

Caractérisation du premier prototype d'hydrolienne fluviale en Suisse

Ing. G. CARPENTIER
Dr C. MÜNCH-ALLIGNÉ
Ir V. KELNER
HELMo – Gramme – Liège
HES-SO – Valais/Wallis

Afin de parvenir à caractériser l'hydrolienne, une étude approfondie du site d'implantation a été réalisée. L'installation d'une série de capteurs nous ont fourni des mesures et des informations nécessaires au bon déroulement de l'étude. Le post-traitement et l'analyse de ces données ont permis de construire les courbes de performances de l'hydrolienne qui ont été comparées avec les simulations réalisées en amont et les résultats obtenus auparavant.

Mots clés : campagne de mesure, capteurs, caractérisation, énergie renouvelable, expérimental, fluvial, hydrolienne, prototype, réinstallation, Suisse.

In order to achieve the characterization of the river current turbine, an in-depth study of the implantation site was carried out. Installing a series of sensors allowed us to measure the information required to characterize the machine. Finally, the post-processing and analysis of these data allowed us to build the performance curves of the river current turbine. Those will be compared with the simulations and results obtained previously.

Keywords: characterization, experimental, installation, kinetic, measurement campaign, prototype, renewable energy, river current turbine, sensors, Switzerland

1. Introduction

Un premier prototype d'hydrolienne fluviale en Suisse a vu le jour au sein du groupe de recherche en hydroélectricité de l'école d'ingénieur de la HES-SO Valais/Wallis en Suisse. Le but de ce projet est de concevoir une machine capable de récupérer le potentiel résiduel des infrastructures existantes dans le domaine de la petite hydraulique. Ce type de turbine pourrait valoriser les débits résiduels, ou encore participer à l'efficacité énergétique des stations d'épuration. Afin de parvenir à cela, ce nouveau prototype d'une puissance de 1 kW a été testé et, pour ce faire, c'est dans le canal de fuite de la centrale hydroélectrique de Lavey que les expérimentations ont été menées. Les analyses et relevés de mesures permettent de valider les résultats obtenus par les simulations numériques et ainsi d'évaluer le potentiel d'installation de telles machines en Suisse, ailleurs en Europe et dans le monde.

Le projet a débuté en 2010 avec des recherches menées sur les turbines à récupération d'énergie cinétique. Suite à ces recherches et afin de valider les simulations numériques réalisées, un prototype a été construit. Les tests avec ce prototype en laboratoire s'avérant complexes à mettre en œuvre, la décision de le tester en conditions réelles fut prise. C'est ainsi qu'en 2017, le premier prototype d'hydrolienne fluviale en Suisse fut installé pour 6 mois dans le canal de fuite de la centrale hydroélectrique de Lavey. Malheureusement des problèmes dans l'électronique de puissance n'ont pas permis de réaliser les tests souhaités.

En mars 2021, suite à quelques modifications apportées au niveau de l'électronique de puissance, du contrôle et de l'instrumentation, l'hydrolienne a été réinstallée sur le site de Lavey. Nous avons alors effectué des campagnes de mesures et procédé au post-traitement des données afin d'analyser le comportement de l'hydrolienne et la caractériser. Afin d'y parvenir, nous avons mesuré la puissance générée par l'hydrolienne en fonction de sa vitesse de rotation. Nous avons ensuite adimensionné ces grandeurs afin d'obtenir une unique courbe de caractérisation indiquant le coefficient de performance (C_p) en fonction du rapport des vitesses de rotation et d'écoulement dans le canal (λ).

Un second objectif venu se greffer au projet est de démontrer l'efficacité d'un MPPT (*Maximum Power Point Tracker*), développé par Studer Innotec et utilisé habituellement pour des panneaux photovoltaïques, dans une application hydraulique. Cette expérience permettrait ainsi de valider l'utilisation de ce MPPT pour des hydroliennes.

1.1. Prototype de l'hydrolienne

Comme l'illustre la figure 1, la version finale du prototype de l'hydrolienne est composée d'un carénage d'un diamètre d'entrée de 1.13 m, un diamètre de sortie de 1,6 m ainsi qu'une longueur de 4,1 m, permettant d'accélérer le fluide par le phénomène de Venturi et de dépasser la limite de Betz. Le design du carénage et sa longueur ont été étudiés afin d'augmenter le débit, de récupérer un maximum de couple sur la roue et de diminuer au maximum les turbulences à la sortie de l'hydrolienne grâce au diffuseur (partie du carénage aval à la roue).

L'hydrolienne est également composée de 5 aubes directrices fixes qui permettent de guider l'écoulement et de donner une certaine rigidité au carénage. Une roue tripale d'un mètre de diamètre permet de transformer l'énergie hydraulique en énergie mécanique. Un bulbe dans lequel se trouve le multiplicateur et la génératrice permettent de transformer cette énergie mécanique en énergie électrique. Le multiplicateur permet d'avoir des vitesses de rotation de la génératrice 16 fois plus élevées que la roue.

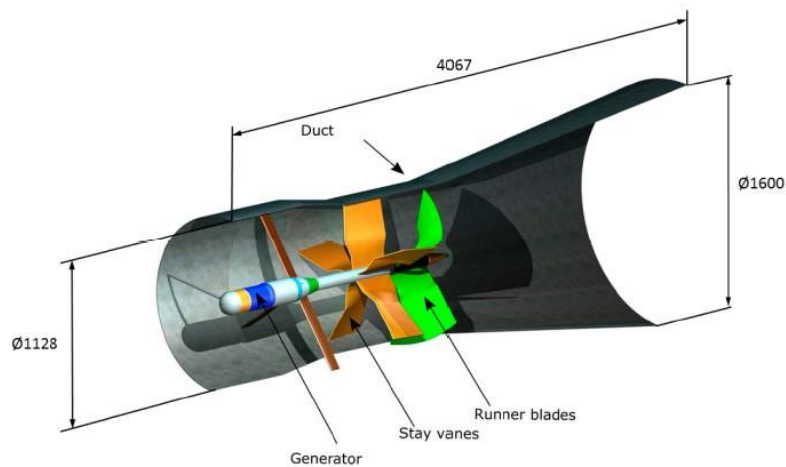


Figure 1. Modélisation 3D de la version finale de l'hydrolienne [1]

En parallèle de la turbine, une plateforme d'essai adaptée a été conçue afin de permettre à l'équipe de réaliser des campagnes de mesures en toute sécurité. La version finale de cette plateforme est constituée d'une base en tripode posée dans le fond du canal, de deux piliers permettant de monter et descendre l'hydrolienne et d'une passerelle sur laquelle est installé tout le matériel de contrôle et d'acquisition des données.

1.2. Centrale hydroélectrique de Lavey

Le barrage de la centrale est situé à Évionnaz en amont de Lavey et retient l'eau du Rhône à une hauteur de 8 mètres au-dessus de son niveau d'origine. Une conduite d'amenée d'eau d'un diamètre de 7,75 m et longue de 4 km, offrant une hauteur de chute de 44 mètres relie le barrage à la centrale souterraine de Lavey. Les prises d'eau de la galerie d'amenée souterraine sont munies de deux dégrilleurs permettant le nettoyage mécanique des grilles, car c'est près de 1600 tonnes de débris qui sont ainsi évacués chaque année du Rhône.

La centrale a été mise en service en 1950 et compte 3 turbines Kaplan de 8 pales d'une puissance de 31 MW chacune. La centrale a un débit nominal de 240 m³/s et permet donc une production électrique annuelle de 400 GWh, ce qui équivaut à environ 130 000 ménages. [2]

Toutefois, avant l'installation de l'hydrolienne dans le canal de fuite, une étude et des simulations de l'écoulement ont été réalisées. Celles-ci ont permis de prédire les influences que les différents écoulements dans le canal en fonction du nombre de turbines en fonctionnement pourraient avoir sur l'hydrolienne et son comportement.

L'impact de l'environnement a également été étudié, car lors de la fonte des neiges et des glaces, le Rhône transporte des quantités considérables d'alluvions. Ce sont parfois jusqu'à 360 tonnes de sédiments en suspension qui passent chaque heure dans la centrale. On imagine alors facilement l'impact que peuvent avoir ces sédiments sur l'hydrolienne.

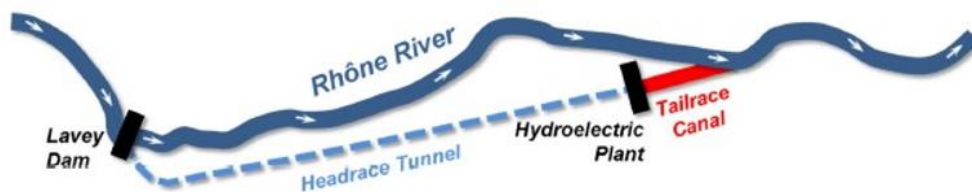


Figure 2. Schéma de la centrale hydroélectrique de Lavey [1]

2. Instrumentation de l'hydrolienne

L'hydrolienne a été équipée de capteurs avant sa remise à l'eau afin de pouvoir évaluer ses performances selon les différentes vitesses d'écoulement rencontrées et ainsi permettre de la caractériser. Certains capteurs étaient déjà présents à l'époque et ont simplement été conservés et réinstallés sur l'hydrolienne. De nouveaux

capteurs ont également été installés, c'est le cas par exemple du capteur de vitesse surfacique et de la sonde de niveau installés sur le devant de la plateforme.

La sonde de niveau mesure la hauteur d'eau dans le canal depuis la passerelle. Elle a une plage de fonctionnement comprise entre 0,8 m et 35 m et est précise à ± 3 mm.

Le capteur de vitesse quant à lui est conçu pour mesurer les vitesses superficielles dans les rivières et canaux ouverts avec une précision à ± 2 %. Sa plage de fonctionnement est comprise entre 0,08 m/s et 15 m/s.

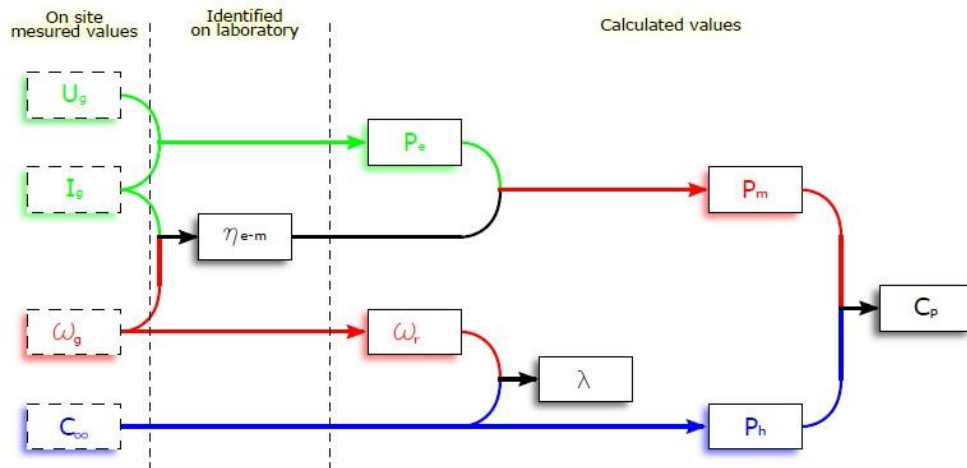


Figure 3. Schéma global de mesure [1]

La figure 3 représente le schéma global des différentes mesures réalisées pour la création des courbes de performances. Afin de parvenir à ce résultat, nous avons besoin de la mesure de la tension et du courant pour calculer la puissance électrique produite. Ces deux mesures sont réalisables à l'aide de deux sondes de courants et tensions connectées à la génératrice.

Le rendement électromécanique de la machine est quant à lui déterminé à l'aide d'une surface identifiée en laboratoire, fonction du courant et de la vitesse angulaire de la génératrice. Il est dès lors possible de calculer la puissance mécanique à partir de ce rendement et de la puissance électrique.

Le coefficient de performance (C_p) se définit alors simplement comme le rapport de la puissance mécanique et de la puissance hydraulique, elle-même déterminée à partir de la vitesse d'écoulement mesurée à l'aide du capteur de vitesse. Le tip speed

ratio (λ) est quant à lui, le rapport des vitesses de rotation de la roue et d'écoulement dans le canal.

D'autres capteurs installés dans l'hydrolienne viennent sécuriser l'installation. Nous avons par exemple un capteur de température nous permettant de vérifier la température de la génératrice et prévenir les éventuels échauffements. Un capteur d'humidité est installé dans le bulbe et permet de donner une indication sur l'étanchéité de cette partie de l'hydrolienne. Enfin, un capteur de pression permet de connaître la profondeur de l'hydrolienne et de l'installer au niveau de plus grande vitesse dans le profil d'écoulement du canal.

Chaque capteur est relié à un automate qui traite les signaux qu'il reçoit, effectue un premier traitement des données et affiche en temps réel sur un interface utilisateur les informations de l'installation. L'automate génère également chaque jour un fichier comportant les mesures effectuées chaque seconde, qui sert par la suite de base de données pour la caractérisation du prototype.

2.1. Régulation de l'hydrolienne

Contrairement à la première version de l'hydrolienne, la régulation se fait aujourd'hui à l'aide d'un MPPT conçu pour une application solaire photovoltaïque. Le courant sortant de la génératrice passe au travers d'une électronique permettant de le redresser. À la suite, un chargeur solaire équipé d'un MPPT permet de contrôler l'hydrolienne et selon la charge des batteries, de soit les charger, soit envoyer le courant à un onduleur. Ce dernier permet alors d'alimenter l'installation et de renvoyer l'électricité excédante sur le réseau 230V.

Il existe plusieurs méthodes de recherche du "Maximum Power Point" (MPP) : la plus connue est la méthode P&O qui signifie "Perturb and Observe". Il s'agit d'un algorithme qui recherche la valeur optimale par "essai-erreur" en faisant varier la valeur de la tension que le MPPT impose à la génératrice et en analysant la puissance de sortie. Si en augmentant la tension, la puissance se voit augmentée également, l'algorithme cherche à imposer une tension encore plus grande ; mais à l'inverse, si la puissance diminue, c'est que le MPP est dépassé. Dans ce cas, l'algorithme cherche à abaisser la tension. Le MPPT permet donc d'être toujours au meilleur point de fonctionnement. [3]

3. Campagnes de mesures

Lors des campagnes de mesures, une méthodologie d'expérimentation a été définie. L'objectif étant de caractériser l'hydrolienne à l'aide des courbes $C_p-\lambda$, une même campagne de mesure doit être réalisée à vitesse d'écoulement constante. En effet, afin de construire la courbe $C_p-\lambda$, il faut mesurer la puissance électrique fournie pour

différentes vitesses de rotation de la machine, et ce pour une puissance hydraulique identique, donc pour une vitesse d'écoulement constante.

Avant chaque test, nous contactons les responsables de la centrale de Lavey afin de connaître les prévisions de production des heures à venir. Nous avons eu la chance lors de nos deux campagnes de mesures d'avoir des débits de turbinage et donc des vitesses constantes et différentes l'une de l'autre, ce qui a permis d'obtenir une courbe pour une vitesse de 1.1 m/s et une seconde pour 1.25 m/s.

Nous remontons également l'hydrolienne avant le test afin de vérifier qu'il n'y ait pas de problèmes apparents et nous la nettoyons pour éviter de fausser les mesures avec une quelconque influence induite par les éventuels débris restés bloqués. Nous redescendons ensuite l'hydrolienne et la positionnons à un mètre de profondeur pour réaliser les tests afin que chaque campagne de mesures soit comparable. Il a été mesuré lors des premiers tests en 2018 que la profondeur exerçait une influence sur le rendement de l'hydrolienne. Ceci s'explique simplement grâce aux effets de bords qui créent ainsi un profil de vitesse dans le canal.

Une fois l'hydrolienne en place, nous désactivons le MPPT via le portail utilisateur afin de pouvoir contrôler la vitesse de rotation de l'hydrolienne en imposant une tension aux bornes de la génératrice. La plage de tensions imposées est comprise entre 100 et 500 V aux bornes du redresseur. Nous commençons donc à imposer la tension minimale et laissons l'hydrolienne tourner pendant une dizaine de minutes à ce régime avant de l'augmenter par pas plus ou moins grand suivant le nombre de points et la précision que l'on souhaite atteindre. Le test se termine lorsque la machine ne parvient plus à tourner à la vitesse imposée : on dit alors que la machine tourne "à l'emballement", ce qui signifie qu'elle n'est plus en charge et ne produit plus car la roue tourne à vitesse équivalente à celle de l'écoulement.

Une fois le test terminé, nous réactivons le MPPT afin de remettre la machine à son point de fonctionnement optimum et nous replaçons l'hydrolienne à sa profondeur par défaut, qui correspond à la profondeur pour laquelle l'hydrolienne reste totalement immergée en cas de débit minimum. Ceci nous permet de nous assurer que la génératrice reste constamment refroidie par l'eau du canal et ne risque pas de se retrouver à l'air libre.

4. Caractérisation de l'hydrolienne

La première étape est le post-traitement des données. Pour parvenir à traiter efficacement les données récoltées et permettre de caractériser correctement

l'hydrolienne, les données doivent être dégrossies et traitées. Les fréquences d'acquisition des différents appareils de mesures étant différentes, afin de pouvoir les comparer et les utiliser, il est important de travailler sur une même base de temps.

Une fois le post-traitement effectué, on peut construire les courbes de caractérisation en affichant la puissance produite par l'hydrolienne en fonction de la vitesse de rotation de la génératrice. La figure 4 montre ces courbes de caractérisation réalisées pour des vitesses d'écoulement de 1,1 m/s et 1,25 m/s.

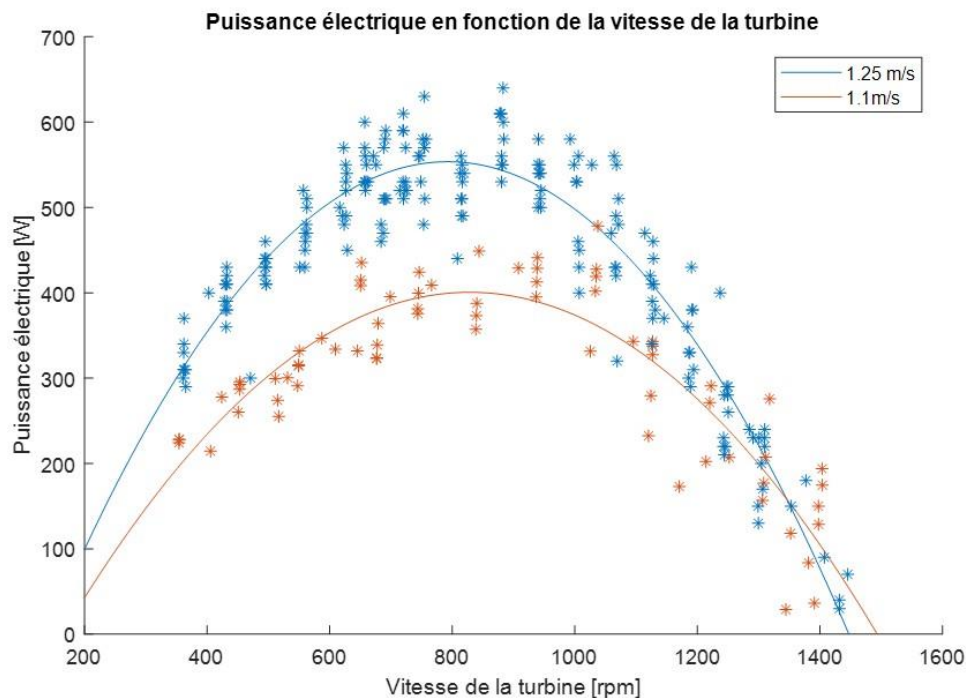


Figure 4. Courbes de caractérisation de l'hydrolienne [4]

On observe très justement la courbe orange plus basse que la bleue puisque la vitesse d'écoulement, et donc la puissance hydraulique disponible, y sont plus basses. On peut observer pour le début de courbe que, plus la vitesse de rotation augmente, plus la puissance augmente, jusqu'à arriver à un maximum appelé "MPP", le point de fonctionnement pour lequel la puissance produite est maximale. Au-delà de ce point, plus la vitesse augmente et plus la puissance décroît jusqu'à être pratiquement nulle : l'hydrolienne atteint la vitesse d'emballement, elle est de moins en moins chargée jusqu'à ne plus produire aucune puissance.

Une chose particulière à laquelle on ne s'attendait pas est le positionnement des courbes l'une par rapport à l'autre. En effet, nous nous attendions à avoir le MPP de

la courbe à plus faible débit à un plus petit rpm. Or ici, le MPP de la courbe 1,1 m/s a tendance à être légèrement décalé vers la droite. Ceci peut être dû à des variations de vitesses d'écoulement lors des tests. Il faudrait donc davantage de courbes de caractérisation afin de pouvoir dessiner la courbe MPPT. Afin de connaître le profil de vitesses d'écoulement rentrant dans la turbine, nous avons utilisé un instrument appelé ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), capable de mesurer la vitesse d'écoulement à différentes profondeurs.

Pour ne plus prendre en compte ces variations de vitesse, nous avons adimensionné ces courbes afin d'obtenir les courbes " $C_p-\lambda$ ", représentées à la figure 5. On remarque alors directement que les courbes obtenues par la méthode des moindres carrés se superposent presque parfaitement.

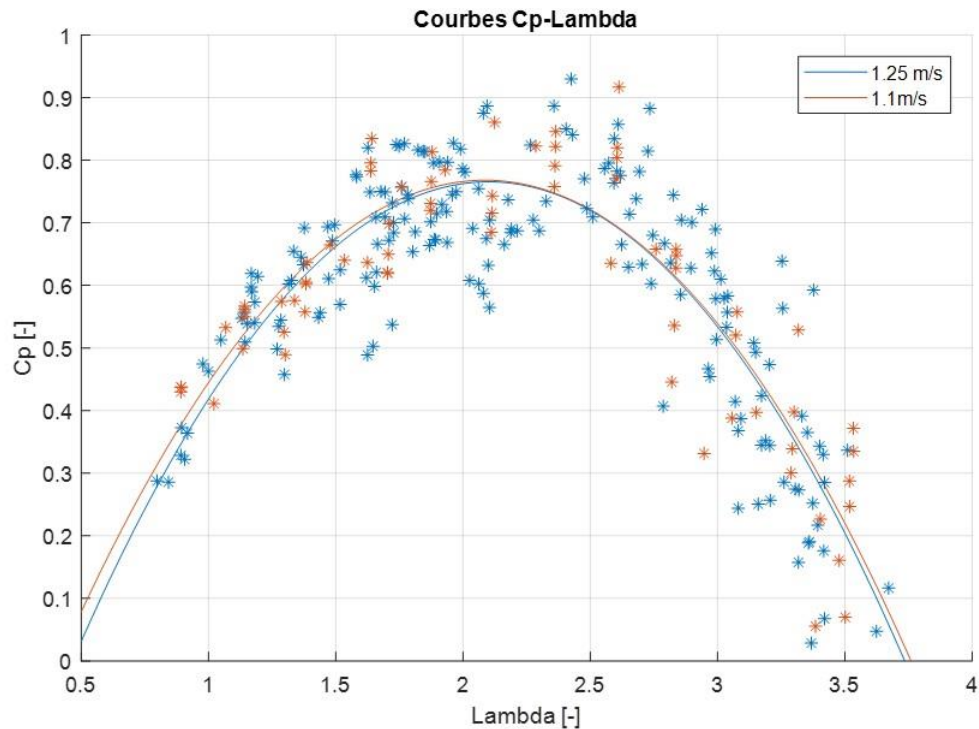


Figure 5. Courbes de caractérisation adimensionnalisées de l'hydrolienne ($C_p-\lambda$) [4]

Pour obtenir ces courbes adimensionnalisées, nous avons appliqué les équations (1) et (2) afin d'obtenir pour chaque point le coefficient de performance ou rendement de la machine et le lambda ou "tip speed ratio" qui est le rapport entre la vitesse de rotation de la roue et la vitesse d'écoulement. De cette façon, on obtient des courbes sans dimensions qui se superposent pour donner le meilleur point de fonctionnement de la machine, qui est pour un λ de 2.1, un rendement maximum de 76.8 %.

$$C_p = \frac{P_{Elec}}{P_{Hydre}} \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{\omega_{roue} \times r}{V_{ref}} \quad (2)$$

Des estimations et prédictions de productions ont été réalisées en parallèle des campagnes de mesures. Les résultats obtenus grâce à cette étude permettent de corroborer les courbes générées lors des campagnes de mesures.

4.1. Simulation des vitesses et puissances

Grâce aux données fournies par la centrale de Lavey sur les trois dernières années nous avons pu estimer la vitesse d'écoulement à l'emplacement de l'hydrolienne dans le canal en fonction des débits turbinés et du niveau dans le canal. Ces analyses sur les trois années différentes nous ont permis de définir avec plus ou moins de précision les vitesses que l'on est amené à avoir lors de campagnes de mesures en fonction du niveau dans le canal et du nombre de turbine en fonctionnement dans la centrale de Lavey.

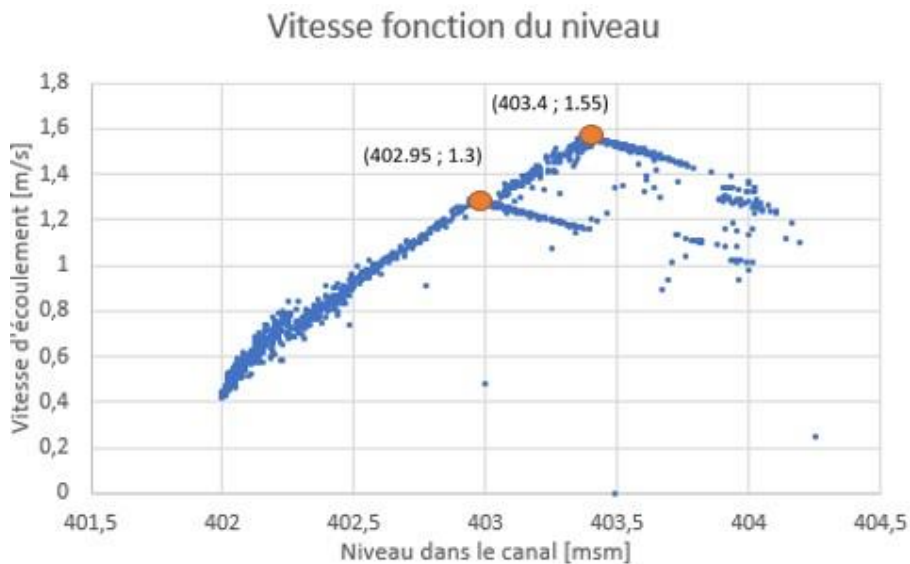


Figure 6. Estimation des vitesses d'écoulement dans le canal en fonction du niveau [4]

Lorsque l'on analyse le graphique de la figure 6, si le niveau augmente (donc le débit turbiné augmente), la vitesse d'écoulement augmente aussi. En revanche, on remarque des courbes décroissantes à partir des points [402.95 ; 1.3] et [403.4 ; 1.55] qui correspondent aux points de fonctionnement pour lesquels le débit du Rhône est équivalent au débit maximum turbiné par la centrale. Une fois le débit du Rhône supérieur à ce débit maximum turbiné, la vitesse dans le canal va chuter à cause de l'influence du Rhône.

Cette influence s'explique simplement par le principe des vases communicants. Puisque le canal de fuite se jette dans le Rhône, si le débit du fleuve augmente et que son niveau monte, le niveau dans le canal de fuite monte également et sa vitesse d'écoulement se voit être diminuée.

La puissance hydraulique étant fonction de la vitesse d'écoulement au cube. Il est dès lors possible d'obtenir une estimation des puissances hydrauliques en connaissant le niveau dans le canal et le mode de fonctionnement de la centrale.

4.2. Comparaison des résultats avec les simulations

Lors de nos estimations de production, nous avons utilisé le rendement de la machine qui avait été calculé à l'époque grâce aux différents tests réalisés. Ne connaissant pas la fiabilité de ce dernier, nous ne pouvions être certains de nos estimations.

Lorsque l'on compare les estimations de puissance produites par l'hydrolienne en fonction de la vitesse d'écoulement dans le canal (fig. 7) avec les MPP des courbes de caractérisation obtenues, les observations suivantes peuvent être faites. Selon les courbes de caractérisation, la puissance maximum récupérable pour la vitesse d'écoulement de 1,1 m/s est de 400 W. Elle est de 550 W pour une vitesse de 1.25 m/s. Lorsque l'on reporte ces 2 vitesses d'écoulement sur la courbe des estimations de puissances produites présentée à la figure 7, on constate que les estimations réalisées sont comparables à la réalité. En effet, pour une vitesse d'écoulement de 1,1 m/s et 1,25 m/s, les estimations indiquent respectivement 400 W et 580 W de puissance produite.

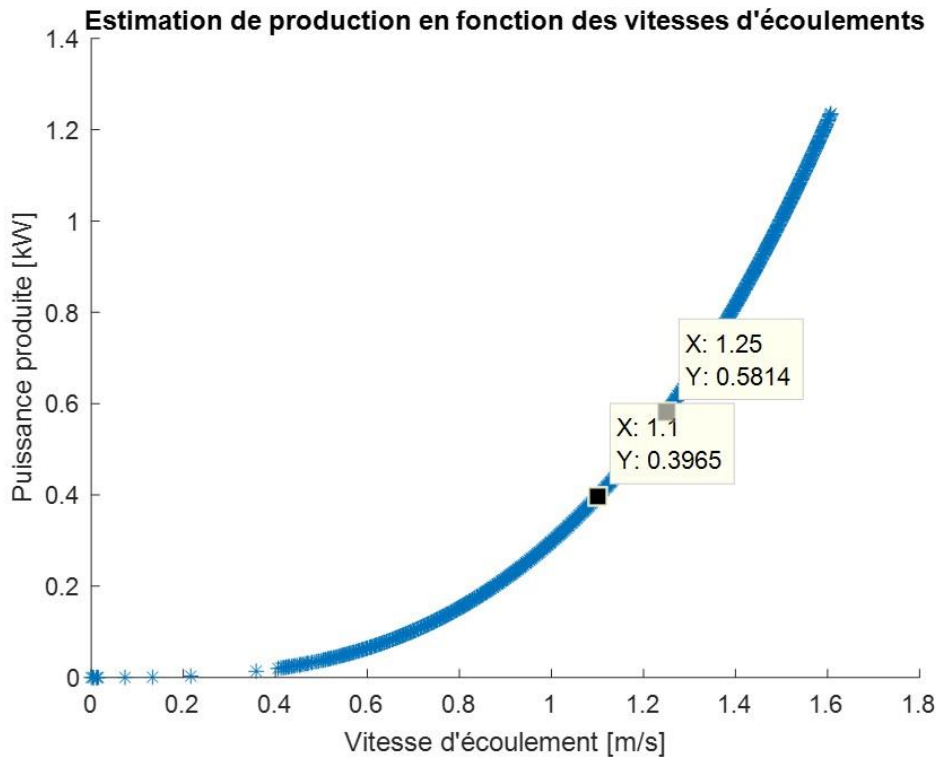


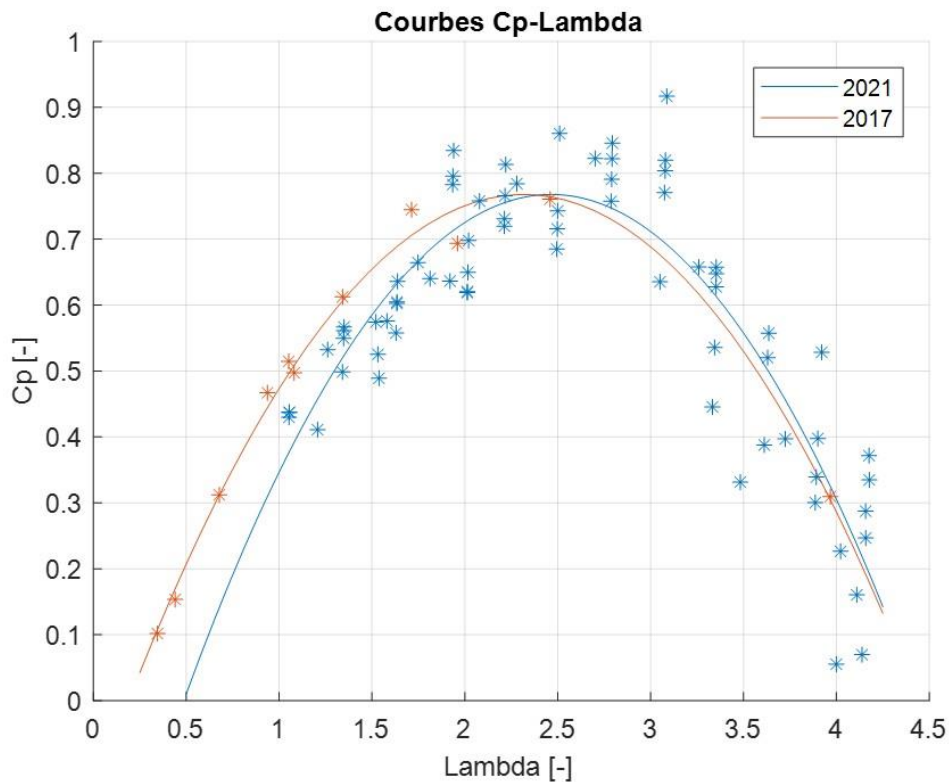
Figure 7. Courbe des estimations de puissances produites en fonction de la vitesse d'écoulement [4]

Le rendement total de la machine est composé de trois rendements, nous avons celui de la génératrice, celui du réducteur et le troisième que nous appellerons "rendement hydromécanique". Ce dernier concerne les pertes par frottement, propres à la conception mécanique de la machine et au rendement hydraulique correspondant aux éventuelles fuites de débit. Connaissant les rendements de la génératrice et du réducteur fournis par les constructeurs qui sont respectivement de 90 % et 96,5 % à puissance nominale. Ainsi que le rendement global de l'hydrolienne de 76,8 % déterminé avec les courbes $C_p - \lambda$. Nous avons pu estimer le rendement hydromécanique de la machine à 87,5 %.

4.3. Comparaison des résultats avec la première campagne de mesures

En comparant les courbes de caractérisation obtenues avec les données de l'époque à celles réalisées grâce à nos nouvelles campagnes de mesures, nous pouvons appuyer les résultats afin de fournir une caractérisation de la machine proche de la réalité.

La figure 8 représente la courbe C_p - λ obtenue avec les données de 2017 ainsi que la courbe C_p - λ obtenue avec les données de 2021. On peut remarquer que chacune des courbes atteint un coefficient de performance identique de 76,8%, avec $\lambda = 2,46$ pour la nouvelle courbe et $\lambda = 2,3$ pour la courbe de 2017.



4.4. Impact de l'hydrolienne

Un point important sur lequel nous pouvons discuter est l'impact de l'installation d'une ferme d'hydroliennes en aval d'un barrage. En effet, puisque les hydroliennes récupèrent l'énergie cinétique de l'eau, l'écoulement se retrouve alors ralenti ; or le débit reste inchangé. On observe alors logiquement une hausse du niveau de l'eau, ce qui a pour conséquence de réduire la chute du barrage en amont. On se retrouve donc à diminuer la production du barrage amont pour récupérer cette même énergie avec des hydroliennes généralement à moins bons rendements.

Un projet de ferme d'hydroliennes fluviales a ainsi été abandonné en 2019 en aval du barrage de Génissiat sur le Rhône en France, car le fait de se situer en aval du barrage aurait engendré une perte d'exploitation du barrage lui-même. Il faut préciser que 22 centrales hydroélectriques exploitent le Rhône, qui font de lui l'un des fleuves les plus exploités d'Europe.

Lors de l'étude de potentiels sites d'implantations d'hydroliennes, il est donc primordial de vérifier l'impact sur les autres installations hydroélectriques déjà présentes afin de ne pas déboursier pour produire ce que l'on produit déjà. Dans le cas de Lavey, l'influence de l'hydrolienne sur la centrale est indétectable aux vues des différences de puissance entre les deux installations.

5. Conclusion

Ce travail avait pour but d'étudier et de caractériser un premier prototype d'hydrolienne fluviale en Suisse selon les différentes conditions d'écoulement du site d'implantation.

Au terme de nos analyses, nous avons pu déterminer le rendement de l'hydrolienne à 76,8 % et valider nos résultats avec les estimations et analyses réalisées auparavant.

Sur ces perspectives intéressantes du développement d'énergie hydraulique, nous retiendrons que ce type d'hydrolienne développé en Suisse est adapté à la récupération de l'énergie résiduelle des centrales hydroélectriques, pour autant qu'elle n'influence pas leurs rendements, et de toutes installations au fil de l'eau ayant un débit suffisant, comme par exemple les stations d'épuration, les barrages écrêteurs de crues et les sas d'écluse. Elle pourrait également être implantée directement en fleuve ou en rivière.

6. Références

- [1] MÜNCH-ALLIGNÉ, C., *et al.* *Réalisation d'une hydrolienne pour les canaux artificiels.*
Rapport technique, Valais/Wallis, Suisse : HES-SO, novembre 2018.
- [2] BIERI, M., *et al.* *Barrage de Lavey. Etudes physique et numérique des écoulements et du transport solide dans le Rhône.*
La Houille Blanche 6 (2010), pp. 60-66.
DOI : 10.1051/lhb/2010068.
- [3] PETRONE, G., SPAGNUOLO, G., & VITELLI, M. (2012). *Distributed Maximum Power Point Tracking: Challenges and Commercial Solutions.* *Automatika*, 53(2), pp.128-141.
<https://doi.org/10.7305/automatika.53-2.181>.
- [4] CARPENTIER, G., *Réinstallation et caractérisation du premier prototype d'hydrolienne fluviale en Suisse dans le canal de fuite de la centrale hydroélectrique de Lavey.*
Mémoire de master, Liège, Belgique : HELMo Gramme, juin 2021.