
Optimisation d'une vis d'Archimède pour la production d'énergie dans les microcentrales hydroélectriques

Guilhem DELLINGER¹, Abdelali TERFOUS², Abdellah GHENAIM³, Pierre-André Garambois⁴

¹ 24, boulevard de la Victoire 67084, Strasbourg, INSA de Strasbourg, ICUBE - Mécanique des Fluides, guilhem.dellinger@insa-strasbourg.fr

² 24, boulevard de la Victoire 67084, Strasbourg, INSA de Strasbourg, ICUBE - Mécanique des Fluides, abdelali.terfous@insa-strasbourg.fr

³ 24, boulevard de la Victoire 67084, Strasbourg, INSA de Strasbourg, ICUBE - Mécanique des Fluides, abdellah.ghenaim@insa-strasbourg.fr

⁴ 24, boulevard de la Victoire 67084, Strasbourg, INSA de Strasbourg, ICUBE - Mécanique des Fluides, pierre-andre.garambois@insa-strasbourg.fr

Prix Jeunes Chercheurs « René Houpert »

RÉSUMÉ. L'utilisation de la vis d'Archimède dans les micro-centrales hydroélectriques est un moyen de production d'énergie renouvelable récent et en voie de développement. Elle est principalement utilisée pour exploiter les chutes d'eau de faibles débits et de faibles hauteurs. Nous proposons dans cet article d'étudier expérimentalement les performances de ce type de turbine en fonction des paramètres hydrauliques et géométriques. Une première partie montre l'influence du niveau d'eau en aval de la vis sur les performances de la turbine. Les rendements et les couples sont ensuite mesurés expérimentalement en fonction de la vitesse de rotation de la vis à débit fixe puis, en fonction du débit à vitesse de rotation fixe. Les résultats obtenus donnent des informations essentielles sur la conception de ce type de micro-centrale.

ABSTRACT. The Archimedean screw turbine is an innovative environmentally way to produce energy. It is used for low flow and low head. In this article, we propose an experimental study of the turbine performances depending on the geometric and hydraulic parameters. A first part deals with the downstream level impact on the screw performances. Then, the mechanical efficiency and the torque provided by the screw are measured depending on the rotationnal speed of the screw for a fixed flowrate, and conversely, function of the flowrate for a fixed rotation speed. Finally, these experimental results give some insights on the design of a micro-hydroelectric plant.

MOTS-CLÉS : Mécanique des fluides, Energie renouvelable, Microcentrale hydroélectrique, Vis d'Archimède, Expérimentation

KEYWORDS: Fluid mechanics, Renewable Energy, Micro-hydroelectric plant, Archimedean screw, Experimentation

1. Introduction

Le principe de la vis d'Archimède est connu depuis plus de 2000 ans. Bien que cela soit contesté par de nombreux historiens, on attribue généralement l'invention de cette vis à Archimède de Syracuse (287-212 avant J-C). C'est à partir du 14^{ème} siècle qu'on a commencé à utiliser la vis d'Archimède pour élever de grandes quantités d'eau sur de faibles hauteurs. Aujourd'hui, on l'utilise encore couramment pour l'élévation des eaux usées dans les stations d'épuration par exemple. Ce n'est qu'en 1992 que Karl-August Radlik propose pour la première fois l'utilisation de la vis d'Archimède, ou vis hydrodynamique, en tant que turbine afin de produire de l'énergie [RAD 97]. La première micro-centrale à vis d'Archimède en milieu naturel est ensuite installée en 1997 sur la rivière Eger à Aufhausen (Allemagne) et développe une puissance de 4 kW. Il existe maintenant plus de 180 installations de ce genre à travers l'Europe et plus de 400 à travers le monde [LAS 11].

D'après Williamson et al. [WIL 14] ces micro centrales ont un potentiel élevé sur les chutes d'eau de faibles hauteurs et de faibles débits. La hauteur maximale est d'environ 10 m et le débit peut atteindre les $10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. La centrale la plus puissante installée à ce jour se trouve sur le canal Albert (Belgique) et développe une puissance de 400 kW. Parmi les principaux avantages de ce type de centrale, on retiendra, en premier lieu, sa capacité à garder un rendement élevé malgré les fluctuations du débit. Ainsi, le débit peut varier de plus ou moins 20 % autour du débit nominal sans que cela n'ait d'impact sur le rendement [BRA 93]. Une étude récente menée sur 70 micro centrales en Europe a montré que le rendement moyen de l'ensemble de ces installations était de 69 % avec un maximal de 75 % [LAS 12]. Deux autres qualités importantes sont sa robustesse et le fait que ce soit une installation dite ichtyophile. En effet, d'après une étude menée par Kiebel et al. [KIE 09], pour les vitesses de rotations généralement utilisées et pour des poissons de taille inférieure à 1 m, ces derniers peuvent traverser la micro centrale sans être blessés.

L'utilisation de la vis hydrodynamique pour la production d'énergie est une technologie récente qui ne cesse de se développer. Malgré cela, la littérature à propos de la vis d'Archimède utilisée pour la production d'énergie est toujours insuffisante pour la conception réellement optimisée d'une micro centrale. Dans ce contexte, on se propose ici d'étudier expérimentalement les performances hydrauliques de la vis d'Archimède pour des paramètres géométriques et des conditions hydrauliques de fonctionnement différents. Ces résultats expérimentaux sont obtenus à l'aide d'un dispositif expérimental installé à l'INSA de Strasbourg. Les résultats obtenus permettront de comprendre l'influence de chaque paramètres et donc, par la suite, de pouvoir optimiser les performances de la vis d'Archimède.

2. Définition et principe de fonctionnement

Une micro-centrale à vis d'Archimède est constituée d'une vis tournant à l'intérieur d'une auge ouverte et fixe. L'énergie potentielle du fluide qui s'écoule à travers l'installation est transformée en énergie mécanique grâce à la rotation de la vis. Cette énergie mécanique est ensuite transformée en électricité à l'aide d'une génératrice. La puissance fournie par ce type de micro centrale est donnée par l'équation suivante :

$$P_{centrale} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot \eta_{centrale} \quad [1]$$

avec $P_{centrale}$ la puissance en W, ρ la masse volumique de l'eau kg/m^3 , Q le débit en m^3/s , H la hauteur de chute en m et $\eta_{centrale}$ le rendement de la centrale.

Le rendement de l'installation est directement fonction du rendement de la génératrice ainsi que du rendement hydraulique de la vis. Ce dernier est directement fonction des différentes pertes de charge qu'il peut y avoir au sein de la micro centrale. Les principales pertes de charge, qui se transforment en pertes de puissance, sont dues aux débits de fuites ainsi qu'aux frottements dus à la viscosité du fluide. Il est donc important de minimiser ces pertes afin d'obtenir un rendement maximal.

Les principales caractéristiques d'une micro centrale à vis d'Archimède sont donc la hauteur de chute H , le débit Q traversant l'installation, la vitesse de rotation n de la vis et le rendement $\eta_{centrale}$. Le rendement de la centrale est donnée par :

$$\eta_{centrale} = \eta_{vis} \cdot \eta_{generatrice} \quad [2]$$

avec η_{vis} le rendement hydraulique de la vis et $\eta_{generatrice}$ le rendement de la génératrice.

Les paramètres géométriques de la vis, représentés dans la figure 1, sont :

- Rayon extérieur : R_a
- Rayon intérieur : R_i
- Pas de vis : S
- Longueur totale : L
- Longueur filetée : L_b
- Nombre de filets : N
- Angle d'inclinaison : β

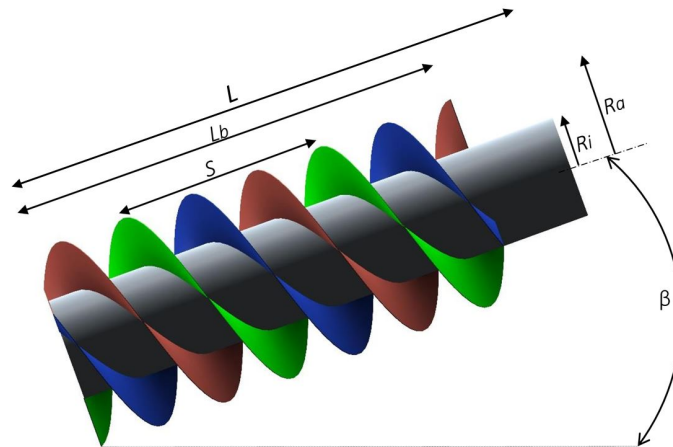


Figure 1. Représentation des paramètres géométriques d'une vis d'Archimède.

Nous utilisons la définition donnée par Rorres [ROR 00] de la poche d'eau emprisonnée entre deux spires successives dont le volume est égal à V_B . Puis, nous donnons le point de remplissage optimal de la vis qui est atteint lorsque le niveau d'eau à l'intérieur d'une poche d'eau supérieure est à la limite de déborder dans la poche qui lui est inférieure.

En négligeant les différentes fuites, le débit qui traverse la vis est égal au volume d'eau évacué en un tour de vis multiplié par la vitesse de rotation. On donne le débit nominal Q_{nom} égal à :

$$Q_{nom} = N.V_B.n/60 \quad [3]$$

avec Q_{nom} le débit en $m^3.s^{-1}$, N le nombre de filets, V_B le volume de la poche d'eau en m^3 et n la vitesse de rotation en $tr.min^{-1}$.

La vitesse de rotation nominal n_{nom} est alors égal à :

$$n_{nom} = Q_{nom}.60/(N.V_B) \quad [4]$$

avec n_{nom} en $tr.min^{-1}$.

Dans nos recherches, nous nous intéressons uniquement à l'évolution du rendement hydraulique de la vis η_{vis} . De plus, les résultats expérimentaux seront exprimés en fonction du débit nominal Q_{nom} ou de la vitesse de rotation nominal n_{nom} .

3. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental nous permet de faire varier le débit d'entrée, l'inclinaison de la vis, la vitesse de rotation de la vis et le niveau d'eau en aval de la vis. L'ensemble des paramètres géométriques et des conditions hydrauliques de fonctionnement de l'installation sont présentés dans le tableau 1 et dans la figure 2. La géométrie de la turbine a été choisie afin d'avoir une similitude géométrique directe avec les vis utilisées dans les micro-centrales. Le débit étant limité par le système de pompage, la gamme de vitesse de rotation a été déterminée afin de pouvoir tester la vis d'Archimède fonctionnant en sous-remplissage, au remplissage optimal et en sur-remplissage. Enfin, le niveau d'eau aval maximal permet de noyer complètement l'extrémité de la vis.

La vis d'Archimède a été imprimée en ABS à l'aide d'une imprimante 3D. La vis est directement accouplé à un moteur à courant continu *Maxon*. La vitesse de rotation de la vis est contrôlé par le moteur en l'utilisant comme

Tableau 1. Paramètres géométriques et hydrauliques du dispositif expérimental.

Paramètres géométriques	Rayon extérieur de la vis R_a (m)	0,096
	Rayon intérieur de la vis R_i (m)	0,052
	Pas de vis S (m)	0,192
	Longueur filetée de la vis L_B (m)	0,4
	Nombre de filets de la vis N	3
	Inclinaison β ($^\circ$)	18 ... 30
Conditions hydrauliques	Vitesse de rotation n ($tr.min^{-1}$)	60 ... 180
	Débit Q ($m^3.s^{-1}$)	0,001 ... 0,004
	Niveau d'eau aval h_{out} (cm)	0 ... 25

un frein. Ainsi, la vitesse de rotation est proportionnelle à la tension mesurée aux bornes du moteur et le couple à l'intensité.

L'eau est pompée à l'entrée du dispositif à l'aide d'une pompe centrifuge. Par la suite, le fluide s'écoule à travers la vis et la pression hydrostatique appliquée par l'eau sur les pales de la vis l'entraîne en rotation. Finalement, le fluide s'échappe par la sortie. Le niveau d'eau en amont de la vis peut être contrôlé à l'aide d'un seuil dont la hauteur est ajustable. Le débit traversant le dispositif est mesuré à l'aide d'une débitmètre magnétique. Les niveaux d'eau amont et aval sont mesurés à l'aide de réglettes graduées.

La puissance produite par la vis est alors déterminée par :

$$P_{vis} = C_{vis} \cdot \omega \quad [5]$$

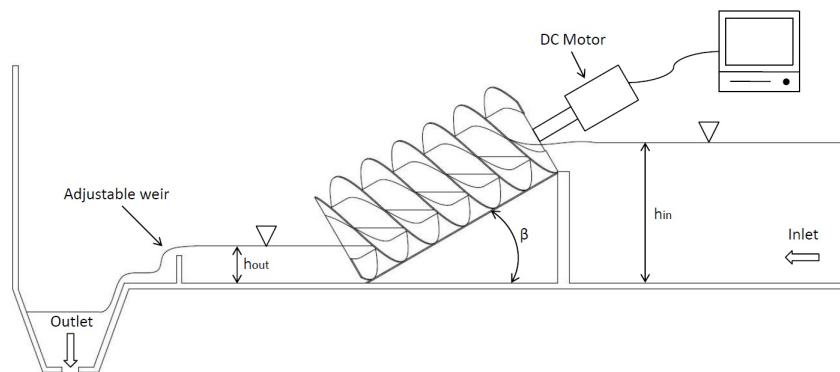
avec P_{vis} la puissance en W , C_{vis} le couple en $N.m$ et $\omega = 2\pi.n/60$ la vitesse de rotation en $rad.s^{-1}$.

Le couple fourni par la vis est égal à :

$$C_{vis} = C_{moteur} + C_{frottement} \quad [6]$$

avec C_{moteur} le couple fourni par le moteur et $C_{frottement}$ le couple dû aux frottements au niveau des paliers. Pour avoir le couple fourni par la vis, il est donc nécessaire de connaître le couple dû aux frottements $C_{frottement}$. Pour ce faire, nous mesurons le couple nécessaire pour entraîner la vis en rotation à vide. Il est apparu que ce couple est fonction de la vitesse de rotation n de la vis. Nous obtenons finalement :

$$C_{frottement(n)} = 0,000171(n) + 0,04605 \quad [7]$$

**Figure 2.** Schéma du dispositif expérimental.

Le rendement de la turbine est alors égal à :

$$\eta = P_{vis} / P_{hydraulique} = (C_{vis} \cdot \omega) / (\rho \cdot g \cdot Q \cdot H) \quad [8]$$

avec $P_{hydraulique}$ la puissance hydraulique fournie par la chute d'eau en W .

Pour chaque point de fonctionnement, qui correspond à une condition hydraulique et une vitesse de rotation, nous enregistrons 1500 valeurs instantanées de couple et de vitesse de rotation. Ces mesures donnent alors un couple moyen et une vitesse moyenne. Ce sont donc ces moyennes qui sont utilisées par la suite pour déterminer le rendement. Ces mesures sont enregistrées et exploitées à l'aide du logiciel *Labview* couplé à une carte d'acquisition *NI USB 6008*.

4. Résultats et discussions

4.1. Influence du niveau aval

Dans cette partie, nous souhaitons observer l'influence du niveau h_{out} en aval de la vis sur les performances de cette dernière. Pour cela, nous définissons en premier lieu l'immersion I de la vis qui est donnée par :

$$I = h_{out} / (2 \cdot R_a \cdot \cos(\beta)) \quad [9]$$

Ainsi, pour $I = 0$, le niveau d'eau se trouve à l'extrémité basse de la vis. Par contre, pour $I = 1$, le bout de la vis est entièrement immergé. Différents niveaux d'immersion sont exposés dans la figure 3.

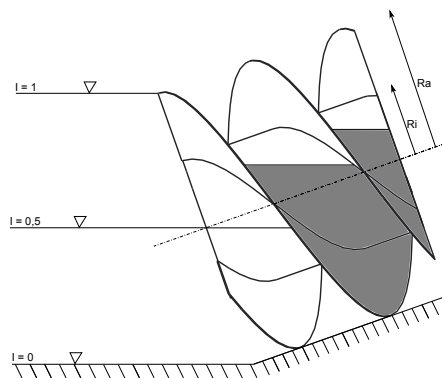


Figure 3. Représentation des niveaux d'eau avals pour $I = 0$, $I = 0,5$ et $I = 1$.

La figure 4 expose l'évolution du couple ainsi que du rendement de la vis en fonction du niveau d'eau en aval pour une inclinaison de $\beta = 28^\circ$. On peut voir, dans un premier temps, que plus l'immersion de la vis est grande, plus le couple sera faible. Cela s'explique par le fait que l'eau qui se trouve en aval de la vis exerce une pression sur la dernière pale ; ce qui va donc freiner la vis. Plus le niveau aval sera élevé, plus cette pression sera grande et, finalement, plus le couple sera faible.

Dans un second temps, on peut observer qu'il existe une valeur optimale de l'immersion I_{opt} qui correspond à un rendement maximal. En effet, on voit que le rendement augmente avec I jusqu'à une certaine immersion, puis, diminue à nouveau. Le niveau d'eau aval optimal correspond au niveau d'eau présent dans le dernier *bucket* moins la différence de niveau entre deux *bucket* consécutifs. En effet, quand le niveau d'eau est au-dessus de cette ligne, le fluide peut à nouveau rentrer dans la dernière poche d'eau et cela va alors diminuer les performances de la vis. Par ailleurs, quand le niveau h_{out} est au-dessous de cette ligne d'une distance x par exemple, le couple augmente. Par contre, la puissance hydraulique totale fournie par le fluide va, elle, augmenter de $\rho \cdot g \cdot Q \cdot x$. Malheureusement, le gain en puissance hydraulique est supérieur au gain en énergie mécanique. Sachant que nous avons le rendement défini par $\eta_{vis} = P_{vis} / P_{hyd}$, ce dernier va finalement diminuer.

Tableau 2. Immersion optimale en fonction de l'inclinaison de la vis.

Inclinaison - β	20°	24°	28°
I_{opt}	0,67	0,64	0,57

Le tableau 2 montre les valeurs du niveau d'immersion optimal I_{opt} en fonction de l'inclinaison de la vis. On remarque que ce niveau diminue légèrement lorsque l'angle d'inclinaison augmente. Cela est dû au fait que le

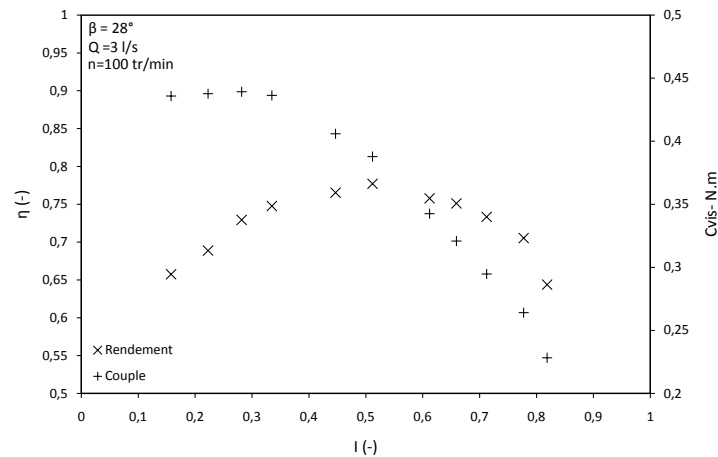


Figure 4. Evolution du rendement et du couple en fonction de son immersion I avec la représentation de l'immersion théorique optimale pour $\beta = 28^\circ$, $n = 100 \text{ tr} \cdot \text{min}^{-1}$ et $Q = 3 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$.

niveau d'eau présent dans la dernière poche d'eau est plus haut par rapport au fond du canal quand l'inclinaison augmente.

On notera que pour la suite des essais expérimentaux, on se place toujours au niveau d'eau aval optimal qui aura été déterminé préalablement.

4.2. Rendement en fonction de la vitesse de rotation à débit fixe

Dans le but d'obtenir des performances optimales, il est nécessaire de connaître la vitesse de rotation à imposer à la vis pour un débit donné. De plus, certaines microcentrales adaptent leur vitesse de rotation en fonction du débit entrant. On souhaite donc, ici, observer l'évolution des performances de la vis d'Archimède en fonction de sa vitesse de rotation pour un débit donné.

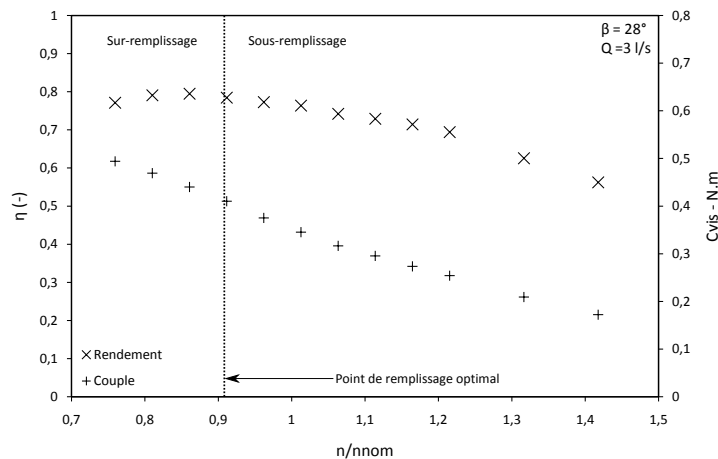


Figure 5. Evolution du rendement et du couple en fonction du rapport n/n_{nom} pour $\beta = 28^\circ$ et $Q = 3 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$.

La figure 5 expose le couple et le rendement expérimental en fonction du rapport n/n_{nom} pour une inclinaison de $\beta = 24^\circ$ et un débit de $Q = 3 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$. On peut voir que le rendement de la vis augmente avec n/n_{nom} jusqu'à un certain point puis, il diminue à nouveau. On remarque donc qu'il existe bien une vitesse de rotation optimale qui permet d'obtenir un rendement maximal. Dans notre cas, on obtient un rendement maximal proche de 84%. Cette valeur correspond bien avec les rendements maximaux supérieurs à 80% obtenus en laboratoire par Brada [BRA 93]. Cette augmentation puis diminution du rendement s'explique par le fait que lorsque la vitesse de rotation est trop faible, la vis est en sur-remplissage et il y a alors un débit de fuite par dessus l'âme centrale. A l'inverse,

lorsque la vitesse de rotation est trop élevée, la vis est en sous-remplissage et il y a d'importantes pertes par frottements entre l'eau et la vis.

On peut voir également que le couple diminue avec l'augmentation de n/n_{nom} . Cela s'explique par le fait que le remplissage de la vis diminue avec l'augmentation de la vitesse de rotation pour un débit fixe. La pression hydrostatique exercée par l'eau sur les pales est alors plus faible et il en est alors de même pour le couple.

4.3. Rendement en fonction du débit à vitesse de rotation fixe

Les microcentrales à vis d'Archimède sont installées dans des cours d'eau ou canaux, dont les débits peuvent fluctuer fortement tout au long de l'année. Il est donc important de connaître l'évolution des performances de ces turbines en fonction du débit qui les traverse. De plus, il sera alors possible de déterminer la puissance que l'on va pouvoir produire au cours d'une année. On souhaite donc, dans cette partie, observer l'évolution du rendement de la vis en fonction du débit Q pour une vitesse de rotation fixe.

La figure 6 montre l'évolution du couple et du rendement de la vis d'Archimède en fonction du rapport de débit Q/Q_{nom} pour une inclinaison de $\beta = 28^\circ$ et une vitesse de rotation de $n = 90 \text{ tr.min}^{-1}$. On peut voir que le rendement augmente rapidement jusqu'à ce que le rapport de débit soit environ égal à $Q/Q_{nom} = 0,8$. Puis, le rendement augmente très légèrement jusqu'à environ $Q/Q_{nom} = 1,1$. A partir de ce point, le rendement commence à diminuer. On voit ainsi que performances d'une vis d'Archimède ne sont que très peu influencées pour des débits compris entre 0,8 et 1,1 fois le débit nominal Q_{nom} de la vis. Cela correspond à nouveau avec les résultats trouvés dans littérature [BRA 93]. La forte diminution de rendement pour des valeurs des débits inférieurs à $0,8 \cdot Q_{nom}$ s'explique par le fait que la vis est en sous-remplissage. Les pertes par fuites entre l'auge et les pales vont alors avoir de plus en plus d'importance et donc, diminuer le rendement. Pour des débits supérieurs à 1,1 fois le débit nominal, la chute de rendement est due au fait que la vis est en sur-remplissage. C'est le débit de fuite par dessus l'âme centrale de la vis qui va fortement impacter le rendement.

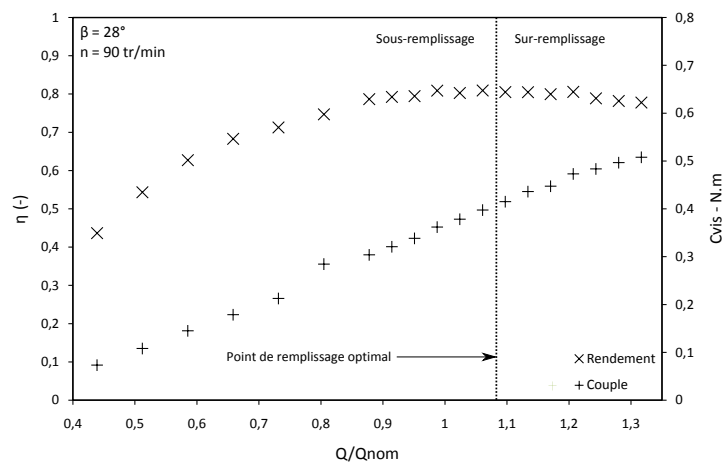


Figure 6. Evolution du rendement et du couple en fonction du rapport Q/Q_{nom} pour $\beta = 28^\circ$ et $n = 90 \text{ tr.min}^{-1}$.

On peut également observer sur la figure 6 l'évolution du couple en fonction du rapport de débit. On voit que le couple augmente avec l'augmentation du débit. Cela provient du fait que le remplissage des poches d'eau de la vis augmente avec le débit pour une vitesse de rotation donnée. La pression hydrostatique exercée par l'eau sur les pales de la vis est alors plus importante, et il en est finalement de même pour le couple axial.

5. Conclusion

Pour optimiser les performances des vis d'Archimède utilisée en tant que turbine, il est nécessaire de connaître et comprendre l'influence des différents paramètres géométriques et hydrauliques. Cet article a ainsi exposé les travaux de recherches portant sur l'étude expérimentale de la vis d'Archimède. L'influence du niveau d'eau en aval de la vis sur les performances de cette dernière a en premier lieu été exposé. Dans un second temps, les essais

expérimentaux ont été menés pour des vitesses de rotation de vis variables à débit fixe. Enfin, les essais ont été faits pour une vitesse de rotation fixe mais à débits variables.

En observant l'influence du niveau en aval de la vis sur ses performances, on a pu voir qu'il existe un niveau optimal pour lequel on obtient un rendement mécanique maximal. De plus, une mauvaise immersion de vis peut causer des pertes de rendement pouvant aller jusqu'à 25%. Ce niveau optimal est aussi fonction de l'inclinaison de la vis. Cette partie de l'étude expérimentale a finalement souligné l'importance de choisir une bonne immersion de vis lors de la conception d'une micro-centrale à vis d'Archimède afin de garder un rendement optimal.

L'étude des performances de la vis d'Archimède en fonction de sa vitesse de rotation a permis de mettre en évidence l'existence d'une vitesse optimale pour laquelle on obtient un rendement maximal. De plus, les performances chutent rapidement lorsque l'on s'éloigne de cette valeur. Ce dernier point montre l'avantage que peut avoir une micro-centrale à vitesse variable qui permettrait d'adapter la vitesse de rotation de la vis en fonction du débit en entrée.

Les expérimentations effectuées à débits variables mais à vitesse fixe ont montré que les vis d'Archimède, utilisées en tant que turbine, ont la capacité de garder un rendement élevé malgré des fortes fluctuations de débit. En effet, les performances ne sont que très peu impacté pour des débits compris entre 0,8 et 1,1 fois le débit nominal.

Finalement, ces premiers résultats expérimentaux ont permis de donner des informations primordiales sur l'influence des différents paramètres sur les performances de la vis d'Archimède utilisée en tant que turbine. De plus, les résultats obtenus corroborent ceux trouvés dans la littérature tout en y apportant des informations supplémentaires, notamment par rapport à l'influence du niveau aval sur les performances de la vis. Une prochaine étape, consiste à tester les performances sur de vis à géométries différentes et de plus grande échelle. En effet, ce ne sont pas forcément les mêmes phénomènes physiques qui sont responsables des principales pertes de charge au sein de la turbine suivant la taille de cette dernière. Dans un second temps, les résultats expérimentaux seront comparés à des résultats obtenus par simulation numérique.

6. Bibliographie

- [BRA 93] BRADA K., « Einaches Kleinkraftwerke mit Schnecken-turbine zur betrieblichen Stromerzeugung », *MM. Maschinenmarkt*, vol. 99, p. 30-32, 1993.
- [KIE 09] KIEBEL P., PIKE R., COE T., *The Archimedes screw turbine : Assesment of three leading edge profiles.*, Fishtek Consulting, 2009.
- [LAS 11] LASHOFER A., KALTENBERGER F., PELIKAN B., « Does the Archimedean Screw Turbine Stand the Test ? », *Wasserwirtschaft*, vol. 101, p. 76-81, 2011.
- [LAS 12] LASHOFER A., HAWLE W., KAMPEL I., KALTENBERGER F., PELIKAN B., *State of Technology and Design Guidelines for the Archimedes Screw Turbine*, Paper presented at the meeting of Hydro 2012, Bilbao, Spain., 2012.
- [RAD 97] RADLIK, *Wasserkraftschnecke zur Energieumwandlung [Hydrodynamic screw for energy conversion] DE NO. 4,139,134*, Google Patents, 1997.
- [ROR 00] RORRES C., « The Turn of the Screw : Optimal Design of an Archimedes Screw », *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 126, p. 72-80, 2000.
- [WIL 14] WILLIAMSON S., STARK B., BOOKER J., « Low head pico hydro turbine selection using a multi-criteria analysis. », *Renewable Energy*, vol. 61, p. 43-50, 2014.