



HAL
open science

Etude de l'efficacité mécanique d'une vis hydrodynamique

Florent Casasola, Thomas Weisser, Raphaël Dupuis, Evelyne Aubry, David Vermelle

► **To cite this version:**

Florent Casasola, Thomas Weisser, Raphaël Dupuis, Evelyne Aubry, David Vermelle. Etude de l'efficacité mécanique d'une vis hydrodynamique. CFM 2015 - 22ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2015, Lyon, France. hal-03445062

HAL Id: hal-03445062

<https://hal.science/hal-03445062v1>

Submitted on 23 Nov 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Étude de l'efficacité mécanique d'une vis hydrodynamique

F. CASASOLA^a, T. WEISSER^a, R. DUPUIS^a, E. AUBRY^a,
D. VERMELLE^b

a. Laboratoire MIPS, Université de Haute-Alsace,
12 rue des frères Lumière, 68093 Mulhouse, France, florent.casasola@uha.fr

b. NSC environnement,
170 rue de la République, 68500 Guebwiller, France, david.vermelle@nsc.fr

Résumé:

L'objectif de cet article est d'évaluer l'efficacité mécanique d'une vis hydrodynamique, dont le but est de convertir une puissance hydraulique en puissance électrique. Dans un premier temps, un modèle théorique issu de la littérature est présenté et implémenté afin d'étudier l'influence des différents paramètres d'un tel système sur son efficacité. Dans un second temps, une maquette à l'échelle 1/5 et son instrumentation sont présentées. Les résultats obtenus suite à une série d'essais permettent de recalibrer certains paramètres empiriques du modèle et d'effectuer une première comparaison entre efficacités réelles et théoriques.

Abstract:

The aim of this paper is to assess the mechanical efficiency of a hydrodynamic screw, aiming to convert hydraulic power into electric one. At first, a theoretical model based on the literature is presented and implemented in order to study the influence of the various system parameters on its efficiency. Then, a 1:5-scale model test and the dedicated instrumentation setup are introduced. A set of measurements is performed and the obtained results are used to update some empirical parameters of the model. Finally, both theoretical and experimental efficiencies are compared and discussed.

Mots clefs : énergie, vis d'Archimède, hydrodynamique, modélisation mécanique

1 Introduction

1.1 Contexte

La France entame une transition énergétique. Dans ce cadre et en s'appuyant sur le constat d'une faible exploitation des sites hydrauliques de puissance inférieures à 200kW, la société

NSC Environnement tend à développer des activités concernant les turbines de type vis hydrodynamique. Les enjeux associés sont principalement la réduction des coûts de fabrication et de maintenance [1] ainsi que le respect de l'environnement.

D'un point de vue historique, le premier système de vis hydrodynamique a été réalisé par l'ingénieur français Pattu en 1815 [2]. Il consistait à transposer en mode turbine le principe de la vis d'Archimède, initialement conçue comme une pompe de relevage entre deux canaux de faibles dénivelés [2]. Les études menées par la suite sur ce dispositif, comme par exemple le calcul du volume d'une chambre en fonction des paramètres géométriques, ainsi que celui de la vitesse de rotation garantissant un remplissage optimal [3], ont servi de base aux travaux antérieurs de modélisation en mode turbine. Ces études, plus récentes, ont été popularisées en 1992 suite au brevet de l'ingénieur allemand K.A. Radlik [4] qui estime, pour la première fois, l'efficacité d'une vis hydrodynamique de l'ordre de 80%. Puis, d'importants travaux expérimentaux ont permis à Nagel *et al.* de proposer des modèles empiriques permettant d'évaluer les pertes entre l'auge et la vis, qui tendent à diminuer son efficacité de 15 à 30%.

Depuis le début des années 2000, de nouvelles études théoriques ont cherché à développer des modèles mécaniques plus complets de vis hydrodynamiques. Dans un premier temps, Rorres [6] et Nuernbergk [8] se sont intéressés à l'estimation du volume d'eau optimal dans une chambre en fonction du niveau d'eau en amont du système. En parallèle, Nuernbergk a effectué une étude poussée de l'ensemble du système de conversion d'énergie (aspects hydrauliques, mécaniques et électriques), s'intéressant notamment aux phénomènes de surverse et en proposant un modèle semi-empirique [7]. Enfin, Lubitz *et al.* ont établi un modèle basé sur le taux de remplissage d'une chambre [10] et prenant en compte les phénomènes de pertes entre l'auge et la vis et par surverse [9] : cette approche est brièvement décrite dans la section 2 et sert de base à ces travaux.

1.2 Description dispositif

La figure 1 présente le schéma d'une vis hydrodynamique ainsi que les différents paramètres géométriques et environnementaux du système, utilisés dans le modèle théorique. Les valeurs numériques données correspondent à celles retenues lors de la conception de la maquette, présentée section 3.

Paramètres	Valeurs
Débit : Q_T	0-0,04 m ³ /s
Hauteur : h	1,582 m
Inclinaison : β	21,5 °
Pas : P	0,481 m
Longueur de vis : L	1,685 m
Nombre de filets : N	3
Diamètre intérieur : d	0,270 m
Diamètre extérieur : D	0,491 m

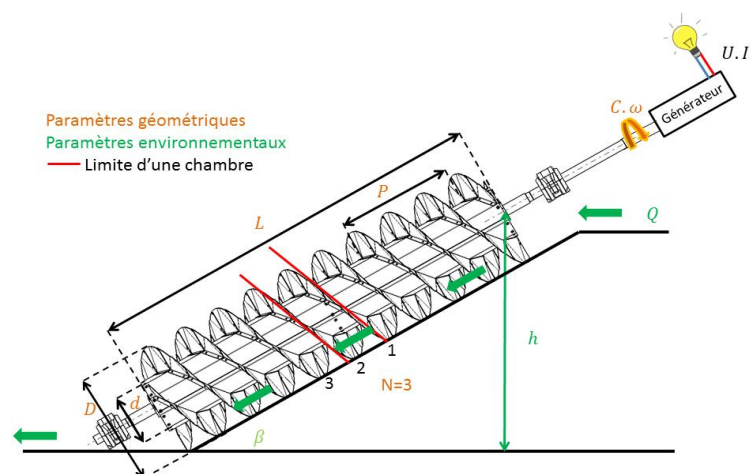


Figure 1 : Schéma d'une vis hydrodynamique et définition des paramètres.

On indique que la notion de chambre est définie comme le volume disponible entre deux filets consécutifs en un tour de vis.

2 Modèlemécanique

2.1 Formulation théorique

On présente ici, de manière succincte, le calcul permettant d'estimer théoriquement l'efficacité de la vis hydrodynamique, notée η . Cette quantité est définie comme le rapport entre la puissance mécanique et la puissance hydraulique :

$$\eta = \frac{P_{mecanique}}{P_{hydraulique}} = \frac{C_T \cdot \omega}{\rho \cdot g \cdot Q_T \cdot h}, \text{ avec : } h = L \cdot \sin(\beta) \quad (1)$$

La puissance hydraulique étant la puissance fournie au système, l'amélioration de l'efficacité nécessite donc de maximiser la puissance mécanique. D'après les travaux de Lubitzet *al.*, celle-ci est égale au produit de la vitesse de rotation ω de la vis par le couple total C_T qu'elle génère :

$$C_T = \frac{C \cdot N \cdot L}{P} \quad (2)$$

où N , L , P sont les paramètres géométriques de la vis et C est le couple développé par une pale. Ce couple est calculé par intégration d'un couple élémentaire, représentant la différence de pression amont/aval s'exerçant sur la surface immergée d'une pale, entre deux chambres. On souligne que ce calcul dépend du niveau d'eau présent dans une chambre, exprimé à l'aide du facteur de remplissage f , tel que :

$$f = \frac{z_{ne} - z_{min}}{z_{max} - z_{min}} \quad (3)$$

où z_{ne} correspond au niveau d'eau dans une chambre, z_{min} au niveau d'eau minimum dans une chambre (pour $f = 0$) et z_{max} au niveau d'eau maximum dans une chambre (pour $f = 1$). Parallèlement, afin de déterminer la puissance hydraulique, il est nécessaire de connaître le débit total s'écoulant à travers la vis. Celui-ci peut se décomposer comme la somme d'un débit utile et de différents débits de pertes :

$$Q_T = Q_U + Q_J + Q_S + Q_P + Q_F \quad (4)$$

où :

- Q_U correspond au débit utile, générant effectivement la rotation de la vis, défini par:

$$Q_U = \frac{V \cdot N \cdot \omega}{2 \cdot \pi} \quad (5)$$

avec V représentant le volume d'eau contenu dans une chambre (obtenu par intégration, en fonction du facteur de remplissage) ;

- Q_J représente les pertes dues au jeu entre l'auge et la vis, défini par [5] :

$$Q_J = c \cdot j \cdot l_{ne} \cdot \sqrt{\frac{2gP}{N}} \sin \beta \quad (6)$$

avec c représentant le coefficient de déverse, j le jeu entre l'auge et la vis et l_{ne} la longueur du contour mouillé de la vis (fonction du facteur de remplissage) ;

- Q_S représente les pertes par surverse (lorsque $f > 1$) [7] ;
- Q_P représente les pertes par projection (liées aux fortes vitesses de rotation) ;
- Q_F représente les pertes par frottements (frottements visqueux s'exerçant sur l'auge et la vis et frottements secs liés aux roulements des paliers).

On note dans la littérature que Q_P est généralement considéré comme étant négligeable par rapport à Q_J et Q_S , et qu'il peut être fortement réduit par l'ajout de déflecteur le long de l'auge. De plus, le modèle actuel ne permet pas de prendre en compte Q_F .

2.2 Étude numérique

L'ensemble du modèle présenté ci-dessus a été implémenté afin d'évaluer, *a priori*, l'efficacité mécanique d'un système ayant des dimensions identiques à celles de la maquette présentée, figure 1.

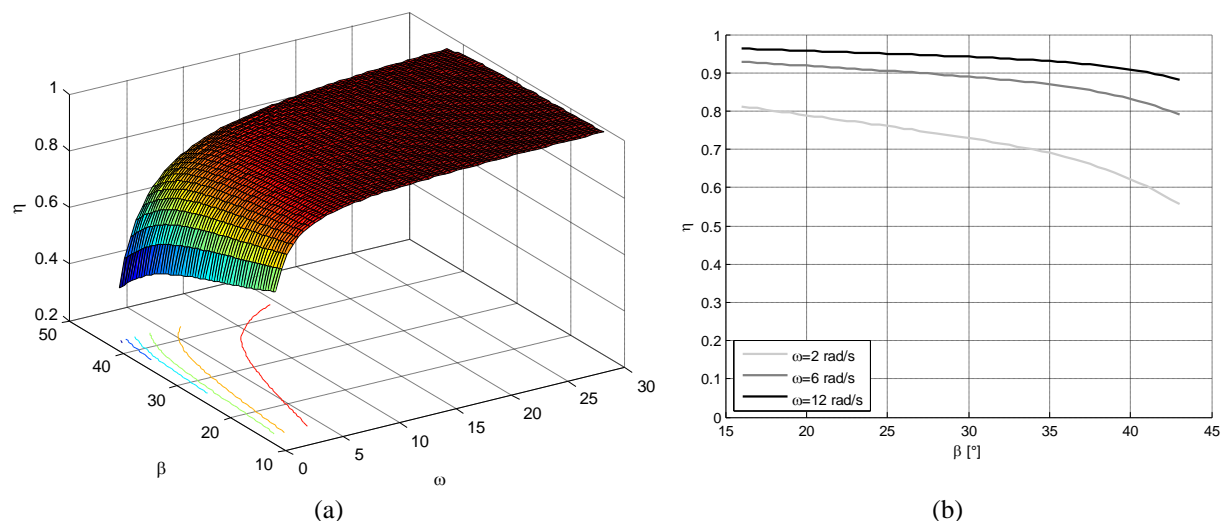


Figure 2: (a) Efficacité mécanique de la vis en fonction de l'angle d'inclinaison et de la vitesse de rotation ; (b) Coupes à vitesse de rotation données.

On s'intéresse tout d'abord à l'influence de l'angle d'inclinaison de la vis, qui varie habituellement entre 15° et 43° , et de la vitesse de rotation. On observe figure 2 (a), pour un facteur de remplissage optimal ($f = 1$), que plus l'inclinaison est importante, plus l'efficacité est constante en fonction de la vitesse, en particulier à partir de $\beta = 30^\circ$. On souligne que ce résultat se vérifie dans la pratique : cet angle optimal permet également d'obtenir un bon compromis vis-à-vis de la longueur de la vis, limitant ainsi son coût [1]. La figure 2 (b) montre différentes coupes pour les vitesses délimitant la zone de fonctionnement de la maquette (valeurs minimale, moyenne et maximale). Or, expérimentalement (*cf.* section 3), il est actuellement impossible de contrôler la vitesse de rotation, celle-ci étant directement liée au débit d'entrée et donc au facteur de remplissage.

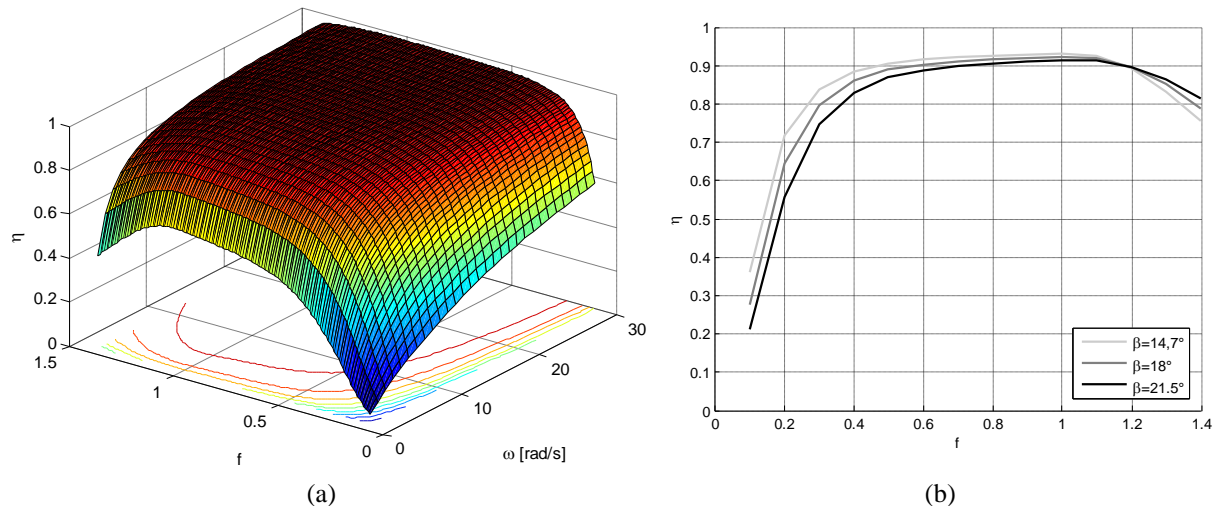


Figure 3 : (a) Efficacité mécanique de la vis en fonction et de la vitesse de rotation ;
(b) Coupes à inclinaisons données.

On visualise alors, figure 3 (a), l'efficacité mécanique en fonction du facteur de remplissage et de la vitesse de rotation pour un angle de $21,5^\circ$, tel que défini figure 1. On observe que l'efficacité maximale est obtenue lorsque le facteur de remplissage est égal à 1 et que la vitesse de rotation est élevée. La figure 3 (b) représente des coupes à inclinaisons données (valeurs minimale, moyenne et maximale accessibles sur la maquette) pour une vitesse de rotation moyenne de 6 rad/s. On constate que pour de faibles facteurs de remplissage, l'efficacité est très faible en raison de la prépondérance des pertes par fuite entre l'auge et la vis. Un plateau de fonctionnement optimal apparaît ensuite pour $f = 0,4 - 1,1$. Le débit utile représente alors la majeure partie du débit d'entrée. Enfin, lorsque le facteur de remplissage est supérieur à 1, les pertes par surverse tendent à impacter fortement l'efficacité.

L'étape suivante de cette étude vise à valider expérimentalement les tendances observées ci-dessus. Pour cela, il est en particulier nécessaire d'estimer le facteur de remplissage en fonction du débit d'entrée.

3 Etude expérimentale

3.1 Dispositif expérimental

Le banc d'essai présenté figure 4 se compose d'un bac aval contenant l'ensemble du volume d'eau de l'installation. Différents débits, notés $Q_{pompe\ active}$, sont générés par la mise sous tension progressive de 10 pompes installées dans le bac aval, d'une capacité de 4 L/s chacune. On vérifie qu'elle fournisse un débit de relevage de 3,15 L/s sur la hauteur de l'installation. Une vanne quart de tour fixée sur une pompe permet d'affiner la plage de variation du débit. Une grille placée au centre du bac amont rend le flux laminaire en entrée de vis.

Au fur et à mesure que le bac amont se remplit, l'eau s'écoule dans le système mettant ainsi en rotation la vis. La puissance mécanique développée par celle-ci est alors transmise par une courroie crantée à un multiplicateur de vitesse de rapport 3,71. Le couplemètre installé entre la sortie du multiplicateur et la génératrice permet de mesurer le couple associé, noté C_{exp} , en délivrant un signal

analogique proportionnel, compris entre 0-5 V. La génératrice comporte un codeur incrémental afin de mesurer la vitesse de rotation, notée ω_{exp} . L'ensemble de ces grandeurs est enregistré via une centrale d'acquisition N.I. USB 6356.

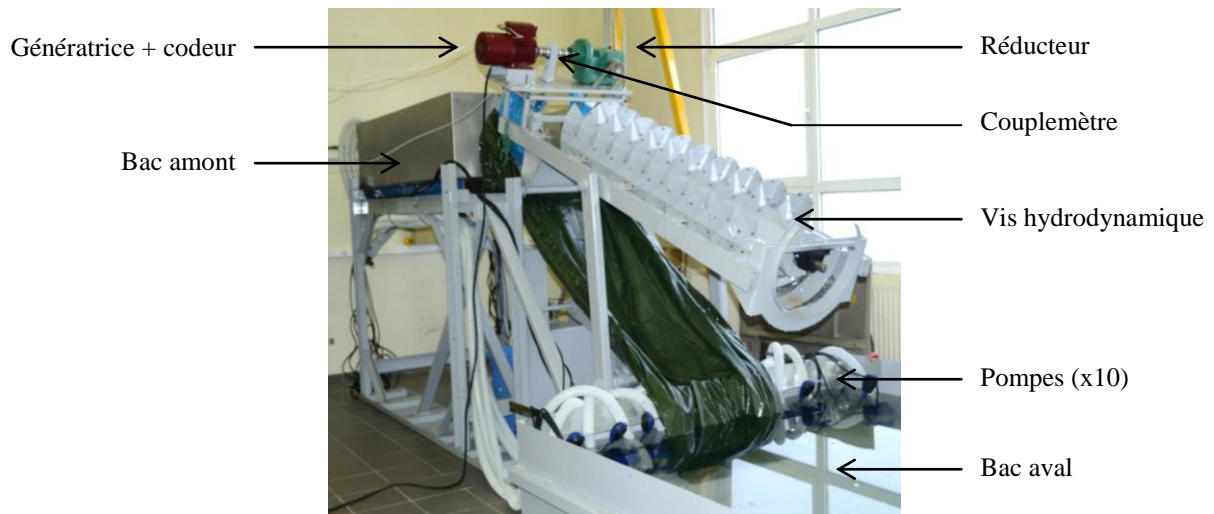


Figure 3: Banc d'essai (échelle 1/5)

3.2 Corrélation calculs /essais

Comme introduit initialement, on estime l'efficacité mécanique de la vis de la manière suivante :

$$\eta_{exp} = \frac{C_{exp} \cdot \omega_{exp}}{\rho \cdot g \cdot Q_{pompe\ active} \cdot L \cdot \sin\beta} \quad (7)$$

Les efficacités ainsi mesurées en fonction du nombre de pompes actives, peuvent ensuite être comparées à celles obtenues à l'aide de l'équation (1). Or, on souligne que l'état actuel de la maquette ne permet pas de contrôler indépendamment sa vitesse de rotation. Par conséquent, une étape préliminaire est nécessaire afin de déterminer l'évolution du facteur de remplissage en fonction du débit d'entrée. Une caméra rapide, disposée parallèlement à l'auge transparente de la vis, a permis de filmer le niveau de remplissage des chambres pour un débit fixé. Des clichés photographiques, comparables à la figure 5 (a), ont été extraits à des instants particuliers afin d'estimer le facteur de remplissage en fonction du débit total, à l'aide de l'équation (3). Ainsi, pour deux pompes actives, on estime un facteur de remplissage égal à 0,35 et, pour l'ensemble des débits réalisables, compris entre 0,3 et 0,7.

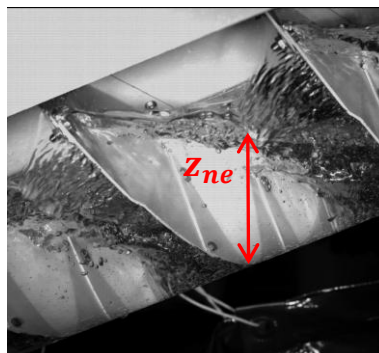


Figure 4: Niveau d'eau dans une chambre pour deux pompes actives.

De plus, au regard de l'expression du modèle de pertes par fuite entre l'auge et la vis donné équation (6), il est nécessaire d'en recalculer les paramètres empiriques afin d'estimer au mieux le débit associé. Le jeu j entre l'auge et la vis a été mesuré à 0,008 m à la verticale de l'axe de la vis (cette grandeur varie cependant de +/- 0,002 m sur la circonférence de l'auge). Pour déterminer le coefficient de déverse c , une série de tests à rotor bloqué a été effectuée : pour un débit d'entrée donné, donc un facteur de remplissage donné, le débit de sortie est dans ce cas égal au débit de fuite.

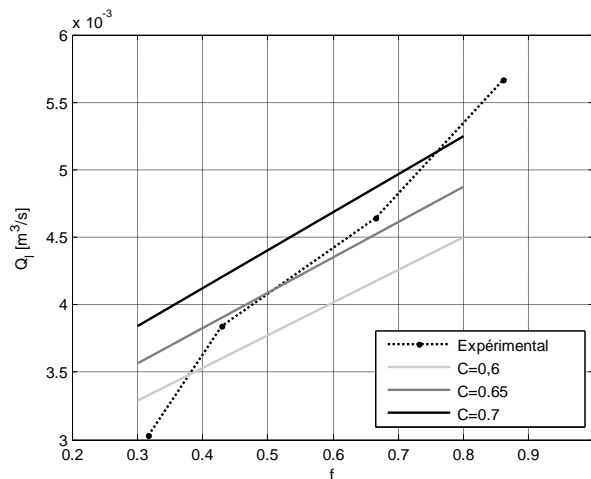


Figure 5: Débit de fuite entre l'auge et la vis en fonction du facteur de remplissage.

La figure 6 montre les résultats obtenus. On constate que si la courbe expérimentale ne suit pas tout à fait la tendance du modèle théorique, elle peut être identifiée à un coefficient $c = 0,65$ pour des facteurs de remplissage compris entre 0,3 et 0,7, observés lors du fonctionnement normal de la vis.

On peut maintenant obtenir l'efficacité théorique dans les conditions d'utilisation de la maquette. On observe, figure 7, que les courbes théoriques et expérimentales décrivent la même tendance. L'erreur relative est plus faible pour de faibles valeurs du facteur de remplissage, ce qui illustre à nouveau la prépondérance des pertes par fuite, dont le modèle a été recalculé, dans cette plage de fonctionnement. Par la suite, l'erreur s'accroît entre 30-40%. Cela pourrait provenir : d'une sous-estimation du débit de fuite (erreur d'estimation de f et/ou choix de c) et de l'absence de prise en compte des différentes forces de frottements dans le modèle théorique.

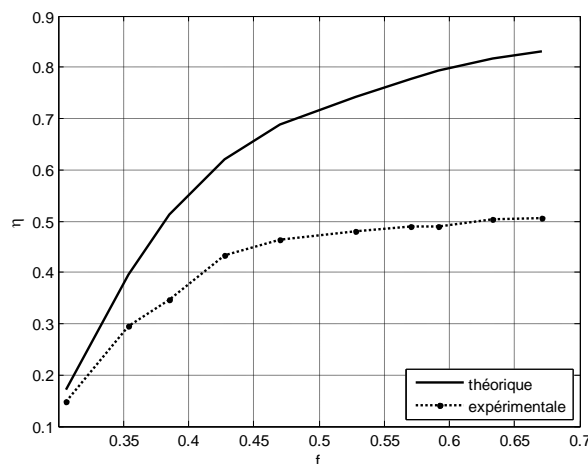


Figure 6: Efficacité théorique et expérimentale en fonction du facteur de remplissage.

4 Conclusion

Les travaux proposés dans cet article se rapportent à l'étude de l'efficacité mécanique d'une vis hydrodynamique. Dans un premier temps, un modèle théorique issu de la littérature a été implémenté, s'appuyant sur les paramètres géométriques du système. Les simulations réalisées ont permis de retrouver certaines règles de conception couramment utilisées : inclinaison optimale à 30°, importance du remplissage des chambres ($f = 1$). Dans un second temps, une maquette expérimentale à l'échelle 1/5 a été instrumentée. De nombreux tests ont été réalisés afin d'obtenir l'évolution de l'efficacité mécanique en fonction du facteur de remplissage. Un intérêt particulier a été porté au recalage du modèle de pertes par fuite, dont le débit associé est relativement important pour les vitesses de rotation observées expérimentalement. Si les résultats obtenus montrent une même tendance, une erreur importante subsiste : des travaux en cours visent à introduire des pertes par frottement dans le modèle. Enfin, un plan d'expériences expérimental est prévu afin d'étudier l'influence des paramètres géométriques (angle d'inclinaison, nombre de filets, jeu entre l'auge et la vis) sur l'efficacité.

Remerciements

Les auteurs remercient la société *NSC environnement* pour la conception et la réalisation de la vis hydrodynamique du banc d'essai ainsi que les retours d'expérience concernant les sites de Guebwiller et de Baldersheim (Alsace).

Références

- [1] A.Lashofer, I.Kampel, W.Hawle, B.Pelikan, F.Kaltenberger, State of technology and design guidelines for the Archimedes screw turbine. Technical report, Institute of Water Management Hydrology and Hydraulic Engineering, 2012.
- [2] C.F.Champetier, La vis d'Archimède de l'irrigation antique à l'énergie moderne. Rapport technique, Comité de rédaction, Association Hydraulois, 2013.
- [3] J. Muysken, Berekening van het nuttig effect van de vijzel, *De Ingenieur*, 1932, 21: 77-94.
- [4] K.A. Radlik, Brevet DE413914C2, 1992.
- [5] G. Nagel, K.A. Radlik, *Wasserpumpen: Planung, Bau und Betrieb von Wasserhebeanlagen*, Pfriemer (ed.), 1988.
- [6] C.Rorres, The turn of screw: Optimal design of an Archimedes screw. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, 126(1) :72–80.
- [7] D.M. Nuernbergk, *Wasserpumpen*, Verlag Moritz Schäfer (ed.), Detmold, 2012.
- [8] D.M. Nuernbergk, C.Rorres, Analytical model for water inflow of an Archimedes screw used in hydropower generation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 139(2) : 213-220.
- [9] W.D. Lubitz, Gap flow in Archimedes screws. In *Proceedings of The Canadian Society for Mechanical Engineering International Congress*, 2014.
- [10] W.D. Lubitz, M.Lyons, S.Simmons, Performance model of Archimedes screw hydro turbines with variable fill level. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 140(10) :04014050.