « seulement » une démonstration que l'utilisation du matériel était conforme aux instructions techniques en vigueur, fussent-elles écrites par les utilisateurs eux-mêmes. Une quinzaine d'années et quelques étalonnages plus tard, DTG a reconsidéré la question et est revenue sur la pratique d'étalonnage par lot qu'elle avait abandonné (Hauet et Tornatore, 2017).

L'étude d'EDF DTG réalisée entre 2012 et 2014 a consisté à comparer les équations de moulinets étalonnés entre 1998 et 2013. Les résultats ont été portés sur la figure 15. On constate que les résultats obtenus se comparent assez bien avec ceux de Gabaudan et Noiret même s'il faut reconnaître que les conditions de réalisation des études ne sont pas identiques notamment sur le fait que la dernière étude utilise des étalonnages réalisés sur une période supérieure à 15 ans.

Il faut noter enfin qu'un constructeur comme SEBA revendique une interchangeabilité complète des hélices qu'il produit en s'appuyant sur les tolérances de fabrication qui garantissent une identité quasi parfaite.

12. Variabilité dans le temps des opérations d'étalonnage

Une autre question est régulièrement posée par les opérateurs :

- A quelle fréquence faut-il revisiter une formule d'étalonnage ?

Pour répondre à cette question, il faudrait être en mesure de détecter une dérive dans le temps de l'équation d'étalonnage. Pour cela, il faudrait disposer d'un panel de moulinets utilisés sur une période assez longue d'au moins 10 à 15 ans, dont l'étalonnage a été revisité de manière régulière. L'étude EDF DTG (2012 2014) répond en partie à ce critère. Elle cite 7 hélices en bronze au pas de 125 mm qui ont été étalonnées 4 à 5 fois entre 1998 et 2013. On propose de développer la méthodologie suivante :

L'étalonnage initial est muni d'un intervalle de confiance estimé à partir de l'étude DTG de 1967 (Gabaudan et Noiret, 1969) uniquement sur la gamme de vitesse disponible (0,5 m/s à 5 m/s puisque l'essai de 1967 a été réalisé entre 1 tour et 10 tours par seconde avec des hélices au pas de 0,50 mètre).

Si toutes les intersections des intervalles de confiance à 95% des étalonnages réalisés postérieurement sont non nulles avec l'intervalle de confiance initial à 95%, on pourrait conclure que les nouveaux étalonnages n'avaient pas d'intérêt. La figure 16 montre le principe proposé.

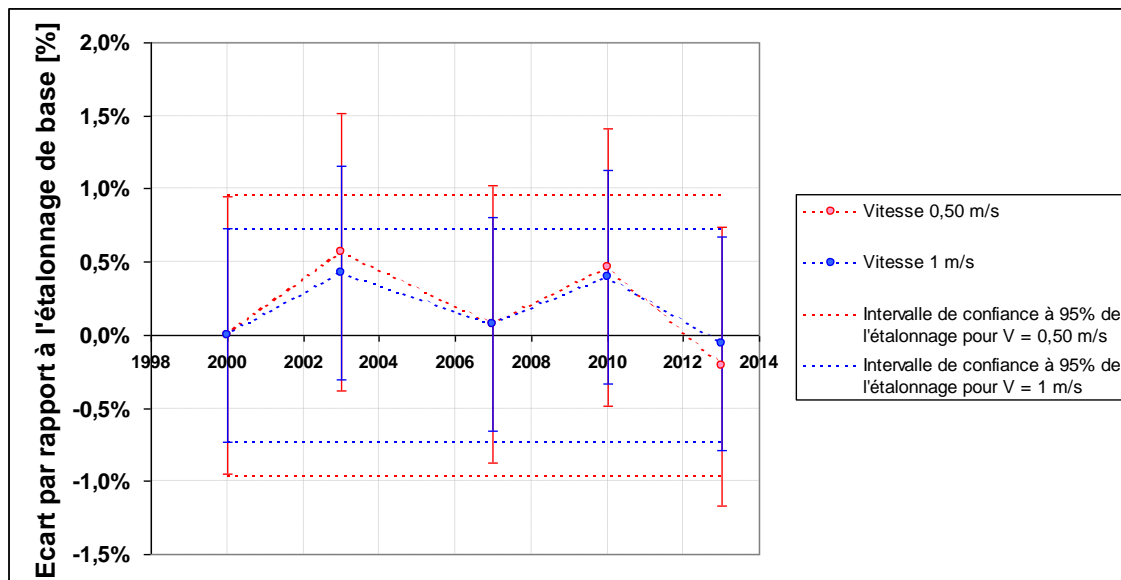


Figure 16 : Exemple pour deux vitesses de l'évolution de l'étalonnage d'un moulinet au cours du temps.

A ce jour, nous ne disposons pas de la matière disponible pour faire une démonstration complète. Une étude plus approfondie nécessiterait d'engager au préalable une phase initiale un peu absconse qui consisterait à collecter les informations disponibles qui sont conservées dans les armoires des différents opérateurs français.

Si la démonstration formelle de la stabilité dans le temps de l'équation d'étalonnage n'est pas faite, on dispose toutefois d'un certain nombre d'indices qui permettent de penser que cette hypothèse est vérifiée à condition bien sûr, d'entretenir et de vérifier scrupuleusement le matériel. Ce point fera l'objet d'une fiche à part. L'usage des opérateurs français veut que les hélices soient encore ré-étalonnées à des fréquences qui varient entre 2 et 5 ans suivant les services. EDF DTG a choisi de passer à une fréquence de 5 ans pour vérifier que l'hélice reste dans l'épure du modèle moyen qu'elle a adopté (Hauet et Tornatore, 2017).

13. Bibliographie

Anonyme (1922) Inauguration du laboratoire d'hydraulique de Beauvert à Grenoble – La Houille Blanche novembre décembre 1922 p. 214-p.219

<https://www.shf-lhb.org/articles/lhb/pdf/1922/06/lhb1922048.pdf>

Anonyme (1929) Nouveau moulinet Ott La Houille Blanche juillet août 1929 p. 126

<http://www.shf-lhb.org/articles/lhb/pdf/1929/04/lhb1929023.pdf>

Baumgarten (1847) Notice sur le moulinet de Woltmann, destiné à mesurer les vitesses de l'eau, sur son perfectionnement et les expériences faites avec cet instrument. Annales des Ponts et Chaussées.

<http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k408468b/f329.item.r=Baumgarten>

<http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k408468b/f408.item.r=Baumgarten>

Bonnafoux R. (1964) Une méthode de mesure des débits au moyen de moulinets dans les pertuis d'entrée des usines hydroélectriques de basse chute – La Houille Blanche N°5 1964 p. 591

<https://www.shf-lhb.org/fr/articles/lhb/pdf/1964/05/lhb1964035.pdf>

Bourgeat R. (1936) L'étalonnage des moulinets au laboratoire de Beauvert – Revue Générale de l'Hydraulique N°58 p. 802.

http://www.shf-hydro.org/maj/phototheque/photos/pdf/moulinet-bourgeat-rgh-58-1936-cr_cst_19360228.pdf

Bourgeat R. (1936) Recherches expérimentales sur l'étalonnage des moulinets en eau calme – Revue Générale de l'Hydraulique N°60 P. 873.

http://www.shf-hydro.org/maj/phototheque/photos/pdf/moulinet2-rgh-60-1937-pv_ct_shf_1936-11-05.pdf

Bourgeat R. (Non daté) Rapport sur l'étalonnage des moulinets – Commission des mesures hydrauliques.

Camichel C. Eydoux D. (1918) Le laboratoire d'hydraulique de l'institut électrotechnique de Toulouse – La houille Blanche mars avril 1918 p. 175.

<http://www.shf-lhb.org/articles/lhb/pdf/1918/02/lhb1918010.pdf>

CHR Commission internationale de l'Hydrologie du bassin du Rhin (1987) Influence de l'étalonnage des moulinets hydrométriques sur l'incertitude des déterminations de débit. Résultats d'une étude comparative.

<http://www.chr-khr.org/en/publication/influence-de-letalonnage-des-moulinets-hydrometriques-sur-lincertitude>

Côte E. F. (1908) : Le Service d'étude des grandes forces hydrauliques. La Houille Blanche N°12 Décembre 1908 p. 284.

<http://www.shf-lhb.org/fr/articles/lhb/abs/1908/12/lhb1908081/lhb1908081.html>

D'Aubuisson de Voisins (1834) : Traité d'hydraulique à l'usage des ingénieurs - Édition FG Levrault.

https://books.google.fr/books?id=ZFHvY4TTlygC&pg=PA129&dq=d%27aubuisson+de+voisins&hl=fr&sa=X&ved=0ahUKewjbqYmqp9_RAhVHL8AKHV32Cd4Q6AEITAI#v=onepage&q=d'aubuisson%20de%20voisins&f=false

Gabaudan J. Noiret B. (1969) Evolution récente de la technique des jaugeages industriels aux moulinets dans les écoulements en charge – La Houille Blanche août 1969 p. 475

<http://www.shf-lhb.org/articles/lhb/pdf/1969/05/lhb1969034.pdf>

Hauet A. Tornatore L. (2017) Récentes évolutions sur les mesures de débit par exploration du champ des vitesses au courantomètre – Congrès Hydrométrie 2017 Actes du colloque

Irmay S. (1954) Formules empiriques pour l'étalonnage des moulinets – La Houille Blanche juillet août 1954 p. 161.

<http://www.shf-lhb.org/articles/lhb/pdf/1954/06/lhb1954043.pdf>

Latérade (1858) Sur la manière de calculer les vitesses au moyen du moulinet de Woltmann – Annales des Ponts et Chaussées, semestre 1 1858 p. 121.

<http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k408489d/f124.image>

Montagné E. (1929) Expériences sur les moulins pour de faibles vitesses – La Houille Blanche juillet août 1929 p. 97

<http://www.shf-lhb.org/articles/lhb/pdf/1929/04/lhb1929018.pdf>

Killian (1904) Mesure de la vitesse d'un cours d'eau – La Houille Blanche octobre 1904 p. 331 332

<http://www.shf-lhb.org/articles/lhb/pdf/1904/10/lhb1904067.pdf>

L'Eveillé (1860) Sur le tarage du moulinet de Woltmann et sur son emploi dans la mesure du débit des rivières – Annales des Ponts et Chaussées semestre 1 1860 p. 215.

<http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k408493g/f218.image>

Perret (1992) Les moulinets Etalonnage, Comportement, Entretien – D4160/DTG RE-92-MOU02-R1-A

Rateau (1898) : Expérience et théorie sur le tube de Pitot et le moulinet de Woltmann – Annales des Mines p. 331

Rateau (1902) : Expérience et théorie sur le tube de Pitot et le moulinet de Woltmann Note complémentaire – Annales des Mines série 10 volume 2 p. 72

[https://patrimoine.mines-](https://patrimoine.mines-paristech.fr/document/Annales_Mines_1902_S10_02#?c=0&m=0&s=0&cv=40&z=-587.3243%2C-136.2777%2C4177.6486%2C2725.5556)

[paristech.fr/document/Annales_Mines_1902_S10_02#?c=0&m=0&s=0&cv=40&z=-587.3243%2C-136.2777%2C4177.6486%2C2725.5556](https://patrimoine.mines-paristech.fr/document/Annales_Mines_1902_S10_02#?c=0&m=0&s=0&cv=40&z=-587.3243%2C-136.2777%2C4177.6486%2C2725.5556)

Ritter C. (1885) Sur quelques changements dans la disposition et les procédés de tarage des instruments de jaugeage et dans le mode de calcul des débits – Annales des Ponts et Chaussées p. 1058   1179.

Sentenac G. (1921) La station de tarage des moulinets des Ponts-Jumeaux   Toulouse.