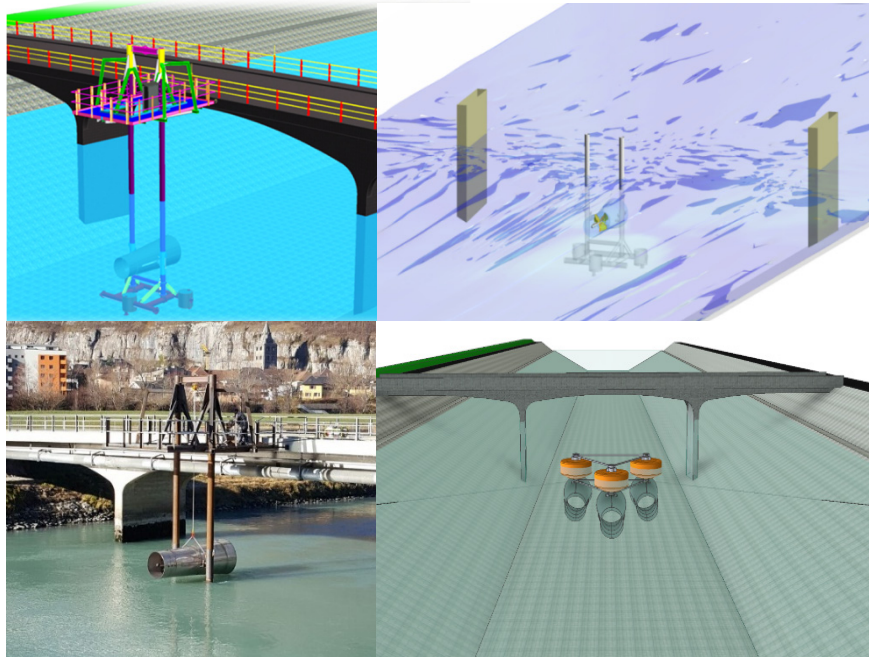




Rapport final du 20 novembre 2018

Réalisation d'une hydrolienne pour les canaux artificiels





Date : 23 Novembre 2018

Lieu : Sion

Prestataire de subventions :

Confédération suisse, représentée par
L'Office fédéral de l'énergie OFEN
Programme pilote, de démonstration et Programme-phare
CH-3003 Berne
www.ofen.admin.ch

Bénéficiaires de la subvention :

Groupe Hydroélectricité
HES-SO Valais-Wallis
Route du Rawil 47
CH-1950 Sion 2
www.hevs.ch

Auteurs:

Cécile Münch-Alligné, HES-SO Valais-Wallis, cecile.muench@hevs.ch
Olivier Pacot, HES-SO Valais-Wallis, olivier.pacot@hevs.ch
Jean Decaix, HES-SO Valais-Wallis, jean.decaix@hevs.ch
Jérémy Schmid, HES-SO Valais-Wallis, jeremy.schmid@hevs.ch
Vlad Hasmatuchi, HES-SO Valais-Wallis, vlad.hasmatuchi@hevs.ch
Anthony Gaspoz, HES-SO Valais-Wallis, anthony.gaspoz@hevs.ch
Nino Brunner, Stahleinbau GmbH, brunner.nino@stahleinbau.ch
Guillaume Von Roten, Cimark, guillaume.vonrotten@cimark.ch

Direction du programme de l'OFEN : Yasmine Calisesi, yasmine.calisesi@bfe.admin.ch

Suivi du projet pour l'OFEN : Klaus Jorde, klaus.jorde@kjconsult.net

Numéro du contrat de l'OFEN : SI/501323-01

Les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions de ce rapport.

Office fédéral de l'énergie OFEN

Mühlestrasse 4, 3063 Ittigen, Adresse postale : 3003 Berne
Tél. +41 58 462 56 11 · fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.ofen.admin.ch



Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts "Realisierung einer kinetischen Turbine für künstliche Kanäle" wurden Anfang 2017 eine neue Turbine und ihre Testplattform entwickelt, gebaut und im künstlichen Kanal des Wasserkraftwerks Lavey installiert. In diesem vorübergehenden Freiluftlabor wurde erstmals in der Schweiz die Leistung einer kinetischen Turbine unter realen Betriebsbedingungen gemessen. Diese Leistungen konnten erfolgreich mit den durch numerische Simulation erlangten Vorhersagen verglichen werden. Der Einfluss der Strömungsverhältnisse, der Installationshöhe der Turbine und der Neigung der Turbinenachse konnte untersucht werden. Es konnte ein Leistungsfaktor von mehr als 0.8 gemessen werden, was im Vergleich zu bestehenden Produkten sehr wettbewerbsfähig ist. Es konnte eine Leistung von mehr als 1.5 kW eingespeist werden, wodurch der zu Projektbeginn festgelegte Zielwert von 1 kW überschritten wurde. Im Sommer 2018 wurde ein Testlauf mit permanenten Messungen während einer Woche durchgeführt. Es wurde eine Vorstudie für die Installation einer Gezeitenturbinenfarm erarbeitet, um die Möglichkeit einer Kostensenkung im Vergleich zum ersten gebauten Prototyp zu bewerten und die optimale Konfiguration bezüglich Anzahl und Größe der Maschinen zu simulieren, um 10 kW zu erreichen. Zudem wurden unterschiedliche Tragstrukturen zur Befestigung der Maschinenfarm entwickelt.

Résumé

Le projet « Réalisation d'une hydrolienne pour les canaux artificiels » a permis de développer et construire une nouvelle hydrolienne ainsi que sa plateforme de test et de les installer dans le canal de fuite de la centrale hydroélectrique de Lavey en 2017. Pour la première fois en Suisse, dans ce laboratoire éphémère à ciel ouvert, les performances d'une hydrolienne ont pu être mesurées dans des conditions réelles d'exploitation. Ces performances ont pu être comparées avec succès à celles prédites par simulation numérique. L'influence des conditions d'écoulement, de la hauteur d'implantation de la turbine et de l'incidence de l'axe de la turbine a pu être étudiée. Un coefficient de puissance de plus de 0.8 a pu être mesuré, ce qui est très compétitif par rapport aux produits existants. Une puissance de plus de 1.5 kW a pu être injectée dépassant ainsi la valeur cible. Durant l'été 2018, des essais avec des mesures durant une semaine en continue ont pu être effectués. Une pré-étude pour l'installation d'une ferme d'hydroliennes a été réalisée pour évaluer la possibilité de réduire les coûts par rapport au premier prototype construit et simuler la configuration optimale du nombre de machines et leurs tailles pour atteindre 10 kW. Différentes structures permettant de tenir la ferme ont aussi été développées.

Abstract

In the framework of the project "Realization of a kinetic turbine for artificial canals", a new turbine and its test platform have been developed, built and installed in the artificial channel of the Lavey hydropower plant in 2017. For the first time in Switzerland, in this ephemeral open-air laboratory, the performance of a kinetic turbine was measured under real operating conditions. These performances could be compared successfully with those predicted by numerical simulation. The influence of flow conditions, the turbine's installation height and the inclination of the turbine axis could be studied. A power factor of more than 0.8 could be measured, which is very competitive compared to existing products. A power of more than 1.5 kW could be injected, thus exceeding the target value. During the summer of 2018, tests with measurements during a continuous week were carried out. A pre-study for the installation of a turbine farm was carried out to evaluate the possibility of reducing costs compared to the first built prototype and to simulate the optimal configuration of the number of machines and their sizes to reach 10 kW. Additionally, different support structures for the farm have been developed.



Take-home messages

- Une hydrolienne a pu être développée et testée en condition réelle dans un laboratoire éphémère à ciel ouvert dans le canal de fuite de Lavey.
- Les performances de la machine mesurées sur site correspondent à celles prédites par la simulation numérique et dépassent les attentes la rendant compétitive par rapport aux autres technologies de ce type.
- L'influence des conditions d'écoulement dans le canal, de la hauteur d'implantation de la machine et de l'inclinaison de la machine a pu être étudiée.
- Cette nouvelle technologie pourrait permettre de capter un potentiel à ce jour inexploité dans les canaux artificiels et pourquoi pas sur les fleuves lorsque les conditions sont réunies.



Sommaire

Zusammenfassung	3
Résumé	3
Abstract	3
Take-home messages	4
Sommaire	5
Contexte de départ	7
Buts du projet	9
Fondements, conditions-cadre	9
Procédure / méthodologie	11
Conception hydraulique de la turbine.....	11
Conception mécanique de la turbine.....	13
Conception mécanique de la plateforme.....	14
Choix de la génératrice.....	15
Choix pour l'électronique de puissance.....	16
Choix de l'instrumentation.....	18
Fabrication mécanique et montage.....	20
Résultats	22
Mesures sur site.....	22
1.1. Principe.....	22
1.2. Performance de l'hydrolienne.....	23
1.2.1. Influence de la profondeur.....	24
1.2.2. Influence de l'inclinaison.....	25
1.2.3. Choix du pilotage de la vitesse.....	26
1.2.4. Test d'endurance de l'hydrolienne 1 kW.....	28
Pré-étude d'une ferme d'hydroliennes.....	30
1.3. Hydrolienne 3 kW.....	30
1.3.1. Caractéristiques.....	30
1.3.2. Encombrement.....	31
1.3.3. Estimation des coûts.....	31
1.4. Concepts structurels d'une ferme d'hydroliennes.....	32
1.4.1. Concept ferme flottante.....	32
1.4.2. Concept ferme gravitaire multiplateformes.....	36
1.4.3. Concept ferme gravitaire par axe de rotation.....	38
1.4.4. Estimation des coûts.....	40
1.4.5. Synthèse des concepts.....	41
1.5. Simulations numériques.....	42



1.5.1. Réduction de la longueur du diffuseur	42
1.5.2. Modèle simplifié d'une hydrolienne	45
1.5.3. Configuration d'une ferme d'hydroliennes de 10 kW	47
Communication	49
Discussion	51
Conclusions	51
Références	52
Annexe.....	53
Liste des abréviations.....	54

Contexte de départ

Une centrale hydroélectrique conventionnelle est équipée d'une turbine qui permet de convertir une énergie potentielle, cinétique et de pression en énergie mécanique. Pour les hydroliennes de marées ou de rivière, l'énergie mécanique est produite uniquement à partir de l'énergie cinétique du courant, ce qui est à l'origine du nom de « turbine cinétique ». Ce type de technologie ne nécessite pas de construction hydraulique (génie civil) ce qui permet de produire de l'électricité d'origine hydraulique en limitant de façon significative les coûts et l'impact environnemental.

Divers concepts de turbines sont à ce jour développés par des entreprises ou des universités dont trois grandes catégories se distinguent :

- Les turbines axiales ou horizontales dont l'axe de rotation est parallèle au courant ;
- Les turbines verticales dont l'axe de rotation est perpendiculaire à la surface de l'eau et au courant ;
- Les turbines cross-flow dont l'axe de rotation est parallèle à la surface de l'eau et perpendiculaire au courant.

La HES-SO Valais-Wallis a démarré ses recherches sur les turbines cinétiques dans le cadre du programme Hydro VS soutenu par la fondation The Ark et le canton du Valais de 2010 à 2014. De nombreuses simulations numériques avaient alors été réalisées pour développer une première turbine cinétique. Pour confirmer les résultats obtenus par simulation numérique, la réalisation de mesures expérimentales sur un prototype était indispensable avant de s'engager vers une phase d'industrialisation. Néanmoins, réaliser ces mesures en laboratoire se révèle difficile. En Suisse, il existe des bassins de carène (METAS, EPFL-LCH) mais leurs dimensions ne permettent pas de faire des tests dans des conditions garantissant la validité des résultats. La solution optimale pour cette étude est de réaliser ces mesures dans les conditions « réelles » dans un canal de fuite existant avec un prototype à l'échelle 1 :1. Un site pilote a alors été identifié : le canal de fuite de la centrale hydroélectrique de Lavey, voir **Figure 1**.

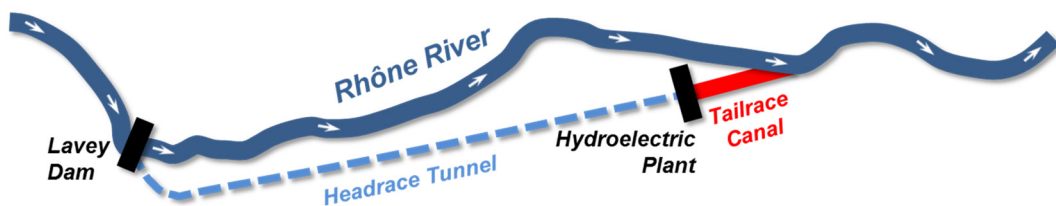


Figure 1 Situation du canal de fuite de la centrale hydroélectrique de Lavey, réf [1].

Des simulations de l'écoulement dans ce canal ont ensuite été réalisées pour vérifier que les conditions d'écoulement seraient favorables pour tester une hydrolienne. Afin de prévoir le lieu d'implantation optimale du prototype, la géométrie CAO 3D du canal a été réalisée (voir Figure 2). Ensuite, des mesures sur site du champ de vitesse dans trois sections ont été réalisées ainsi que des simulations de l'écoulement dans le canal de fuite, voir Figure 3 et Figure 4.

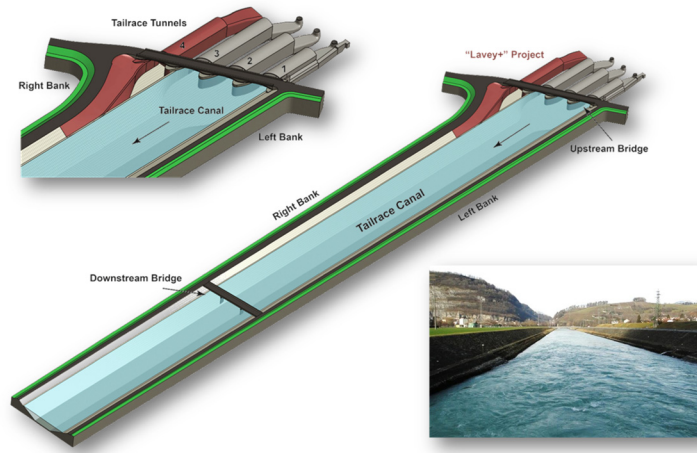


Figure 2 Reconstitution CAO 3D du canal de fuite de Lavey, réf [1].

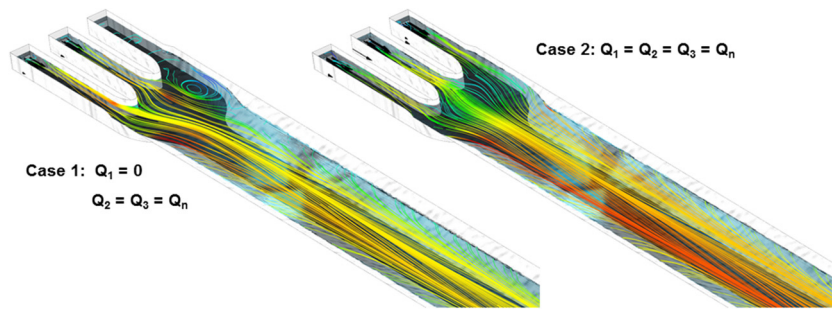


Figure 3 Lignes de courant de l'écoulement dans le canal de fuite de Lavey pour deux scenarios obtenus par simulation numérique, réf [1]

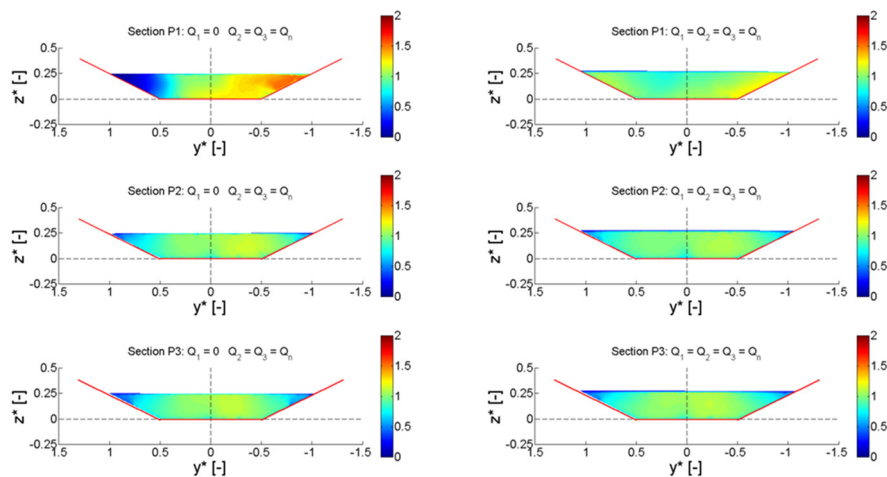


Figure 4 Champs de la vitesse axiale dans trois sections du canal de fuite de Lavey pour deux scenarios obtenus par simulations numériques, réf [1].



Buts du projet

Les objectifs de ce projet sont de réaliser et de tester un premier prototype d'une hydrolienne de 1 kW dans un laboratoire éphémère à ciel ouvert dans le canal de fuite de Lavey. Les mesures de performances de la machine permettront de confirmer les résultats obtenus par simulations numériques afin de valider la méthodologie de développement de la nouvelle machine et d'évaluer la possibilité d'installer ce type de turbine en Suisse. L'influence de différents paramètres sera étudiée : la profondeur d'implantation de la turbine, les conditions d'écoulement du canal de fuite ou l'incidence de l'axe de la machine. Une pré-étude pour l'installation d'une première ferme d'hydrolienne clôturera ce projet.

Fondements, conditions-cadre

L'organisation hiérarchique prévue des partenaires participant à la réalisation du projet et l'organigramme du projet sont représentés sur les **Figure 5** et **Figure 6**.

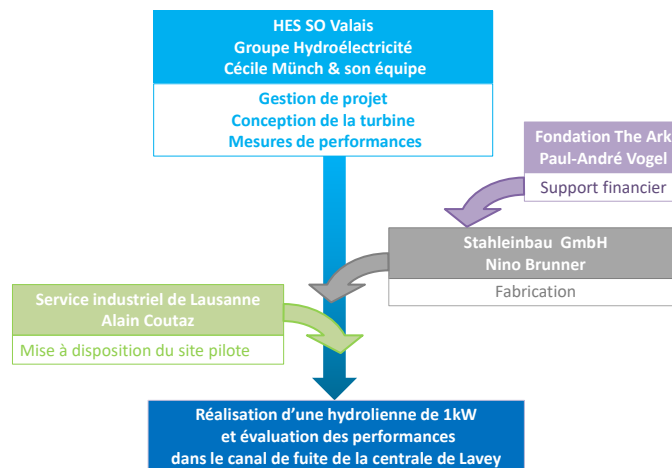


Figure 5 Organisation entre les différents partenaires.

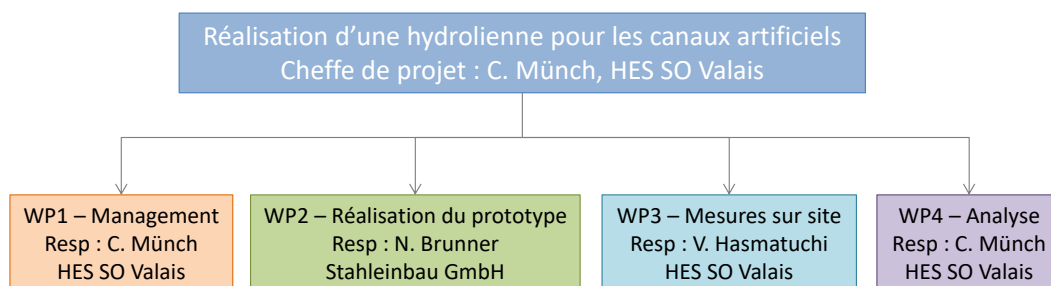


Figure 6 Organigramme du projet.



Les différentes activités prévues étaient les suivantes :

WP1 - Administration du projet

Le management du projet sera pris en charge par C. Münch, professeure à la HES-SO Valais-Wallis, cheffe de ce projet. Elle planifiera les différentes tâches, organisera les meetings, fera le suivi de projet avec les différents responsables des WP afin que les objectifs du projet soient atteints. Elle s'assurera de l'avancement et de la qualité des rapports qui seront rédigés par les différentes personnes ayant travaillé sur les activités rapportées. Selon la réussite du projet, des articles scientifiques et de vulgarisation seront rédigés pour promouvoir les résultats de cette étude. Une conférence de presse sur le site pilote pourra être organisée en cas de réussite du projet.

WP2 – Réalisation du prototype

Dans ce WP, les conceptions hydraulique, électrique, mécanique et électronique de la turbine seront définies. Certains éléments, existants sur le marché, seront directement achetés (génératrice, convertisseur, etc.). Ces choix technologiques seront réalisés par la HES-SO Valais-Wallis. D'autres éléments seront conçus et réalisés sur mesure (pièces mécaniques) autour du design hydraulique réalisée par la HES-SO Valais-Wallis. La conception mécanique sera réalisée par la HES-SO Valais-Wallis en collaboration avec Stahleinbau GmbH, tandis que la fabrication des pièces mécaniques et le montage seront pris en charge par Stahleinbau GmbH. L'instrumentation pour pouvoir mesurer les performances de la turbine durant la campagne de mesure sera choisie et calibrée par la HES-SO Valais-Wallis.

WP3 – Mesures sur site

La campagne de mesure sera réalisée dans le cadre de ce WP3 par la HES-SO Valais-Wallis en collaboration étroite avec les Services industriels de Lausanne qui mettent gracieusement le site à disposition sous condition que l'installation n'aura aucun impact sur l'aménagement hydro-électrique de Lavey. Une fois le prototype de l'hydrolienne implanté sur le site, les mesures de performances seront réalisées durant une période de 6 mois. A la fin des essais, l'hydrolienne sera retirée du site pilote.

WP4 – Analyse

Durant cette dernière partie du projet, les résultats de mesure de performance du prototype de 1 kW sur le site pilote de Lavey seront analysés par la HES-SO Valais-Wallis en collaboration avec Stahleinbau GmbH. Une attention particulière sera portée sur l'impact de cette technologie sur la centrale de Lavey située en amont et sur l'environnement. Si les résultats sont concluants, une suite du projet en collaboration avec Stahleinbau GmbH pour la phase d'industrialisation sera envisagée.

Finalement une dernière phase de pré-étude d'une ferme d'hydroliennes de 10 kW a été ajoutée et la phase d'essai a été prolongée pour pouvoir évaluer l'influence de certains paramètres et laisser la machine fonctionner pendant plusieurs semaines en continue pour tester sa robustesse.

Procédure / méthodologie

Afin de mettre au point le prototype et sa plateforme de test puis procéder à l'installations sur site, plusieurs activités ont été menées, voir ci-dessous.

Conception hydraulique de la turbine

La conception hydraulique de l'hydrolenne a été réalisée par simulation numérique des écoulements. Différentes géométries de l'hydrolenne ont été considérées, des simulations en charge et avec prise en compte de la surface libre ont été réalisées avec le logiciel ANSYS CFX. La turbine est composée des éléments suivants, voir **Figure 7** :

- Un carénage : permet d'accélérer le fluide passant au travers la roue. Le diamètre d'entrée est de 1.14 m, le diamètre de sortie est de 1.60 et la longueur totale est de 4 m.
- Cinq aubes directrices : permettent de tenir le carénage et guider l'écoulement à l'amont de la roue.
- Une roue : composée de trois pâles, cet élément permet de transformer l'énergie hydraulique du fluide en énergie mécanique en mettant en rotation l'arbre central. Le diamètre de la roue est de 1 m.
- Un bulbe : soutenu par le carénage et connecté à la roue, cet élément contient le générateur et les éléments mécaniques permettant d'assurer la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique.

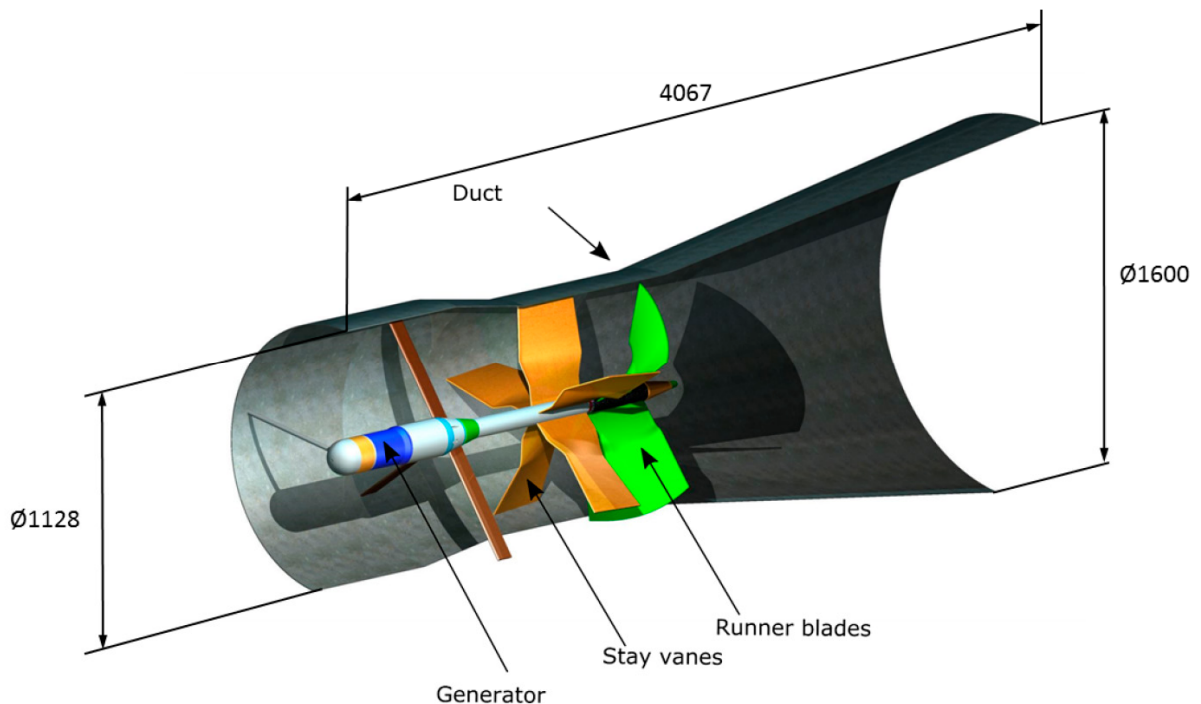


Figure 7 Vue en coupe de la version finale de la géométrie de l'hydrolenne, réf [10].



Les géométries de ces différents composants de la turbine ont été étudiées afin d'améliorer les performances tout en gardant un concept robuste et simple. Des simulations numériques stationnaires et instationnaires de l'écoulement en charge ou à surface libre ont été réalisées avec le logiciel ANSYS CFX. Ce logiciel permet de prédire l'écoulement et ainsi les performances de la machine en résolvant numériquement le modèle physique de Navier-Stokes dans le domaine de calcul, voir **Figure 8**.

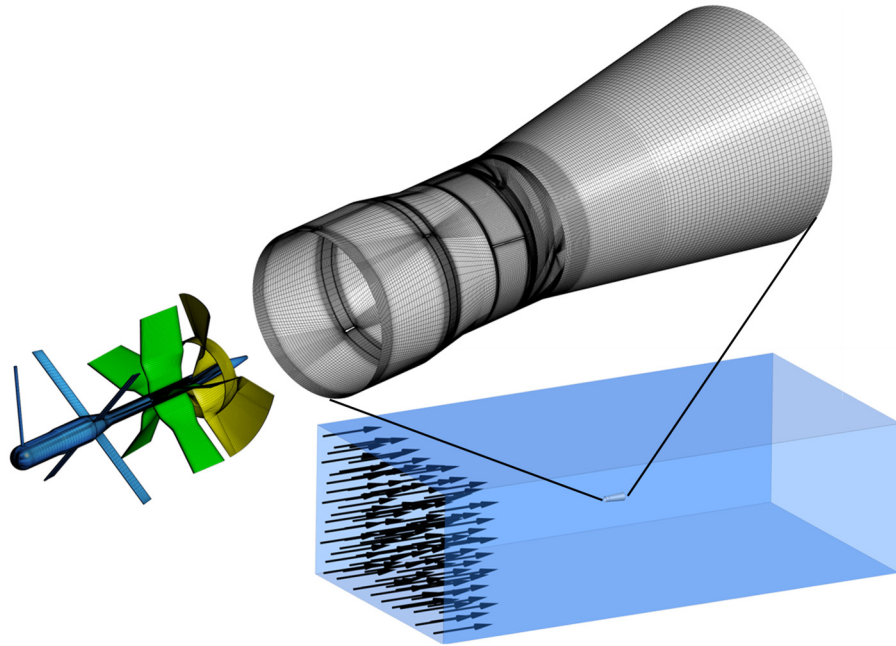


Figure 8 Domaine de calcul et maillage de la turbine, réf [6].

Le domaine de calcul, discrétisé par un maillage non structuré de 8 Millions de nœuds, comprend la turbine mais aussi le fluide environnant, voir **Figure 8**. Le débit passant au travers de la machine est un résultat de la simulation, le champ de vitesse loin en amont étant imposé dans le calcul. Afin d'avoir les conditions limites les plus proches de la réalité, les simulations numériques de l'écoulement dans le canal de fuite de Lavey [1] ont été utilisées pour extraire le profil de vitesse en entrée du domaine de calcul réduit pour la simulation avec prise en charge de la surface libre.

L'objectif des simulations est de prédire le coefficient de puissance de la turbine défini par :

$$C_p = \frac{T_r \cdot \omega_r}{\frac{1}{2} \rho \pi R_r^2 C_\infty^3} \quad (1)$$

Ce coefficient peut atteindre la valeur maximale de 16/27, c'est-à-dire 59.2%. Cette limite, appelée limite de Betz, peut être dépassée en utilisant un carénage autour de la roue, qui produit une effet Venturi. C'est ce qui a été fait pour ce prototype.

Ce coefficient varie en fonction du facteur de vitesse défini par :

$$\lambda = \frac{\omega_r \cdot R_r}{C_\infty} \quad (2)$$

Conception mécanique de la turbine

Le design hydraulique de la roue de la turbine a été conçu pour avoir une partie centrale proche du bulbe « neutre », c'est-à-dire ne participant que très peu au couple récupéré par la roue et laissant passer le fluide afin d'augmenter le débit global passant dans la machine. La plus grande partie du couple étant récupérée sur la partie de plus grand rayon. La forme du carénage et sa longueur ont aussi été étudiées afin d'augmenter le débit et récupérer un maximum de couple sur la roue. Un anneau a été ajouté pour consolider la tenue mécanique des trois pales de la roue. Les simulations numériques ont finalement permis de déterminer le design hydraulique de la turbine permettant d'assurer le plus grand débit au travers de la roue et le plus grand couple mécanique transmis tout en ayant une bonne tenue mécanique.

La conception de la turbine est basée sur le principe du « bulbe » ; la génératrice de la machine est située dans l'arbre central, voir **Figure 9**.

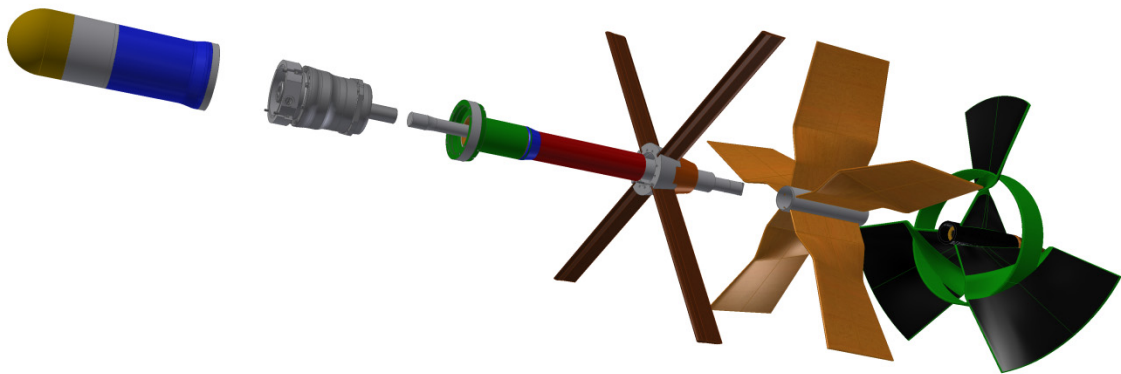


Figure 9 Vue éclatée de l'arbre de la turbine et des éléments connectés, réf [4]

Sur la **Figure 10** est représentée une mise en plan de l'arbre de la turbine. Entre la roue et la génératrice un réducteur a été inséré afin d'avoir des vitesses de rotation de la génératrice 16 fois plus élevées que la roue. Le choix du palier s'est porté sur un produit de la société suédoise SKF. Ce palier est autolubrifiant et est composé d'une armature en acier inoxydable (permettant de maintenir les fibres en matériaux composites) permettant la rotation avec faible frottement de l'arbre. L'étanchéité statique est assurée par des joints toriques en NBR. L'étanchéité dynamique entre l'arbre de la roue et l'enveloppe est réalisée avec une garniture mécanique en carbure de silicium et Viton. Cet élément protège les éléments mécaniques internes contre la corrosion et le grippage tout en ayant un couple de frottement faible.

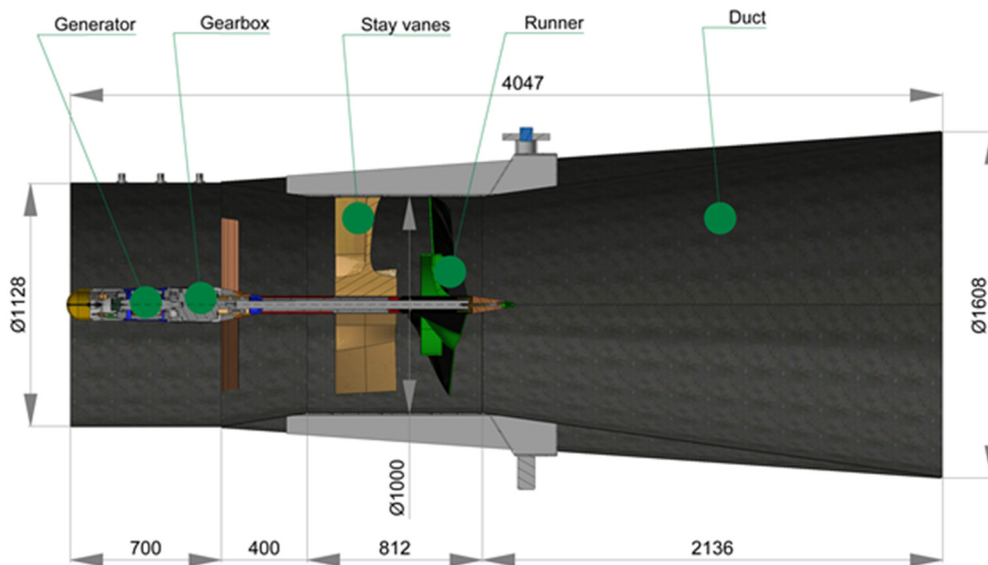


Figure 10 Vue détaillée de l'arbre de l'hydrolienne.

Le rendement du réducteur vaut 96.5% à pleine charge selon le fournisseur. Cette valeur doit être vérifiée par nos tests sur banc d'essai.

Conception mécanique de la plateforme

En parallèle de la turbine, une plateforme d'essai adaptée à ces essais a été conçue. La version finale, voir Figure 11, est constituée d'une base en tripode, de deux piliers et d'une passerelle.

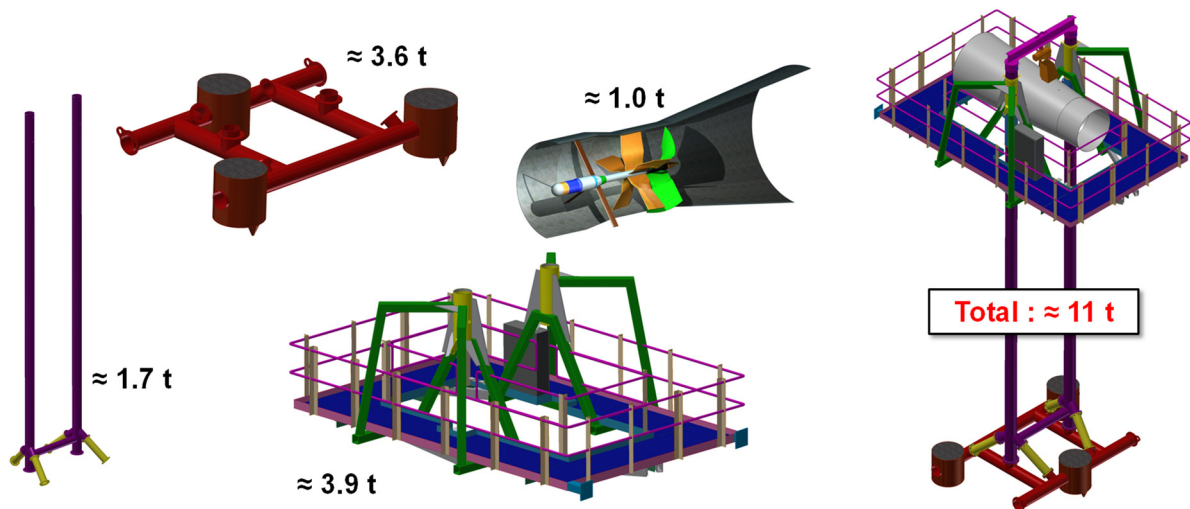


Figure 11 Description et poids des différents éléments composant la plateforme d'essai.

Des analyses modales et des simulations numériques de la structure ont été réalisées afin de garantir la tenue mécanique et de connaître les fréquences propres du système, voir Figure 12.

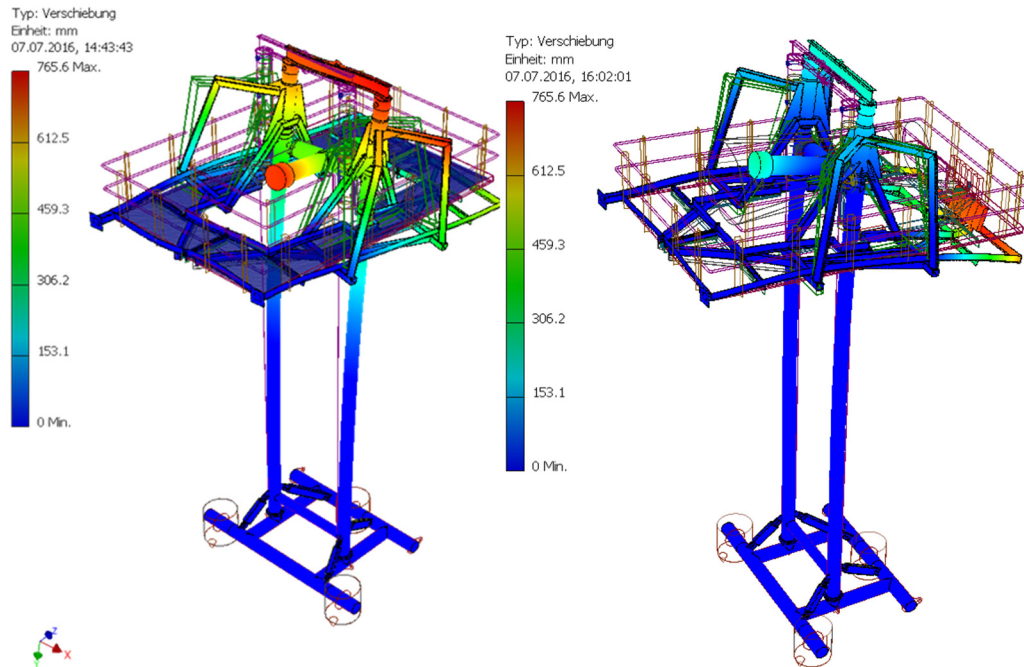


Figure 12 Simulations numériques des déformations de la plateforme, réf [3].

Choix de la génératrice

La génératrice sélectionnée est une génératrice synchrone à aimants permanents avec 3 paires de pôles, d'une puissance nominale de 2.4 kW pour une vitesse de rotation nominale de $1'000 \text{ min}^{-1}$ fournie par la société Phase Automation. Cette génératrice a été choisie avec une vitesse nominale élevée afin d'avoir un couple plus faible et une taille réduite. Un réducteur est utilisé entre la roue de la turbine et la génératrice car la roue de la turbine tourne à une vitesse de 74 min^{-1} pour une vitesse de l'eau de 1.7 m.s^{-1} . Afin d'évaluer ses performances, la génératrice a été montée sur le banc de test du laboratoire de machines électriques de la HES-SO Valais-Wallis, voir **Figure 13**.



Figure 13 Photos du montage du moteur de l'hydrolienne sur le banc de test du laboratoire de machines électriques, réf [8].



Les résultats des mesures ont été représentés sur la **Figure 14**, le graphique de gauche représente le couple de la génératrice en fonction du courant qui la traverse et le graphique de droite représente le rendement en fonction de la puissance électrique.

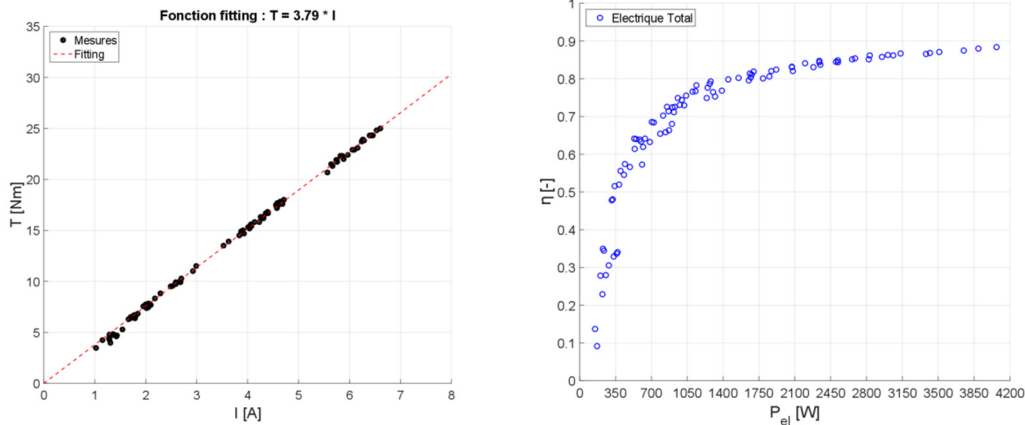


Figure 14 Mesures sur la génératrice : à gauche, couple en fonction du courant ; à droite, rendement en fonction de la puissance électrique.

Tous les points mesurés de la figure de gauche sont alignés sur une droite car il y a une relation linéaire entre le couple et le courant. La pente de cette droite correspond à la constante de couple K_T de la génératrice. Cela permet de retrouver le couple sur la génératrice en mesurant le courant dans le moteur. Le graphique de droite représente le rendement électrique total en fonction de la puissance électrique de la génératrice. Le rendement électrique total comprend le rendement de la génératrice ainsi que le rendement de l'électronique de puissance.

Ces résultats vont permettre de retrouver indirectement le rendement de la turbine à partir des mesures de courant et de puissance qui seront réalisées sur le site pilote.

Choix pour l'électronique de puissance

Pour l'électronique de puissance, le choix s'est porté sur deux convertisseurs de la société Emerson du type M700, l'un contrôlant la génératrice, l'autre permettant de faire l'injection du courant sur le réseau. Ces convertisseurs communiquent avec l'utilisateur directement au travers d'une interface dédiée pour la programmation de chacun des convertisseurs ou via le protocole Modbus pour la modification de paramètres lors de l'exploitation. La communication par Modbus sera utilisée dans le programme LabVIEW qui contrôlera l'ensemble du système. Des sécurités mécaniques et électriques empêchent le démarrage incorrect des convertisseurs. En effet, le convertisseur contrôlant le moteur ne doit pas pouvoir être activé tant que le convertisseur permettant l'injection du courant dans le réseau est actif.

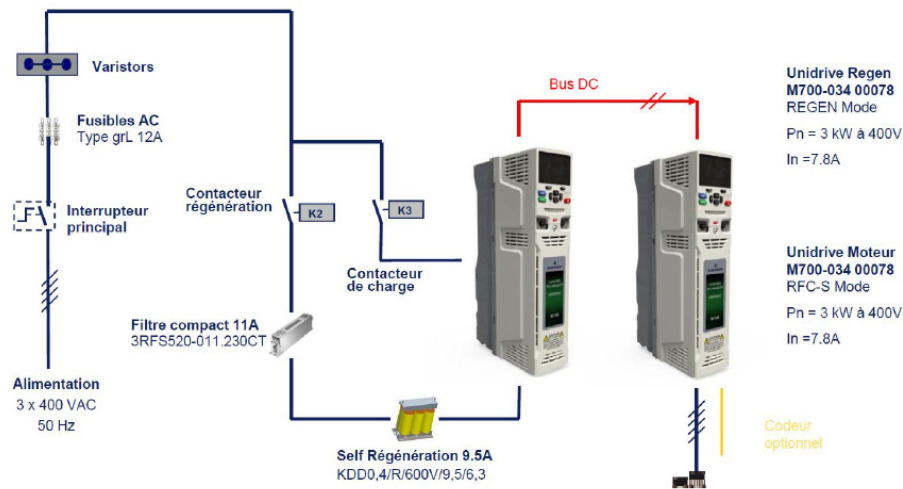


Figure 15 Schéma de principe de l'électronique de puissance pour l'hydrolienne.

Le schéma de la **Figure 15** montre l'emplacement des principaux composants pour le câblage électrique. Ceux-ci nous ont été fournis directement par le fabricant des convertisseurs à l'exception des contacteurs et de l'interrupteur principal.

Une armoire a été conçue pour intégrer ces différents éléments, le schéma de raccordement de l'électronique de puissance fourni par le fabricant des convertisseurs est présenté sur la **Figure 16**. Sur la gauche, le schéma définit le raccordement pour le convertisseur permettant la réinjection du courant sur le réseau. Sur la droite, il s'agit du convertisseur contrôlant la génératrice. Entre les deux convertisseurs la puissance transite par un bus DC. Un signal de commande relie les deux convertisseurs et garanti que la séquence de démarrage soit correcte. Le câblage des contacteurs est réalisé de telle sorte que les deux contacteurs ne peuvent être actif en même temps car cela aurait comme conséquence d'endommager le convertisseur couplé au réseau qui réalise l'injection du courant. Dans cette armoire, une partie de l'acquisition des mesures des différentes grandeurs utiles sera aussi montée.

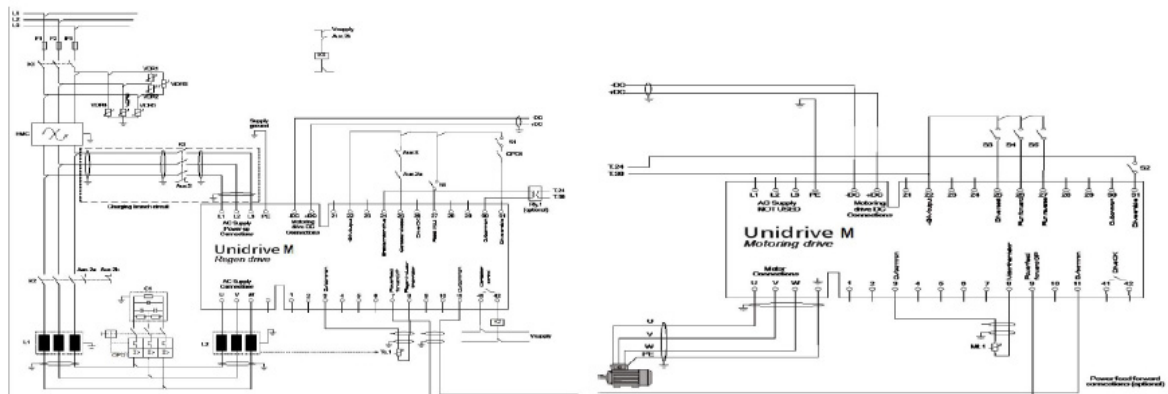


Figure 16 Schéma de raccordement de l'électronique de puissance.



Choix de l'instrumentation

L'objectif principal de ce projet est d'évaluer les performances de ce premier prototype d'hydrolenne. Différentes grandeurs vont ainsi être mesurées afin de calculer le coefficient de puissance défini par l'équation (1) pour la plage de fonctionnement de la machine puis les performances globales du système de génération d'électricité incluant la génératrice et l'électronique de puissance.

Les grandeurs principales suivantes vont ainsi être mesurées :

1. La vitesse d'écoulement de référence en amont de la machine : cette grandeur permet de calculer la puissance hydraulique disponible
2. La vitesse de rotation de la turbine : cette grandeur est utilisée pour calculer la puissance mécanique
3. Le couple mécanique de la turbine : cette grandeur est également utilisée pour calculer la puissance mécanique
4. La puissance électrique de la génératrice
5. La puissance électrique injectée sur le réseau.

L'instrumentation principale permettant d'effectuer ces mesures comporte les éléments suivants :

1. Système ADCP Teledyne RD Instruments pour mesurer le champ de vitesse de l'écoulement en amont de la machine.
2. Codeur incrémental Heidenhain ECN 1325 permettant de mesurer la vitesse de rotation de la génératrice nécessaire à la régulation et au calcul de la puissance mécanique.
3. Pincés ampérométriques permettant de mesurer le couple mécanique de manière indirecte. La grandeur mesurée sera la valeur true-rms de la fluctuation du courant électrique de la génératrice, directement proportionnelle au couple mécanique. À partir des mesures de performance effectuées préalablement en laboratoire, le couple mécanique sur l'arbre de la roue pourra être déduit.
4. Sondes de haute tension permettant, ensemble avec les mesures de fluctuation du courant, de mesurer la puissance électrique de la génératrice.
5. Pincés ampérométriques et sondes de haute tension permettant de mesurer la puissance électrique injectée sur le réseau.



Figure 17 Appareil de mesure du champ de vitesse : Petit catamaran équipée d'un système ADCP de mesure et d'un transmetteur de données à distance par Bluetooth.



En plus de ces mesures, plusieurs capteurs viendront assurer la sécurité des différents composants de la machine et donner les conditions exactes de test :

- Capteurs d'humidité relative et de température (LinPicco Basic A420-G) fixés dans la carcasse de la génératrice, permettant de détecter des éventuelles fuites accidentelles.
- Capteurs de température PT100 et KTY84 installés dans le bobinage du stator de la génératrice, permettant de surveiller et de protéger la machine électrique d'une éventuelle surchauffe qui pourrait l'endommager.
- Inclinomètre à 3-axes (JW24F14) permettant de repérer la position exacte de la turbine une fois immergée dans le canal.
- Capteur de température (Jumo VibroTemp PT100) fixé sur le carénage, permettant de mesurer la température de l'eau dans le canal.
- Capteur de pression relative (TransInstruments 2000 Series) fixé également sur le carénage, permettant de mesurer le niveau d'implantation de la machine.

Le système de contrôle et d'acquisition de données sera composé de :

- Un automate programmable NI cRIO 9035 équipé avec différents modules d'acquisition permettant d'effectuer les mesures à haute vitesse de tension et de courant sur la génératrice ainsi que les valeurs des capteurs additionnels équipant la machine.
- Une interface de contrôle et acquisition des données Teledyne, permettant de mesurer la vitesse de l'écoulement en amont de la machine.
- Une interface globale de contrôle et acquisition des données LabVIEW permettant de relier toutes les grandeurs mesurées par les différents systèmes de mesures et de les enregistrer dans une base de données unique.



Fabrication mécanique et montage

Les différents éléments composant la plateforme ainsi qu'une partie de la turbine ont été réalisés par l'entreprise Stahleinbau GmbH, partenaire du projet.



Figure 18 Fabrication et montage de la plateforme sur le site de l'entreprise Stahleinbau AG. 27.09.2016.

La roue de la turbine a été fabriquée par fonderie DGP. Ce processus consiste à concevoir un moule par impression 3D et à couler le matériau à l'intérieur de ce moule. La roue de l'hydrolienne est fabriquée en aluminium et pèse moins de 17 kg.



Figure 19 Photo de la roue fabriquée par Metalys AG.

Le montage du prototype a été réalisé en partie chez Stahleinbau GmbH. Des essais ont été réalisés pour vérifier le bon fonctionnement de l'ensemble avant la mise en eau. La plateforme a ensuite été transportée et installée sur site le 23 novembre 2016, voir **Figure 20**. La société Swiss-SIT s'est chargée de mettre en place un Plan Hygiène et Sécurité en collaboration avec Stahleinbau GmbH, Motec et la HES-SO Valais-Wallis. La machine a ensuite été transportée sur le site le mercredi 7 décembre 2017, voir **Figure 21**.



Figure 20 Installation de la plateforme sur le site de Lavey le 23.11.2016.

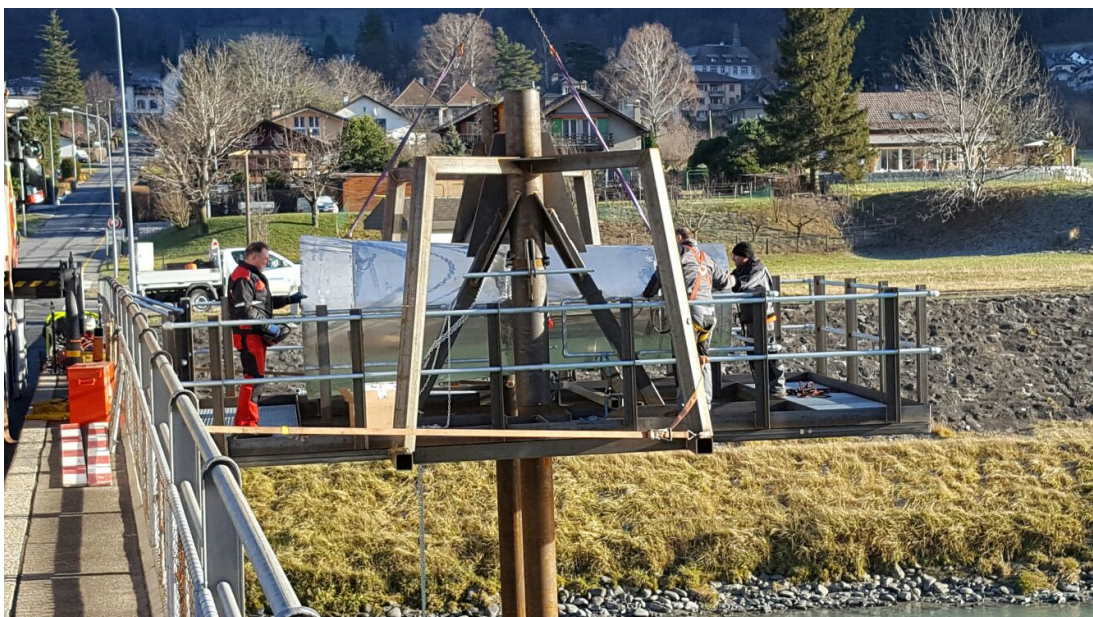


Figure 21 Installation de la turbine iso-cinétique sur la plateforme le 7.12.2016.



Résultats

Mesures sur site

Les performances attendues pour l'hydrolienne développée dans le cadre de ce projet sont indiquées sur la **Figure 22**.

Expected Turbine Characteristics		
	Full-load	Nominal
C_∞	$1.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	$1.47 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
P_h	1'930 W	1'247 W
λ		2.65
C_p		0.85
P_{mec}	1'640 W	1'060 W
N_r	86 min^{-1}	74.4 min^{-1}
N_g	$1'376 \text{ min}^{-1}$	$1'190 \text{ min}^{-1}$
P_{elec}	1'148 W	742 W

Figure 22 Performances attendues de l'hydrolienne.

1.1. Principe

Afin de mesurer le coefficient de puissance de l'hydrolienne en fonction du facteur de vitesse, différentes grandeurs ont été mesurées en laboratoire à la HES-SO Valais-Wallis et d'autres sur site, voir **Figure 23**. Les capteurs utilisés pour ces mesures ainsi que leur plage de fonctionnement et leur précision sont indiqués dans la **Figure 24**.

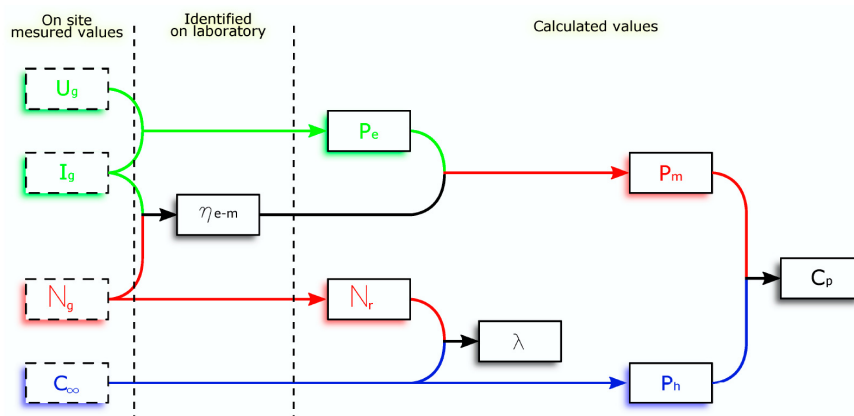


Figure 23 Schématisation du principe de mesure de performances de l'hydrolienne, réf [10].

Measured Quantity	Sensor Type	Range	Accuracy
Reference velocity (C_∞)	Teledyne Workhorse 1200 kHz ADCP system	± 5 [m/s]	± 0.3 [%] of water velocity relative to ADCP
Electrical power (P_e)	Zimmer LMG670 precision electrical multimeter	0.1000 [Vtrms] 0.32 [Atrms]	± 0.015 [%]
Mechanical torque (T_r)	NCTE 3000 torque meter	± 250 [Nm]	± 0.02 [%]
Current (I_g)	LEM IT 60-S ULTRASTAB current transducer	60 [Atrms]	± 0.02725 [%]
Voltage (U_g)	LEM CV 3-1000 voltage transducer	1000 [Vtrms]	± 0.2 [%]
Rotational speed (N_g)	Heidenhain ECN 1325 encoder	0.12000 [min^{-1}]	2048 [ppr]
Water depth	Endress&Hauser Cerabat T PMC131 relative pressure sensor	0.2 [bar]	± 0.5 [%]
Water temperature	Endress&Hauser Easytemp TMR31 sensor	0.100 [$^{\circ}\text{C}$]	± 0.1 [%]
Tilt	DIS Sensors QG40N-KXYZ-12,0-AI-PT 3-axis acceleration sensor	± 12 [g]	± 0.12 [g]
Data acquisition and control			
Teledyne RD Instruments ADCP system		- Dedicated to the values of the reference velocity	
NI CompactRIO 9035 controller		- Dedicated to the values of the prototype	

Figure 24 Caractéristiques des capteurs utilisés, réf [10]

1.2. Performance de l'hydrolienne

L'étude expérimentale du comportement de l'hydrolienne dans le canal de fuite de Lavey a pour but de confirmer les performances prédites par la simulation numérique. En raison de la section transversale limitée des canaux artificiels, il pourrait être délicat pour la simulation numérique de prédire efficacement l'effet de blocage de l'hydrolienne sur l'écoulement en surface libre. Au cours des différentes campagnes, le débit sur le site pilote a varié en raison de la variation naturelle du Rhône et des conditions de fonctionnement de la centrale en amont, ce qui nous a permis d'explorer toute la plage de fonctionnement de la machine. De plus, les influences de la profondeur de la turbine et de l'angle d'inclinaison de l'axe de la turbine ont été étudiées grâce aux degrés de liberté de la plateforme, voir **Figure 25**.

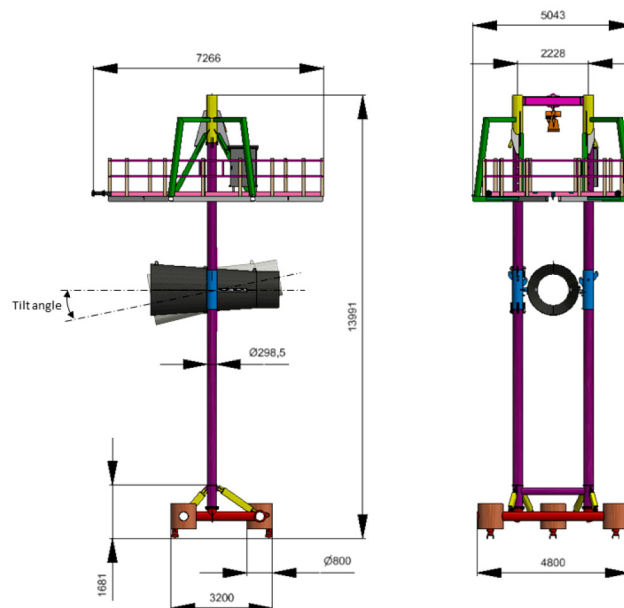


Figure 25 Plateforme d'essai de l'hydrolienne et ses degrés de liberté, réf [10].



1.2.1. Influence de la profondeur

Grâce à une structure adaptée de la plateforme d'essai, la profondeur d'implantation de la turbine dans le canal de fuite peut varier entre 1 m et 2.5 m par rapport au niveau de la surface libre. Sur la **Figure 26** à gauche, le coefficient de puissance de l'hydrolienne est représenté en fonction du facteur de vitesse pour trois profondeurs différentes dans le cas d'une incidence nulle. Les valeurs maximales mesurées de C_p , définies par les équations (1) et (2), à une profondeur de 2.5 m sont utilisées comme référence pour normaliser les valeurs du coefficient de puissance et du facteur de vitesse. Par rapport à la performance attendue au moment du dimensionnement de l'hydrolienne indiquée par un point gris, le coefficient de puissance maximal mesuré est très proche de cette valeur, le facteur de vitesse correspondant est un peu inférieur.

D'après les mesures, les performances sont meilleures quand la machine est installée à la plus grande profondeur. Ce résultat peut sembler surprenant. A priori, selon la forme du profil de vitesse dans un écoulement à surface libre, le résultat attendu serait d'avoir de meilleures performances proche de la surface libre. Une des explications est liée à l'effet de blocage local de la plateforme, en particulier des pieds de la plateforme. Cet effet est observé pour les deux incidences considérées, voir **Figure 26** de droite.

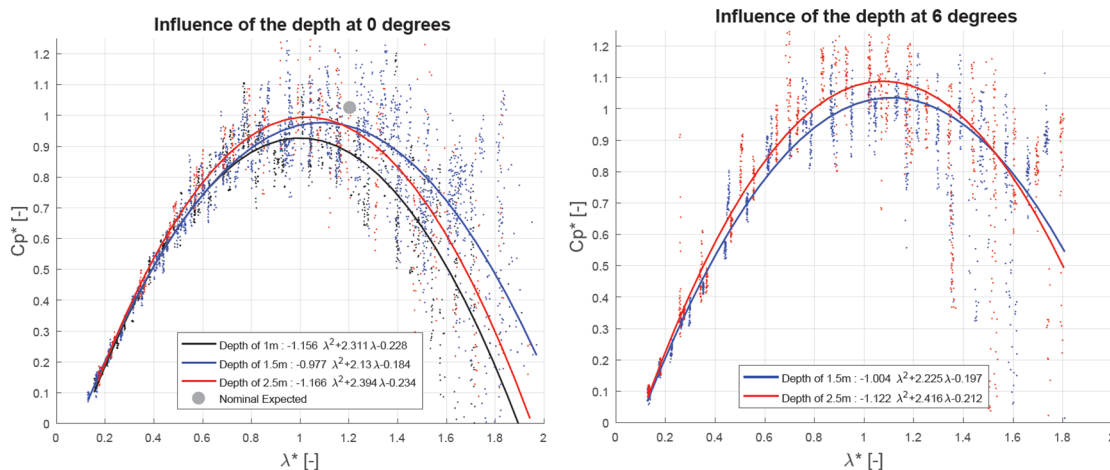


Figure 26 Influence de la profondeur sur les performances de la turbine en fonction du facteur de vitesse pour deux valeurs d'incidence, réf [10].

Sur la **Figure 27**, le coefficient de puissance normalisé est représenté en fonction de la vitesse de l'écoulement loin en amont et de la vitesse de rotation de la roue. On observe que les performances sont maximales pour une vitesse de rotation de la roue entre 40 min^{-1} et 80 min^{-1} . Pour une profondeur de 1.5 m, le coefficient de puissance est maximale pour une vitesse d'écoulement de 1.5 m.s^{-1} et une vitesse de rotation de la roue de 70 min^{-1} , ce qui correspond aux valeurs visées lors du dimensionnement, voir **Figure 22**.

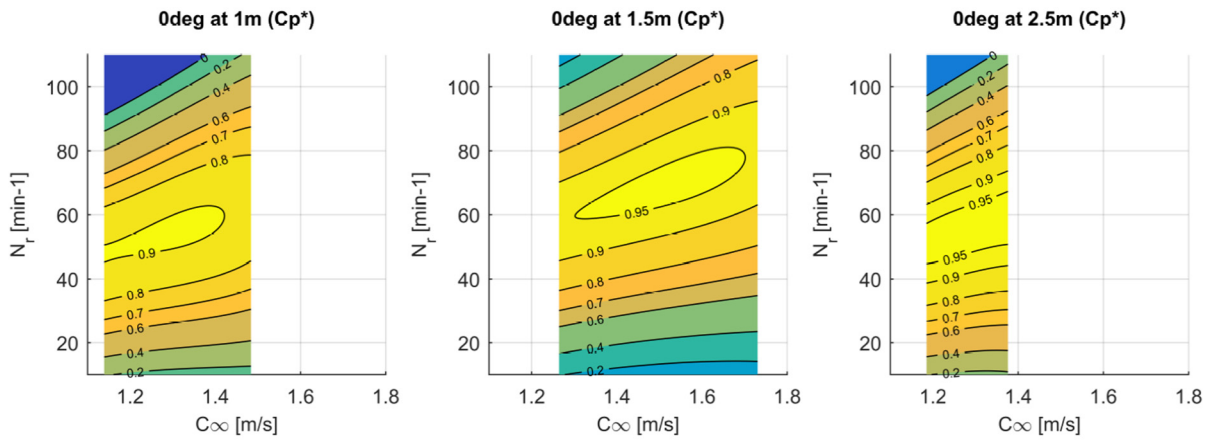


Figure 27 Influence de la profondeur sur les performance de la turbine en fonction de la vitesse de l'écoulement et la vitesse de rotation de la roue, réf [10].

1.2.2. Influence de l'inclinaison

Lors de cette étude, l'influence d'un deuxième degré de liberté a été étudiée : l'influence de l'incidence de l'axe de la machine, définie sur la **Figure 25**, qui varie entre 0° et 10°. Sur la **Figure 28**, le coefficient de performance en fonction du facteur de vitesse pour deux profondeurs et quatre valeurs d'incidence est représenté.

À une profondeur de 1.5 m, plus l'incidence augmente, plus le coefficient de performance augmente pour une valeur de facteur de puissance quasi-constante. À une profondeur de 2.5 m, la même tendance peut être observée, une augmentation de plus de 10% est atteinte pour une incidence de 10°.

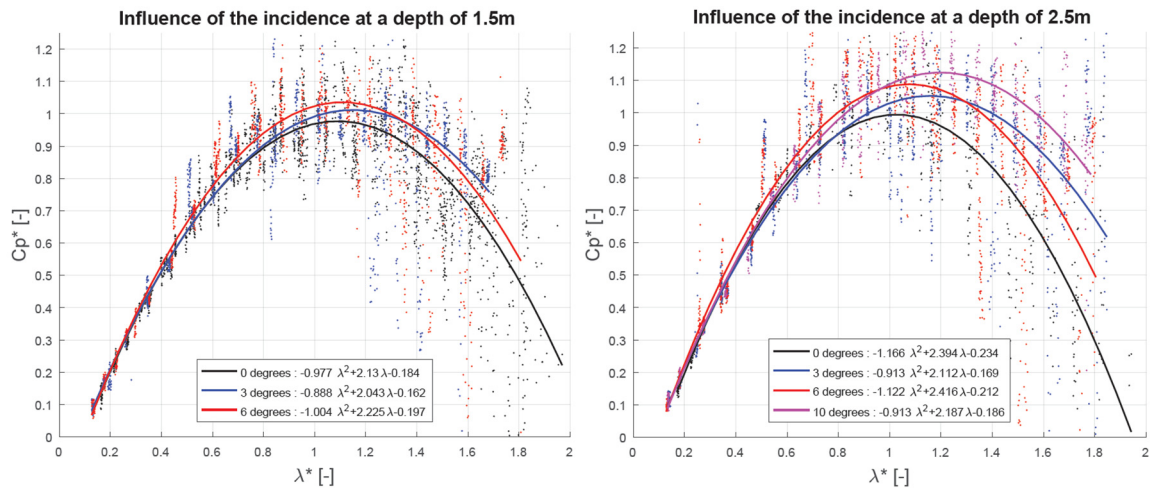


Figure 28 Performances de la turbine avec l'influence de l'inclinaison, réf [10].



Sur la **Figure 29** est représenté le coefficient de puissance de l'hydrolienne à une profondeur de 1.5 m en fonction de la vitesse loin en amont et de la vitesse de rotation de la roue. Le maximum est observé pour l'incidence maximale testée de 6°.

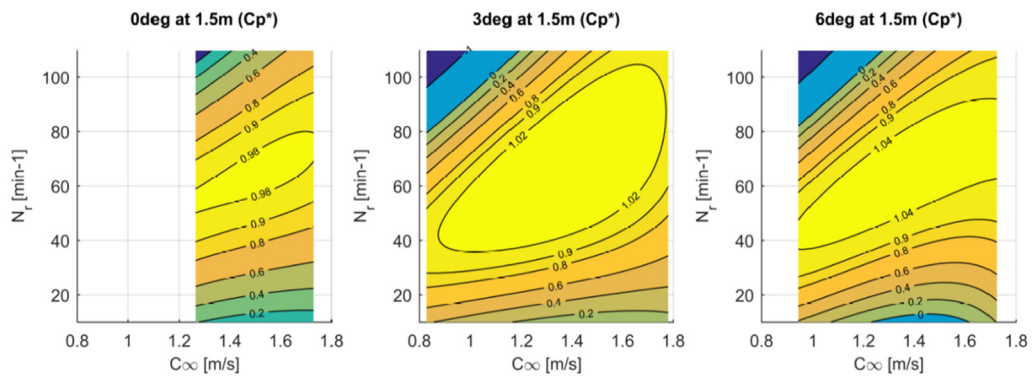


Figure 29 Influence de l'inclinaison sur les performances de la turbine en fonction de la vitesse de l'écoulement et la vitesse de rotation de la roue, réf [10].

1.2.3. Choix du pilotage de la vitesse

Afin de réduire les coûts de la machine, une des possibilités serait de fonctionner à vitesse de rotation fixe. Ceci impliquerait que lorsque la vitesse du courant loin en amont varie, la vitesse de rotation de la turbine ne s'adapterait pas et le facteur de vitesse s'éloignerait du meilleur point de fonctionnement. Afin d'évaluer le gain lié à la vitesse variable, une estimation de la production annuelle de l'hydrolienne avec et sans vitesse variable a été réalisée en utilisant les données de débits de l'année 2017 de la centrale hydroélectrique de Lavey.

La différence fondamentale entre le choix de fonctionner à une vitesse fixe ou à une vitesse variable réside dans le choix du type de génératrice utilisé (asynchrone–synchrone) et donc du pilotage de celle-ci.

Pour cette estimation de production, la vitesse fixe est basée sur la courbe du coefficient de puissance C_p obtenue par les différentes campagnes de mesure réalisées en 2017 et 2018. La vitesse nominale de l'écoulement considérée est de 1.4 m/s ce qui représente 16% de la plage des vitesses de l'année 2017. Pour la vitesse variable, on considère l'implémentation d'un MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui permet de maintenir le facteur de vitesse et donc le coefficient de puissance C_p à sa valeur optimale de 0.85.

Trois scénarii sont considérés, voir **Tableau 1** :

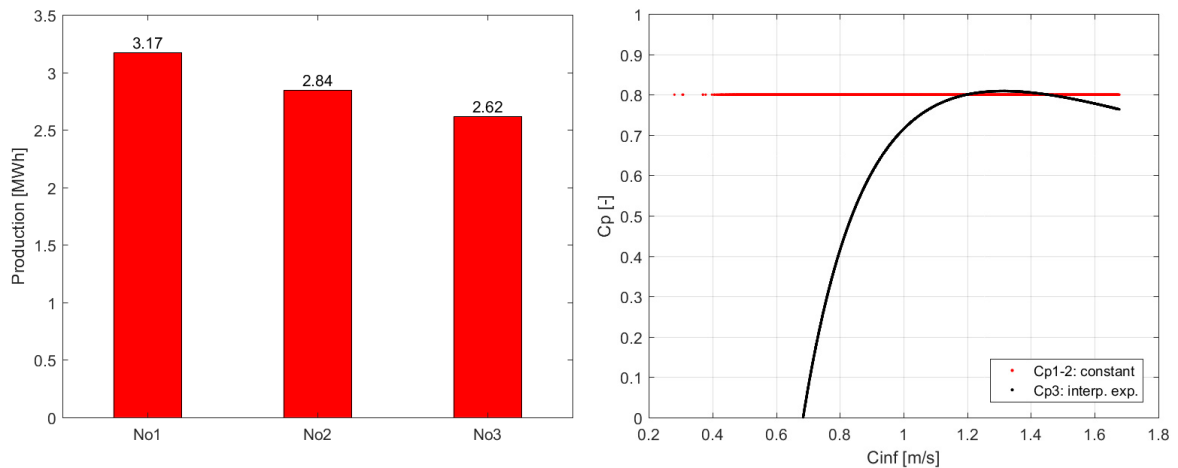
- Fonctionnement avec vitesse **variable** en produisant durant toute l'année 2017, c'est-à-dire en turbinant toute la plage de vitesse.
- Fonctionnement avec vitesse **variable** en produisant une partie de l'année 2017 seulement, c'est-à-dire en turbinant uniquement le courant lorsque $C_\infty \geq 0.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.
- Fonctionnement avec vitesse **fixe** en produisant une partie de l'année 2017 seulement, c'est-à-dire en turbinant uniquement le courant lorsque $C_\infty \geq 0.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

**Tableau 1** Définition des différents scénarios.

	<i>Pilotage</i>	<i>Cp [-]</i>	<i>Gamme de vitesse [m/s]</i>
Scénario N°1	MPPT	0.85	$0 \leq C_{\infty} \leq +\infty$
Scénario N°2	MPPT	0.85	$C_{\infty} \geq 0.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.
Scénario N°3	Fixe	Interpolation exponentielle	$C_{\infty} \geq 0.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Sur la **Figure 30** à droite, la valeur du coefficient de puissance pour les différents scénarii est représentée. A vitesse variable, on maintient la valeur du C_p à 0.85 ; à vitesse fixe, le coefficient de puissance chute pour les écoulements à faible vitesse.

Sur la **Figure 30** à gauche, une estimation de la production sur l'année 2017 est réalisée pour les trois scénarii. La production maximale d'une turbine de 1 kW sur l'année 2017 est de 3.17 MWh dans le scénario 1. Pour les scénarii 2 et 3, on observe une diminution de la production de respectivement 10% et 17%.

**Figure 30** Production des différents scénarios 2017 (1kW) (gauche). Courbes caractéristiques du coefficient de puissance pour les différents scénarios (droite).

La vitesse variable de la turbine est donc un atout pour optimiser la production. De plus, aucun gain économique intéressant ne peut être fait en utilisant un autre type de générateur à vitesse fixe. Certains de ces générateurs demandent une maintenance régulière, impose une excitatrice et un encombrement non négligeable. Le choix de garder la vitesse variable a pu être ainsi fait.



1.2.4. Test d'endurance de l'hydrolienne 1 kW

Afin d'étudier le comportement de la turbine sur une durée plus longue que la demi-journée nécessaire pour réaliser des mesures en fixant les degrés de liberté de la plateforme, deux semaines de test ont été réalisées en continue durant l'été 2018 à vitesse fixe.

Performance

Les tests d'endurances ont pour but de déterminer les faiblesses et les forces de la machine actuelle. La durée de ces tests a été limitée par des séquences d'une semaine. Ces tests ont démontré le comportement mécanique de la machine ainsi que de l'électronique sur une période plus grande que la durée des tests de performance effectués lors de l'année 2017. La **Figure 31** illustre la production de l'hydrolienne sur 4 jours de test non-stop durant la période à fort débit (centrale de Lavey à pleine puissance). La vitesse de l'écoulement se situe entre $1.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et $1.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. La turbine est pilotée avec une consigne de vitesse fixe de $1'040 \text{ min}^{-1}$ pour la génératrice ce qui correspond à la vitesse optimale pour une vitesse à l'amont de l'écoulement de $1.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

La turbine a fonctionné durant un total de 380 heures en comptabilisant les trois semaines de tests ainsi que toutes les journées de tests de l'année 2017. La production enregistrée totale est de 240 kWh sur une plage de fonctionnement de 380 heures. En supprimant les 58 heures où la turbine a tourné à la vitesse d'emballement, la moyenne de production correspond à une puissance moyenne de 992 W.

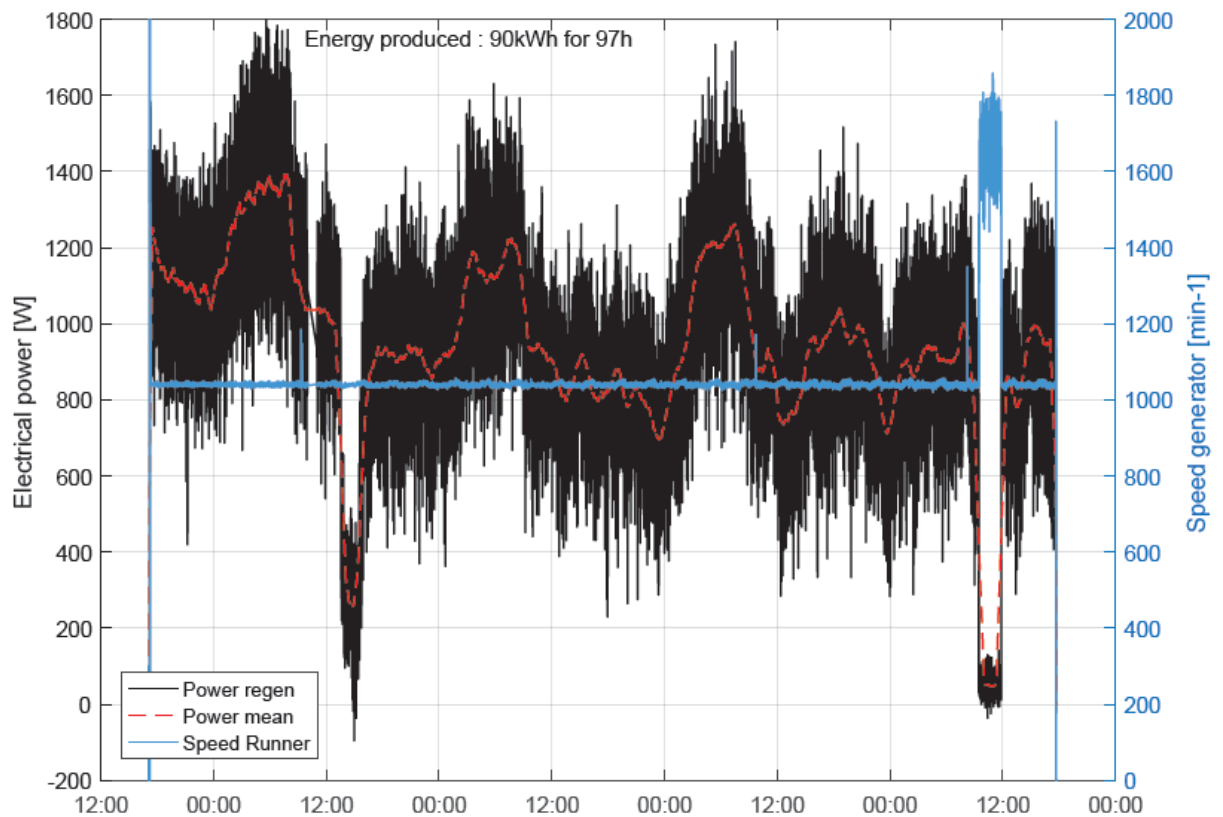


Figure 31 Courbe de production de l'hydrolienne durant 4 jours ainsi que la vitesse de rotation de la génératrice.

Rapport technique

Suite à ces tests, il n'est pas encore possible de valider la robustesse et la fiabilité de la machine actuelle mais cela a permis d'avoir un aperçu sur le comportement des différents dispositifs de l'hydrolienne actuelle.

Les observations pour la partie mécanique :

- Système d'accouplement par cône de l'encodeur absolu doit être précis. Les vibrations importantes à vitesse libre ont engendré des problèmes sur l'encodeur lui-même du fait d'un mal rond observé lors du montage.
- L'étanchéité générale des dispositifs (O-ring, garniture mécanique) est bonne.
- Signe de vibration au niveau de l'accouplement de la roue.

Les observations pour la partie électronique :

- Nombreuses erreurs du Drive-Regen qui n'ont pas pu être déterminées avec exactitude.
- Erreur récurrente de l'encodeur incrémental absolu.

Il est difficile de trouver la source exacte des problèmes observés lors des tests d'endurance. Par ailleurs, les vibrations engendrées par la vitesse d'emballement ont pu jouer un rôle majeur dans la dégradation accélérée de l'encodeur incrémental. La source du décrochage fréquent de la machine n'a pas été trouvée mais cela a démontré que l'implémentation d'un contrôle rigoureux au niveau de l'électronique est indispensable ainsi que la mise en place d'une accessibilité simple aux composants électroniques. On a observé une accumulation de la flore environnementale sur la machine, principalement sur le bord du convergent et les supports de fixation du bulbe (**Figure 32**). Les sédiments sont très fins et s'infiltrent dans toutes les cavités possibles, dont en particulier le bulbe (**Figure 32**). Par ailleurs, l'étanchéité des différents dispositifs de la machine est bonne.



Figure 32 Illustration de l'impact de l'environnement sur l'hydrolienne (algue, herbe, sédiment), réf [13].



Pré-étude d'une ferme d'hydroliennes

1.3. Hydrolienne 3 kW

1.3.1. Caractéristiques

La campagne de simulation numérique pour déterminer la meilleure configuration pour les machines dans le canal ainsi que la faisabilité économique démontrent que le choix d'un nombre de machines réduit avec une dimension plus grande est nettement plus adéquat. Le **Tableau 2** illustre les caractéristiques techniques entre la machine actuelle de 1 kW et celle avec un facteur d'échelle de 1.6 d'une puissance de 3 kW.

Tableau 2 Caractéristiques de la turbine 1 kW et 3 kW.

Turbine actuelle 1kW					Turbine 3kW				
	Nominal	Full load	Max			Nominal	Full load	Max	
Cinf	1.47	1.7	1.9	<i>m/s</i>	Cinf	1.47	1.7	1.9	<i>m/s</i>
Puissance hyd.	1247	1929	2694	<i>W</i>	Puissance hyd.	3193	4939	6895	<i>W</i>
Lambda	2.65			-	Lambda	2.65			-
Cp	0.85			-	Cp	0.85			-
Puissance mec.	1060	1640	2289	<i>W</i>	Puissance mec.	2714	4198	5861	<i>W</i>
Nroue	74.4	86	96	<i>tr/min</i>	Nroue	46.5	53.8	60	<i>tr/min</i>
Ngen	1190.4	1376	1539	<i>tr/min</i>	Ngen	744.0	860.4	962	<i>tr/min</i>
Eta elec.	0.7	0.7	0.7	-	Eta elec.	0.7	0.7	0.7	-
Puissance élec.	742	1148	1603	<i>W</i>	Puissance élec.	1900	2939	4103	<i>W</i>
Rayon roue	0.5			<i>m</i>	Rayon roue	0.8			<i>m</i>
Torque roue	137	193	227	<i>Nm</i>	Torque roue	557	746	931	<i>Nm</i>
Diam. entrée	1.128			<i>m</i>	Diam. entrée	1.80			<i>m</i>
Diam. sortie	1.6			<i>m</i>	Diam. sortie	2.56			<i>m</i>
Longeur totale	4.07			<i>m</i>	Longeur totale	6.51			<i>m</i>
S canal	136			<i>m²</i>	S canal	136			<i>m²</i>
S machines (7x)	18.27			<i>m²</i>	S machine (3x)	19.04			<i>m²</i>
Rapport blocage	13.4			%	Rapport blocage	14.0			%
Poids carénage	840			<i>kg</i>	Poids carénage	2150			<i>kg</i>
Poids dispositif mec.	160			<i>kg</i>	Poids dispositif mec.	655.36			<i>kg</i>
Poids total	1000			<i>kg</i>	Poids total	2805.36			<i>kg</i>
Force trainée (0°)	1738	2324	4536	<i>N</i>	Force trainée (0°)	4449	5950	7433	<i>N</i>
Longeur couple	1.0			<i>m</i>	Longeur couple	1.3			<i>m</i>
Moment induit	1738	2324	4536	<i>Nm</i>	Moment induit	5784	7735	9662	<i>Nm</i>
Puissance ferme	5.2	8.0	11.2	<i>kW</i>	Puissance ferme	5.7	8.8	12.3	<i>kW</i>
Temps fonct. (>1m/s)	3500			<i>h</i>	Temps fonct. (>1m/s)	3500			<i>h</i>
Prod. annuelle	18.18	28.12	39.26	<i>MWh</i>	Prod. annuelle	19.95	30.86	43.08	<i>MWh</i>

On observe que la production annuelle est meilleure avec la machine de 3 kW.

1.3.2. Encombrement

L'encombrement des deux turbines est représenté sur la **Figure 33**.

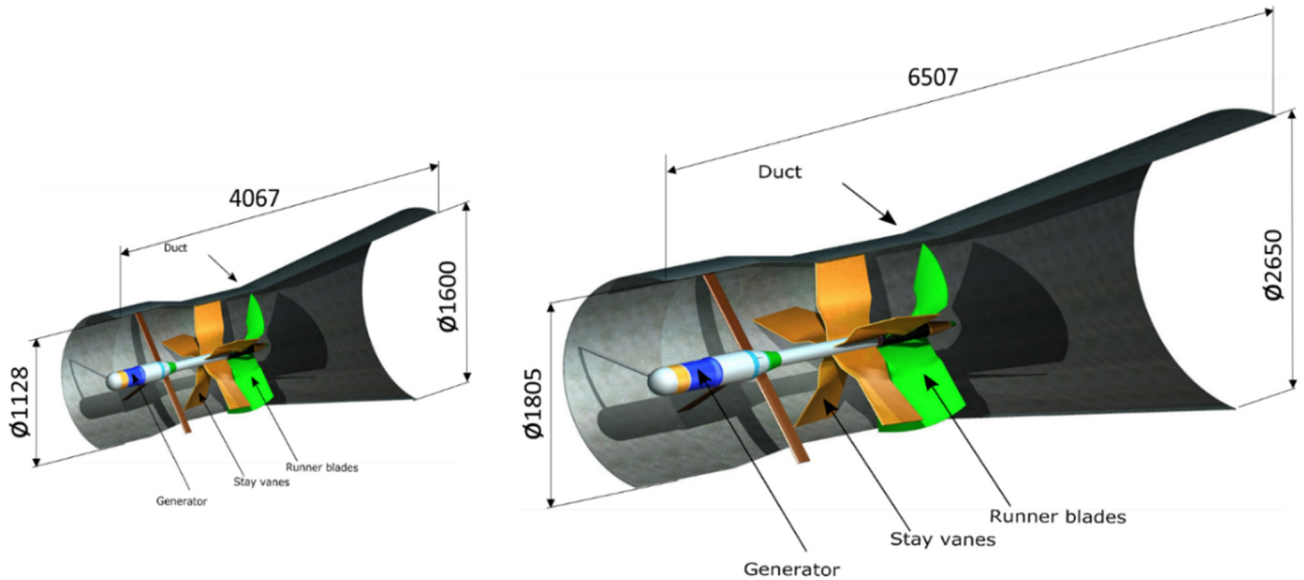


Figure 33 Représentation des dimensions de la turbine 1 kW et 3 kW.

1.3.3. Estimation des coûts

L'hydrolienne actuelle de 1 kW a été évaluée à 35'000 CHF. L'estimation du coût de la turbine 3 kW est de 46'000 CHF ce qui représente une augmentation de 30%. Ces calculs ont été réalisés à l'aide d'un facteur 1.6 pour les différentes pièces mécaniques ainsi que les heures de travail. Le prix de la roue (8'000 CHF) correspond à un devis pour une quantité supérieure à 3 pièces fondues. Le prix peut descendre jusqu'à 7'600 CHF si la quantité est supérieure à 5 pièces. Le prix de la roue représente 16% du coût total, il est donc peut-être envisageable de redéfinir une géométrie moins performante avec une technique de fabrication moins onéreuse. Une simplification au niveau du carénage a permis une économie de 5% sur le coût total ainsi que 26% sur le poids de la machine (représenté par les coûts biffés dans le **Tableau 3**).

**Tableau 3** Estimation des coûts de la turbine 3 kW.

		<i>Turbine 1 kW</i>	<i>Turbine 3 kW</i>
Roue turbine	<i>Metalyss AG</i>	5'100	8'000
Tôle inox	<i>Kiener und Wittlin AG</i>	3'170	5'072
Acier inox daim 40mm	<i>Hertsch AG</i>	138	221
Acier inox diam 163mm	<i>Hans Kohler AG</i>	123	196
Acier inox tube 80x63mm	<i>Hans Kohler AG</i>	84	135
Acier inox diam 80 // diam60.3x5.54mm	<i>Hans Kohler AG</i>	470	752
Tôle inox	<i>Kiener und Wittlin AG</i>	277	444
Tôle inox	<i>Kiener und Wittlin AG</i>	941	4505
Tôle inox	<i>Kiener und Wittlin AG</i>	470	752.59
Autres	-	1'300	2'080
Total matériel HT	-	12'500	17'000
Heures de travail (88CHF/h)	<i>Stahleinbau(165-200h)</i>	14'600	17'500
Génératrice + réducteur + Garniture + Oring + vis		7'400	11'900
Coût total		35'000	46'000

1.4. Concepts structurels d'une ferme d'hydroliennes

1.4.1. Concept ferme flottante

Concept de la structure flottante

La recherche de solution concernant la structure est basée sur les différents concepts de flottabilité des éoliennes offshore. Les trois concepts sont les suivants :

- stabilisation avec lestage
- stabilisation avec ancrage
- stabilisation par flottabilité

Comme les forages sous l'eau sont compliqués et onéreux, la stabilisation par ancrage au sol n'est pas optimale. Le concept de la ferme est basé sur le concept de la stabilité par flottaison libre ou flottaison sous précontrainte des flotteurs. La flottaison libre (**Figure 34**) est décrite par le simple effet de la poussée d'Archimède générée par le volume des flotteurs. Comme le système est libre, le système va osciller à basse fréquence, respectivement 0.63 Hz. Cette fréquence est obtenue en calculant la raideur

de la structure dans son environnement qui est l'eau (comme un ressort : $k=F/d$). Un point est à relever, cette fréquence est proche de la fréquence de la roue (~ 1 Hz).

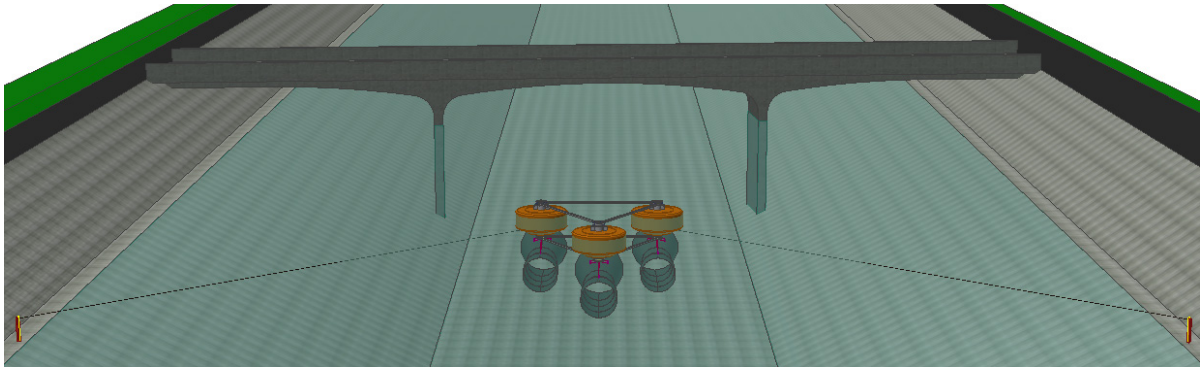


Figure 34 Ferme flottante libre 3-3 kW, réf [13].

La flottaison sous contrainte (**Figure 35**) est décrite par la mise sous contrainte du corps flotteur. Une force dans le sens inverse de la poussée est ajoutée pour rendre le système rigide dans le sens d'oscillation verticale. Le principe est d'ajouter une tige métallique en dessous et en dessus de la machine pour pouvoir la bloquer dans l'axe verticale à l'aide d'un système à câble dont l'encrage est sur les rives du canal. La tension mise sur les flotteurs permet de garder une distance verticale cible. La variation du niveau d'eau d'environ 2 mètres cause un enjeu supplémentaire, la dissociation entre l'armoire électrique et la structure elle-même.

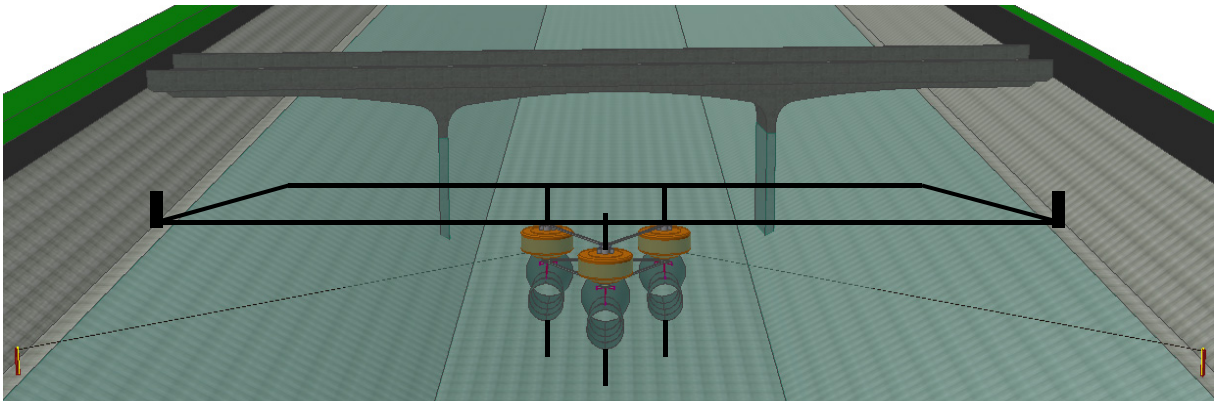


Figure 35 Ferme flottante sous contrainte 3-3 kW.

La structure complète est composée de sous-système mécanique. C'est-à-dire qu'il a été pensé de pouvoir apporter des modulations sur le nombre de machines installées dans le but d'adapter les structures complètes à différentes géométries de canaux. Le sous-système est composé d'une hydrolenne, d'un flotteur, d'une armoire électrique ainsi que d'un dispositif d'interface entre les différents sous-systèmes. Le poids d'un sous-système est de 3'900 kg et le principe est à voir sur la **Figure 36**. L'interface entre les sous-systèmes est réalisée avec des profils tubulaires carrés d'une longueur de 6 mètres (longueur type des fournisseurs). La structure complète à un poids d'environ 12 tonnes. Cette valeur correspond à la valeur cible de dimensionnement dont l'objectif est de permettre l'implantation de la ferme en une seule manœuvre à l'aide d'une grue (voir concept d'implantation).

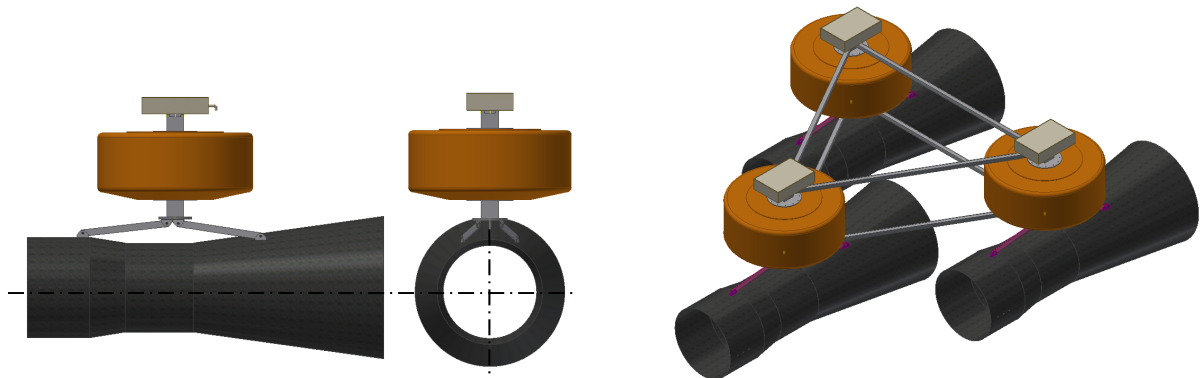


Figure 36 Sous-système mécanique (gauche) et structure mécanique complète 3-3kW (droite).

La structure triangulée (**Figure 37**) et le double étages permet de reprendre l'efforts du couple induit par les forces de trainée des différentes machines. La force de trainée de l'hydrolienne 3 kW est de 4'000 N. Cette valeur a été calculée avec la géométrie d'un cylindre ainsi qu'un facteur de correction à l'aide de la CFD.

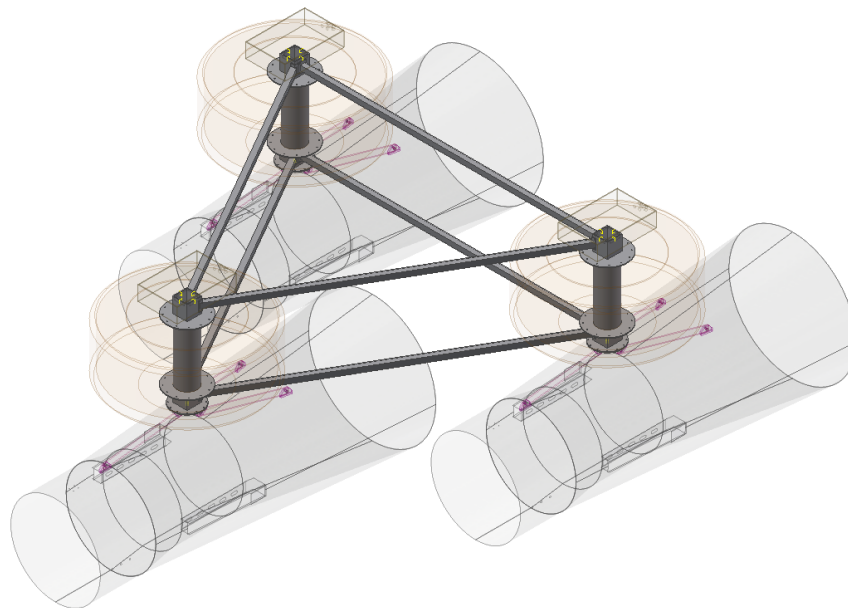


Figure 37 Concept de l'interface entre machines.

Concept d'implantation

L'implantation de la structure se réalise en trois temps. La première étape est l'assemblage des sous-systèmes sur la rive du canal. Le contrôle de fonctionnalité doit être fait à la fin du montage (rotation de la roue, pilotage du moteur). La seconde étape est le déplacement de la structure complète et l'immersion de celle-ci à l'aide d'une grue et d'un guidage par câbles. La dernière étape consiste à ramener la structure à sa position finale dans l'axe de la section du canal.

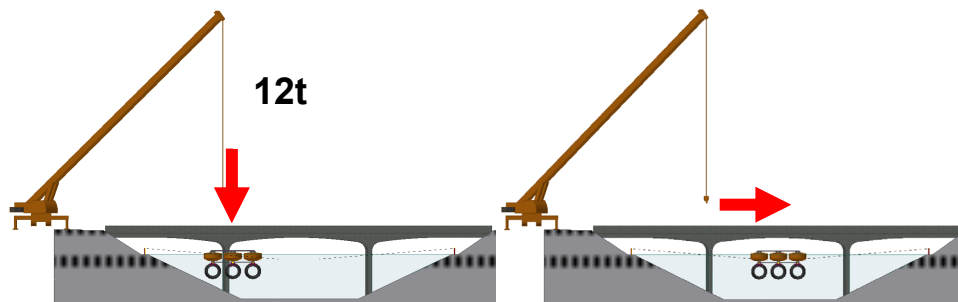


Figure 38 Implantation ferme flottante.

Estimation des coûts

L'estimation des coûts a été basée sur des devis, le prix actuel du marché de l'acier et l'expérience de la première fabrication de l'hydrolienne. Pour le concept de la ferme flottante sous contrainte, un ajout de 30'000 CHF aux coûts totaux de la ferme doit être pris en compte concernant des forages supplémentaires ainsi que la structure principalement constituée de câbles et de tendeurs.

Tableau 4 Estimation des coûts de la ferme flottante 3-3 kW.

	<i>Flotteur marché</i>	<i>Flotteur fabrication</i>	
MECANIQUE	Prix [CHF]	Prix [CHF]	Sources
Machine 3 kW	46'000	46'000	Tableau 3
Flotteurs marché	7'200	5'000	Devis
Profil tube carré acier 150x150	2'233	2'233	Debrunner
Interface turbine - machine	800	800	Prix acier
Visserie divers	200	200	Bossard.com/ch
Heures d'atelier	5'040	5'040	Stahleinbau
ELECTRONIQUE			
Composants + honoraires	2'200	2'200	Emerson
ELECTRIQUE			
Composants + honoraires	5'466.67	5'466.67	-
Total coûts par machine	71'140.00	68'941.00	
Total coûts ferme	213'420.00	206'823.00	
Total coûts ferme avec implantation	218'000.00	211'000.00	



1.4.2. Concept ferme gravitaire multiplateformes

Concept de la structure

Ce concept met en évidence, avec une simplification et certains changements, que la solution avec des plateformes de maintenance pour chacune des turbines n'est économiquement pas viable mais reste intéressante pour du développement. L'accès facilité aux turbines est un point essentiel pour la maintenance des dispositifs mécaniques.

Le concept est quasi similaire à la structure actuelle. Une plateforme d'accessibilité qui se trouve juste au-dessus du niveau d'eau, deux coulisses verticales positionnée et stabilisée par un dispositif de pieds gravitaires (voir **Figure 39**). Dû au fait d'avoir plusieurs plateformes, il n'est donc plus nécessaire de disposer de l'appui du pont en aval de la structure actuelle et donc les profils verticaux ont été réduit de 5 mètres. L'accessibilité se fait par une échelle de sécurité permettant de descendre au niveau des plateformes.

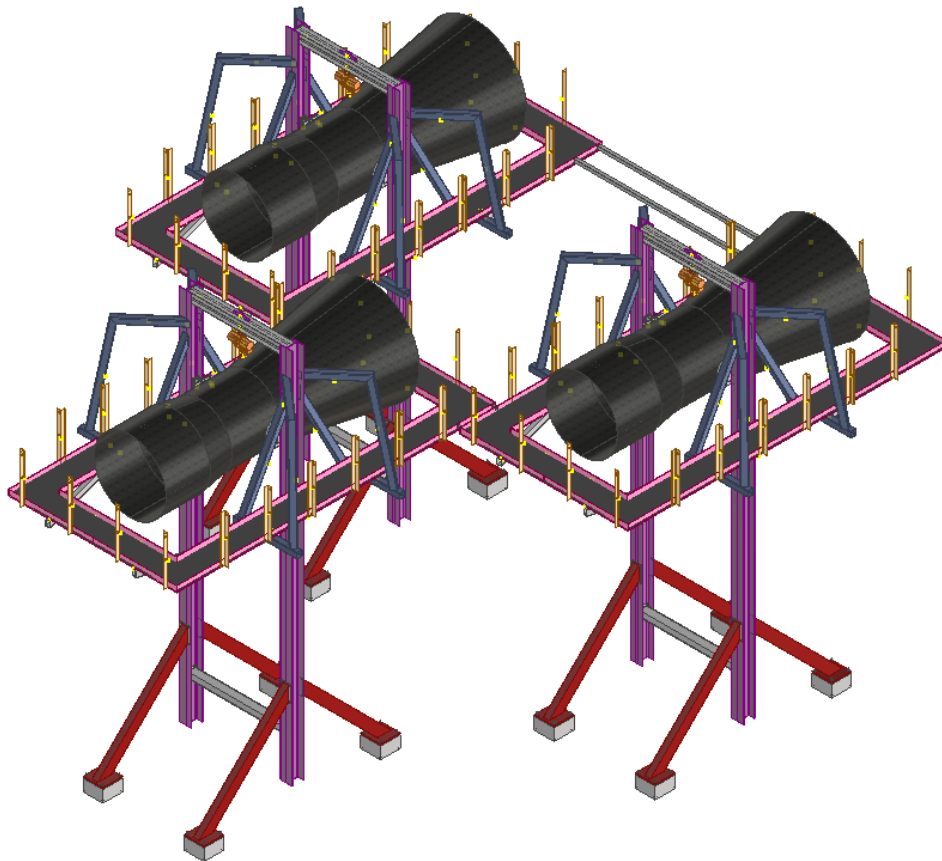


Figure 39 Concept gravitaire multiplateformes.

Le système des coulisses a été changé par un dispositif de roulette vu que les coulisses actuelles de la structure ne sont pas dimensionnées et pensées pour une immersion prolongée. L'utilisation de la force de traînée (4'000N) est utilisée pour le plaquage et la stabilité de la turbine sous l'eau. La stabilité de la structure est réalisée par la triangulation entre les passerelles elles-mêmes. Le fait de les joindre, le

passage entre les passerelles est aussi facilité. Des points d'accroches aux forages sur les berges sont gardés pour garantir une position identique dans le temps. La passerelle a été simplifiée et réduite par rapport à la passerelle actuelle (**Figure 40**).

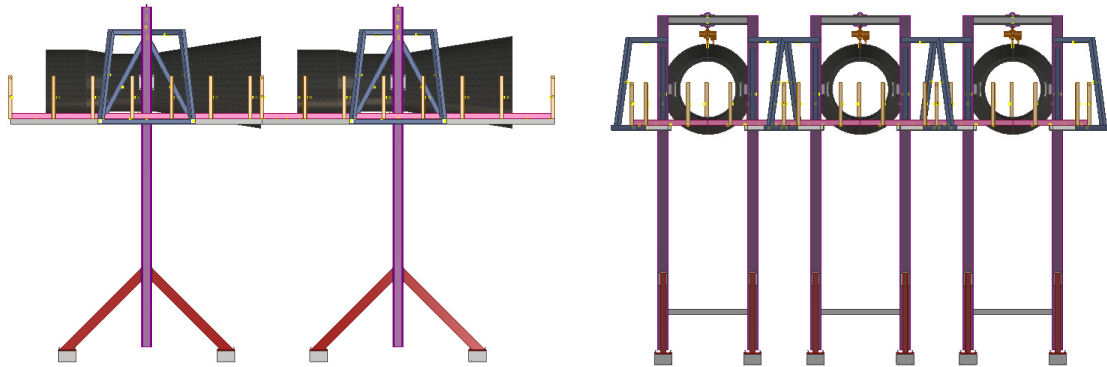


Figure 40 Concept mécanique gravitaire multiplateformes.

Tableau 5 Estimation des coûts d'une ferme gravitaire 1.

	Prix [CHF]	Références
Poutrelle	3650	<i>Debrunner</i>
Tube carré acier 250x150x6.3	2244	<i>Debrunner</i>
Tube carré acier 150x150x10	6956	<i>Debrunner</i>
Acier cornière angle 150x100x10	3180	<i>Debrunner</i>
Grille 1000x600	3960	<i>Debrunner</i>
Tube carré acier 100x150x6	1089	<i>Debrunner</i>
Divers (Acier – Palan – visserie)	3810	<i>Bossard - Debrunner</i>
Total coûts matériaux	25'000	
Estimation heures atelier	54'000	<i>Stahleinbau</i>
Total coûts structure	79'000	<i>Stahleinbau</i>
Total coûts ferme sans machine	237'000	<i>Stahleinbau</i>
Prix machine	46'000	
Total coûts	374'000	

Estimation des coûts

Les coûts estimés de la conception gravitaire avec passerelles de maintenance s'élèvent à 374'000 CHF. Ces coûts ne s'approchent pas de l'objectif visé et ne sont pas envisageable dans une démarche de commercialisation. Par ailleurs, dans le but de développer un laboratoire expérimental en grandeur



nature, cette configuration est envisageable et intéressante pour une approche de recherche et développement approfondie dans le ce domaine.

1.4.3. Concept ferme gravitaire par axe de rotation

Concept de la structure

Ce concept est focalisé sur la revalorisation de la plateforme actuelle. Une des trois hydroliennes est placée sur la plateforme tandis que les deux autres sont placées sur un autre dispositif mécanique permettant de les ramener proche de la plateforme pour une accessibilité modérée. Cette conception est une bonne alternative pour renforcer et confirmer la robustesse de l'hydrolienne. La **Figure 41** illustre les différentes possibilités du mécanisme de mobilité des hydroliennes. Une des contraintes à prendre en considération dans ce concept est la problématique de la longueur des câbles de commandes pour le drive de la génératrice.

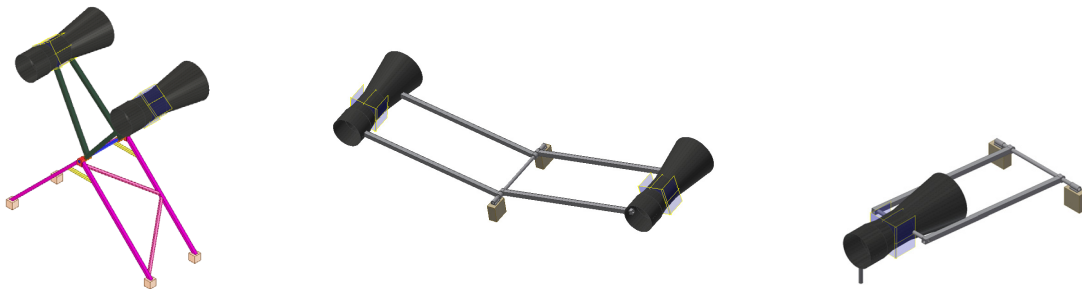


Figure 41 Concept général gravitaire par axe de rotation.

La première partie de la conception mécanique est la modification de la plateforme actuelle pour pouvoir placer la nouvelle turbine 3 kW (**Figure 42**). Pour agrandir et élargir le trou de passage, d'importantes modifications sont nécessaires puisqu'un des supports principaux de la structure doit être déplacé et ressoudé. Ces modifications ne peuvent pas être faite directement sur site.

Sur la plateforme, un système de renvoie pour permettre au treuil de ramener symétriquement les deux machines doit être ajouté à la plateforme actuelle. Sur la **Figure 43** sont représentées les différentes positions des machines en fonction du niveau du canal de fuite. Pour parvenir à limiter la longueur des câbles de contrôle de l'électronique, l'axe de rotation du dispositif mécanique est situé au dessus du niveau d'eau maximum (6 m). De plus, le moment de redressement des machines est aussi diminué dans ce cas précis.

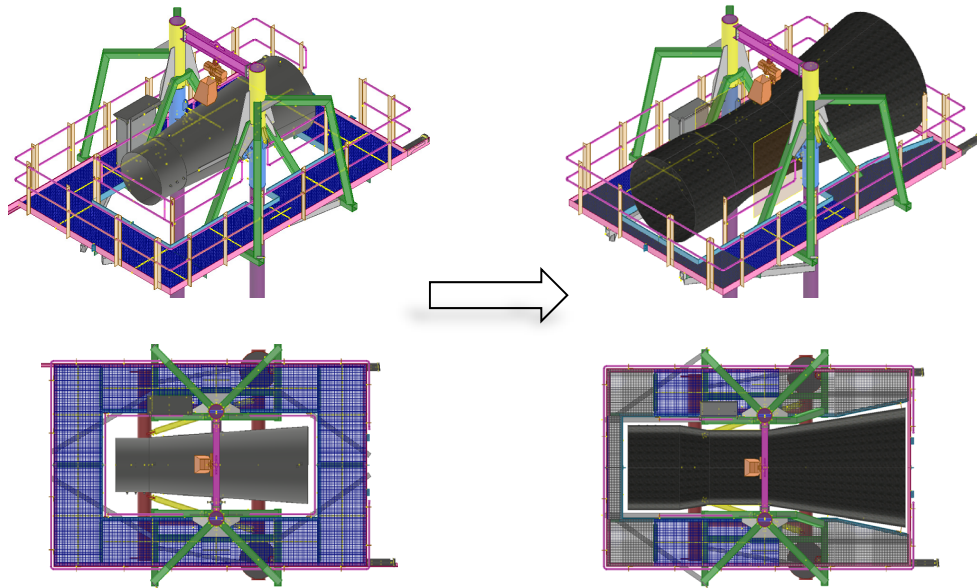


Figure 42 Modifications de la plateforme actuelle.

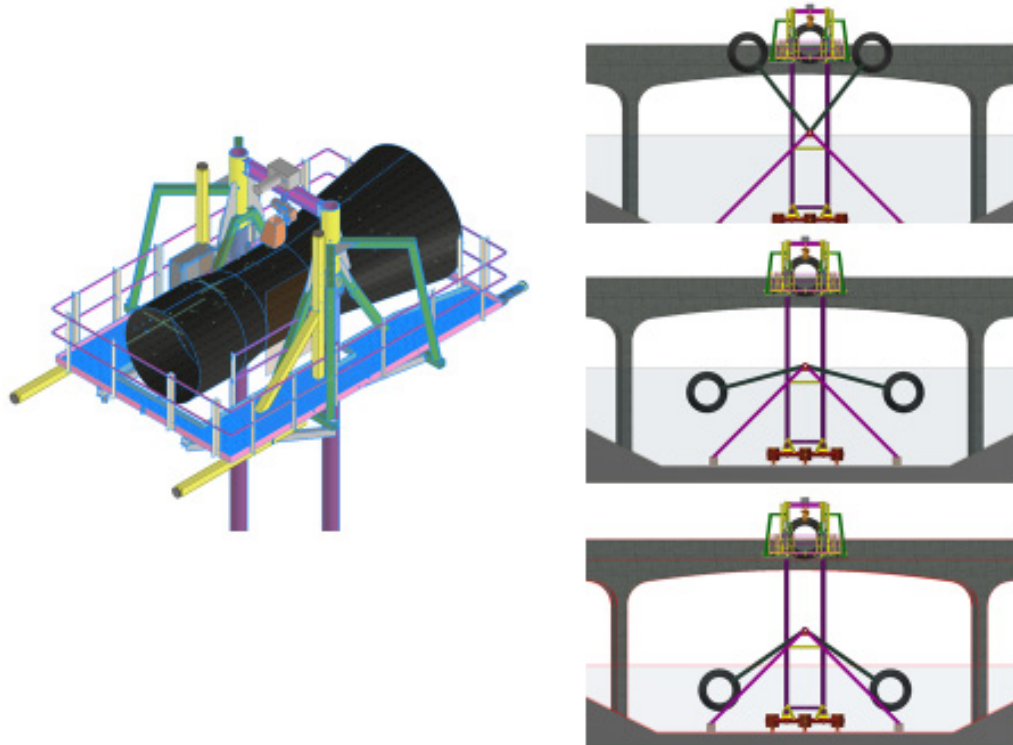


Figure 43 Concept et positionnement des machines pour le concept gravitaire par axe de rotation.



1.4.4. Estimation des coûts

Tableau 6 Estimation des coûts de la modification de la plateforme actuelle.

	Prix [CHF]	Références
Tube carré acier 250x150x6.3	2'475	<i>Debrunner</i>
Tube carré acier 150x150x10	1'122	<i>Debrunner</i>
Acier cornière angle 150x100x10	1'900	<i>Debrunner</i>
Grilles	800	<i>Debrunner</i>
Total coûts matériels	6'297	
Estimation heures atelier	5'040	<i>Stahleinbau (2pers. à 120CHF)</i>
Total coûts modification	12'000	

Les coûts estimés de la modification de la passerelle actuelle s'élèvent à 12'000 CHF. Ce montant permettrait de tester la machine 3 kW en ayant à disposition un accès aisé pour la maintenance mécanique et électronique pour un coût relativement faible.

Tableau 7 Estimation des coûts du concept de ferme d'hydroliennes.

	Prix [CHF]	Références
Modification plateforme	12'000	-
Tube carré acier 250x150x6.3	3'300	<i>Debrunner</i>
Tube méc. Diam 200	6'240	<i>Debrunner</i>
Coulisse acier	1'040	<i>Debrunner</i>
Tube carré acier 150x150	2'618	<i>Debrunner</i>
Système poulie	3'392	<i>Debrunner + Roue</i>
Treuil (7.5 tonnes)	25'000	<i>Solutionlevage.com</i>
Interface machine-coulisse	2'000	<i>Prix acier S235JRJ2</i>
Divers	1'300	<i>Valbéton.ch – Bossard</i>
Total coûts matériaux	57'800.00	
Estimation heures atelier	14'400.00	<i>Stahleinbau</i>
Total coûts structure	72'000.00	
Total coûts avec machine	210'000.00	



Les coûts concernant le dispositif de rotation, les renvois ainsi que le treuil sont estimés à 210'000 CHF. Cette configuration n'est pas envisageable dans un autre site, car le prix de la plateforme n'est pas pris en compte mais dans ce cas de figure, ce concept est intéressant car l'investissement important de la première conception est revalorisé.

1.4.5. Synthèse des concepts

Tableau 8 Synthèse des différents concepts de ferme d'hydrolennes.

<i>Concept</i>	<i>Coûts [CHF]</i>	<i>Point fort</i>	<i>Point faible</i>
Flottante libre	211'000	<ul style="list-style-type: none">- Rapport coûts/puissance- Facilité d'implantation- Implantation dans divers sites- Modulation du nombre de turbine	<ul style="list-style-type: none">- Oscillation propre- Maintenance électronique- Maintenance mécanique
Flottante contraint	241'000	<ul style="list-style-type: none">- Oscillation contrôlé- Stabilité du système- Modulation du nombre de turbine- Eventuellement rapatriement machine	<ul style="list-style-type: none">- Maintenance mécanique- Maintenance électronique- Complexité de l'implantation- Forages supplémentaires
Gravitaire multiplateforme	374'000	<ul style="list-style-type: none">- Structure stable et robuste- Maintenance aisé- Instrumentation des machines- Développement et recherche	<ul style="list-style-type: none">- Rapport coûts/puissance- Implantation importante- Impact visuel- Environnement
Gravitaire axe de rotation	222'000	<ul style="list-style-type: none">- Revalorisation de la plateforme actuelle- Test pré-industrialisation machine 3kW- Accès modéré aux machines	<ul style="list-style-type: none">- Maintenance mécanique- Sollicitation de la plateforme- Stabilité asymétrique



1.5. Simulations numériques

1.5.1. Réduction de la longueur du diffuseur

Le carénage de la machine a pour effet positif d'augmenter les performances de cette dernière mais engendre des coûts supplémentaires dus au surplus de matières à utiliser. Le diffuseur de la machine joue un rôle important dans cette augmentation mais requiert beaucoup de matière. Dans le cas présent des tôles en acier inoxydable. Pour évaluer l'effet d'une réduction de la longueur du diffuseur sur les performances, plusieurs simulations ont été effectuées. Ces simulations sont instationnaires mais ne prennent pas en compte la surface libre ainsi que la forme du canal. Pour la présente étude, la longueur du diffuseur a été réduite de 10% et 20% comme représenté sur la **Figure 44**.

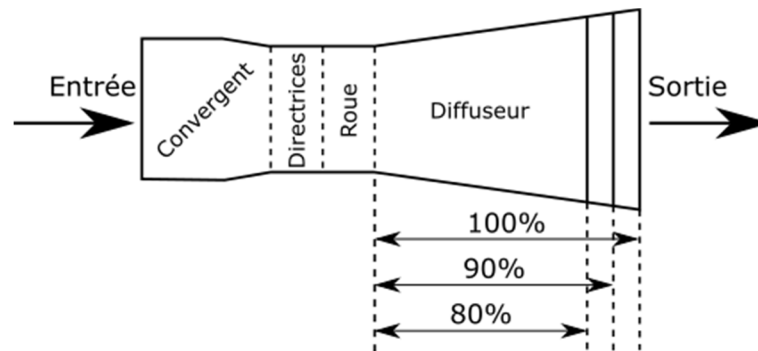


Figure 44 Schéma de l'hydrolienne représentant les trois différentes longueurs du diffuseur.

Les performances calculées sont représentées sur la **Figure 45** pour trois points de fonctionnement différents, soit au point de fonctionnement idéal $\lambda = 2.62$, à forte charge $\lambda = 3.00$ et à charge partielle $\lambda = 2.00$. La courbe bleue représente la référence avec une longueur du diffuseur inchangée, soit dénommée 100%. Il peut être observé que pour chaque point de fonctionnement le facteur de puissance diminue avec la réduction de la longueur du diffuseur. Ceci est d'autant plus visible pour le cas à forte charge.

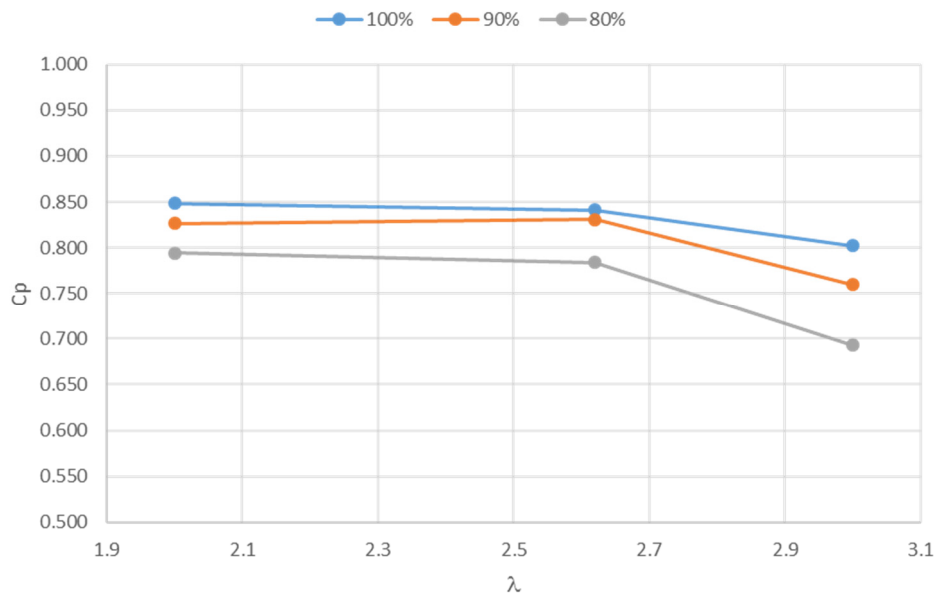


Figure 45 Comparaison des facteurs de puissance C_p en fonction du facteur de vitesse λ pour chaque longueur de diffuseur.

Les valeurs des facteurs de puissance calculées sont données dans le **Tableau 9**. On peut observer qu'au meilleur point de fonctionnement ($\lambda = 2.62$) une réduction de 10% de la longueur du diffuseur engendre une diminution de l'ordre de 1%. Ceci est encore plus marqué dans le cas d'une réduction de 20% qui résulte en une diminution de l'ordre de 7%. En faisant l'hypothèse que l'hydrolienne de référence avec une longueur du diffuseur de 100% produise 20 MWh, une diminution de la longueur du diffuseur engendrerait une diminution de production de 240 kWh et 1.36 MWh, respectivement, dans le cas d'une hydrolienne fonctionnant au meilleur point de fonctionnement.

Tableau 9 Facteur de puissance en fonction de la longueur du diffuseur et du point de fonctionnement. Les valeurs données entre parenthèse représentent l'écart relatif par rapport aux valeurs de référence.

Longueur du diffuseur	$\lambda=2.00$	$\lambda=2.62$	$\lambda=3.00$
100% (2.135 mètre)	0.848	0.841	0.802
90% (1.922 mètre)	0.827 (-2.6%)	0.831 (-1.2%)	0.760 (-5.3%)
80% (1.708 mètre)	0.795 (-6.3%)	0.784 (-6.8%)	0.693 (-13.6%)

La raison principale de ces différences de performance réside dans la distribution de la pression au sein de l'hydrolienne. Effectivement, le rôle du carénage est d'accélérer le fluide ce qui résulte en une diminution de la pression locale. Le rôle du diffuseur est donc de rééquilibrer cette diminution de pression au niveau de la roue avec la pression environnante au niveau de la sortie du diffuseur. Cette



diminution de pression normalisée par la pression dynamique de référence est représentée sur la **Figure 46**. La réduction de la longueur du diffuseur a deux conséquences.

La première conséquence est que le gradient de pression adverse est augmenté, ce qui favorise le décollement de l'écoulement dans le diffuseur. Ceci est observable sur la **Figure 46** par la barre noire horizontale. En prenant l'écoulement dans le diffuseur à 100% comme référence, on peut constater que la zone où règne la même pression diminue avec le raccourcissement du diffuseur d'où l'augmentation du gradient de pression adverse.

La seconde conséquence est que la diminution de pression au niveau de la roue est moins importante en réduisant la longueur du diffuseur. La raison est que la pression environnante en sortie du diffuseur est fixée et ne peut être changée. Même avec des gradients de pression plus élevés la longueur du diffuseur est trop faible pour atteindre le même niveau de pression au niveau de la roue avec l'hydrolienne de référence. Il résulte que la vitesse débitante ainsi que la différence de pression entre la sortie et l'entrée de la roue sont réduites avec la réduction du diffuseur et engendrent cette baisse de performance.

Aux vues de ces résultats, il est préférable, pour une utilisation des hydroliennes sur du long terme, de ne pas raccourcir le diffuseur des hydroliennes.

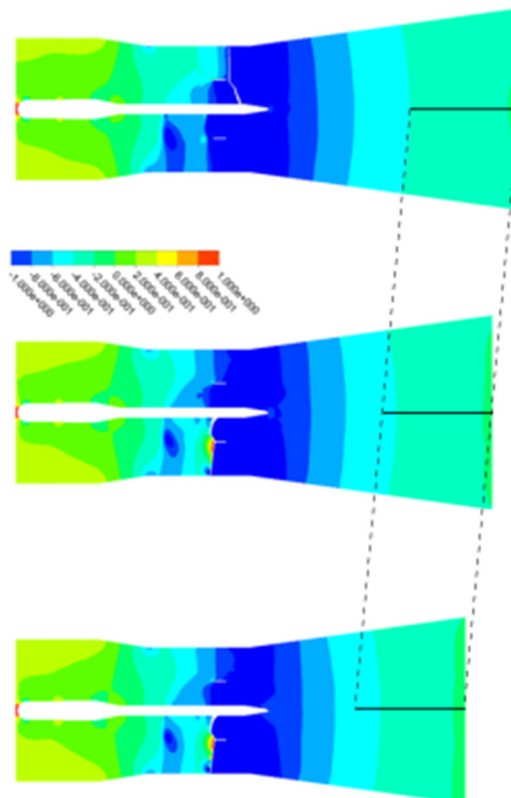


Figure 46 Champs de pression normalisés à l'intérieur des hydroliennes. De haut en bas, la taille du diffuseur est de 100%, 90% et 80%.



1.5.2. Modèle simplifié d'une hydrolienne

Dans le cadre de la pré-étude d'une ferme d'hydroliennes, il est nécessaire d'utiliser une version simplifiée des machines afin d'économiser de manière significative les ressources en calcul, communément appelé « CPU hour » en anglais. Cette approche remplace le domaine de la roue par une perte de charge. Effectivement, la conversion de l'énergie hydraulique en énergie mécanique se passe au niveau de la roue et résulte en une diminution de la pression entre l'entrée et la sortie de la roue. Le modèle simplifié représente donc cette même diminution de pression mais sans la présence de la roue. Il n'est donc pas nécessaire de calculer la rotation de la roue ainsi que de mettre à jour l'interaction des interfaces entre le domaine tournant et stationnaire, ce qui résulte en un gain significatif du temps de calcul mentionné précédemment.

Pour modéliser le comportement de la roue, il est nécessaire de calculer le coefficient de résistance K :

$$K = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho C_{ref}^2}$$

Avec Δp la variation de pression entre l'entrée et la sortie de la roue, ρ la masse volumique du fluide et C_{ref} la vitesse de référence.

Le choix de la vitesse de référence n'est, dans ce cas présent, pas anodin, car il influence directement la valeur du coefficient de résistance, qui sera utilisé dans le modèle simplifié. Ce modèle représentant la roue, il est donc décidé d'utiliser la vitesse débitante au niveau de la roue comme vitesse de référence. Pour déterminer la valeur de ce coefficient, une série de simulation a été effectuée. Ces simulations prennent en considération toute les géométries (hydrolienne, canal, piliers du pont) mais sans inclure la viscosité. Les valeurs des coefficient pour les différents points de fonctionnement calculés sont présentés sur la **Figure 47**.

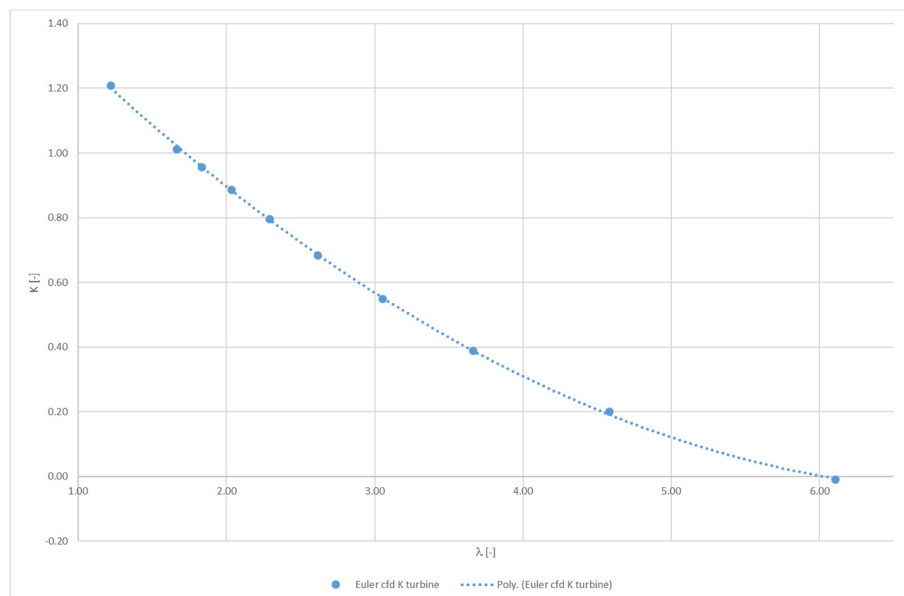


Figure 47 Coefficient de résistance de la roue en fonction du point de fonctionnement. Calcul effectué en utilisant toute la géométrie mais en ne tenant pas compte de la viscosité.



Une comparaison qualitative entre un calcul incluant la géométrie de l'hydrolienne et un modélisant l'hydrolienne est présenté sur la **Figure 48**. Sur cette dernière est représentée le champ de vitesse longitudinal et il peut être observé que les deux approches fournissent des résultats similaires.

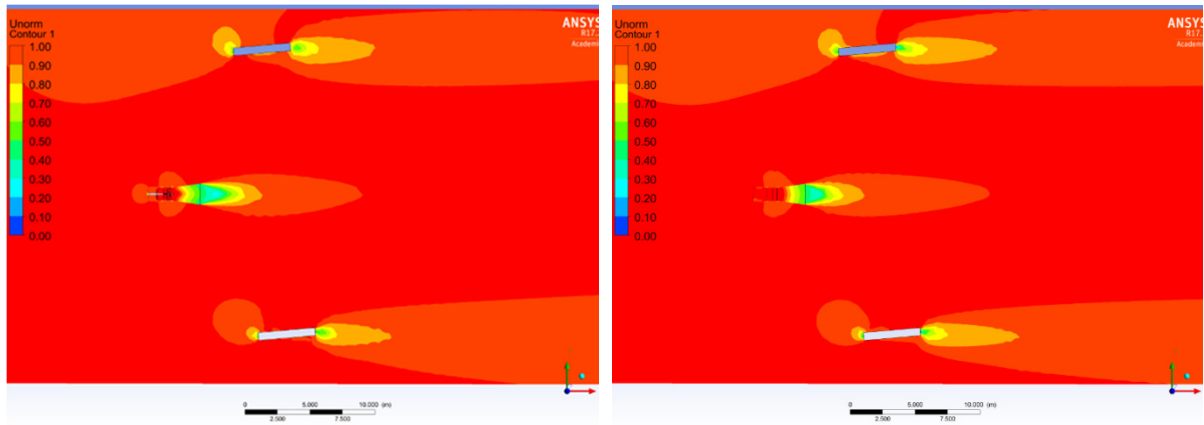


Figure 48 Comparaison du champ de vitesse longitudinal normalisé. Gauche : calcul avec la géométrie complète de l'hydrolienne. Droite : modèle simplifié.

La **Figure 49** compare qualitativement les deux approches en représentant le débit turbiné pour différents points de fonctionnement. Globalement, l'approche utilisant le modèle simplifié calcul un débit traversant la machine plus élevé. Cependant, cette augmentation est d'environ 10%, ce qui est acceptable pour la présente étude à but qualitatif.

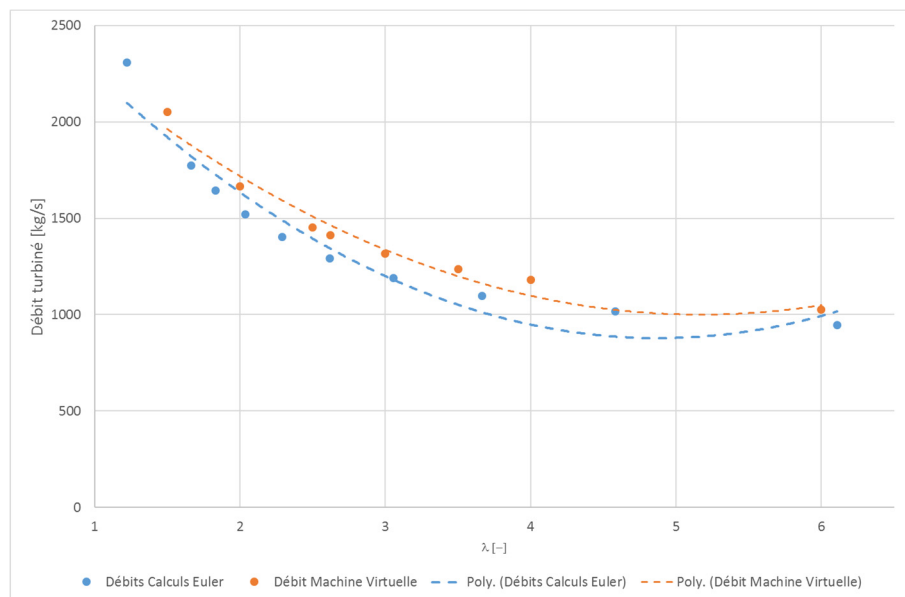


Figure 49 Comparaison des débits turbinés en utilisant la géométrie complète de l'hydrolienne avec son modèle simplifié.



1.5.3. Configuration d'une ferme d'hydroliennes de 10 kW

La configuration d'une ferme d'hydroliennes est étudiée en utilisant le modèle simplifié de l'hydrolienne. Ceci permet d'exécuter les calculs sur des ordinateurs standards en un temps restreint. L'objectif de la nouvelle ferme d'hydroliennes est d'atteindre les 10 kW. Pour cela, différentes hydroliennes sont sélectionnées en fonction de la configuration choisie, voir **Tableau 10**.

Tableau 10 Puissances et dimensions des trois hydroliennes simulées.

<i>Hydrolienne</i>	<i>Puissance maximale [kW]</i>	<i>Longueur [m]</i>	<i>Diamètre de la roue [m]</i>
A	1.4	4.1	1.0
B	2.0	5.8	1.4
C	3.3	6.5	1.6

Pour toutes les configurations, les hydroliennes sont espacées les unes des autres selon un triangle isocèle. L'espacement latéralement est de 6 m et longitudinalement de 5.2 m.

La première configuration simulée est celle avec sept hydroliennes de 1.4 kW (hydrolienne A). L'écoulement traversant les hydroliennes ainsi que la section en sortie de la dernière rangée d'hydroliennes est représenté sur la **Figure 50** (Config 2-3-2). L'inconvénient de cette configuration est que les hydroliennes de la troisième rangée sont touchées par le sillage des hydroliennes de la première rangée. Un débit plus faible les traverse résultant en une baisse de performance. L'avantage de cette configuration est que le débit à travers la section est peu affecté par la présence de la ferme.

Les deux secondes configurations simulées représentent le cas à cinq hydroliennes de 2.0 kW (hydrolienne B). En utilisant cet arrangement triangulaire, deux options se présentent. Soit mettre deux hydroliennes sur la première rangée (Config 2-3), soit en mettre trois (Config 3-2). L'écoulement pour ces deux cas est présenté sur la **Figure 50**. L'avantage de ces configurations est qu'aucune hydrolienne se trouve dans le sillage d'une autre. Le second avantage est que les hydroliennes dans la seconde rangée voient un débit les traversant supérieur à celui de la première rangée. Ceci s'explique par la présence des deux ou trois sillages qui occupent une partie du canal forçant ainsi l'écoulement environnant à traverser les hydroliennes de la deuxième rangée. L'inconvénient est que le débit sur la section est passablement perturbé, ce qui indique que ces configurations bloquent l'écoulement. Ceci peut être vu comme un avantage car le phénomène de blocage peut augmenter le débit traversant une hydrolienne et ainsi augmenter sa performance. Cependant, le blocage peut comme son nom l'indique bloquer l'écoulement ce qui se traduit par une réduction de la vitesse de l'eau au sein du canal ce qui diminuerait la performance de la centrale hydroélectrique située en amont de la ferme.

Les deux dernières configurations simulées représentent le cas à trois hydroliennes de 3.3 kW (hydrolienne C). Similairement au cas à cinq hydroliennes deux possibilités d'arrangement sont possibles (Config 1-2 et Config 2-1) comme montré sur la **Figure 50**. Les avantages de ces configurations sont similaires aux configurations à cinq machines. Cependant, ces configurations perturbent moins l'écoulement environnant, ce qui est préférable pour s'assurer du bon fonctionnement de la centrale hydroélectrique située en amont de la ferme.

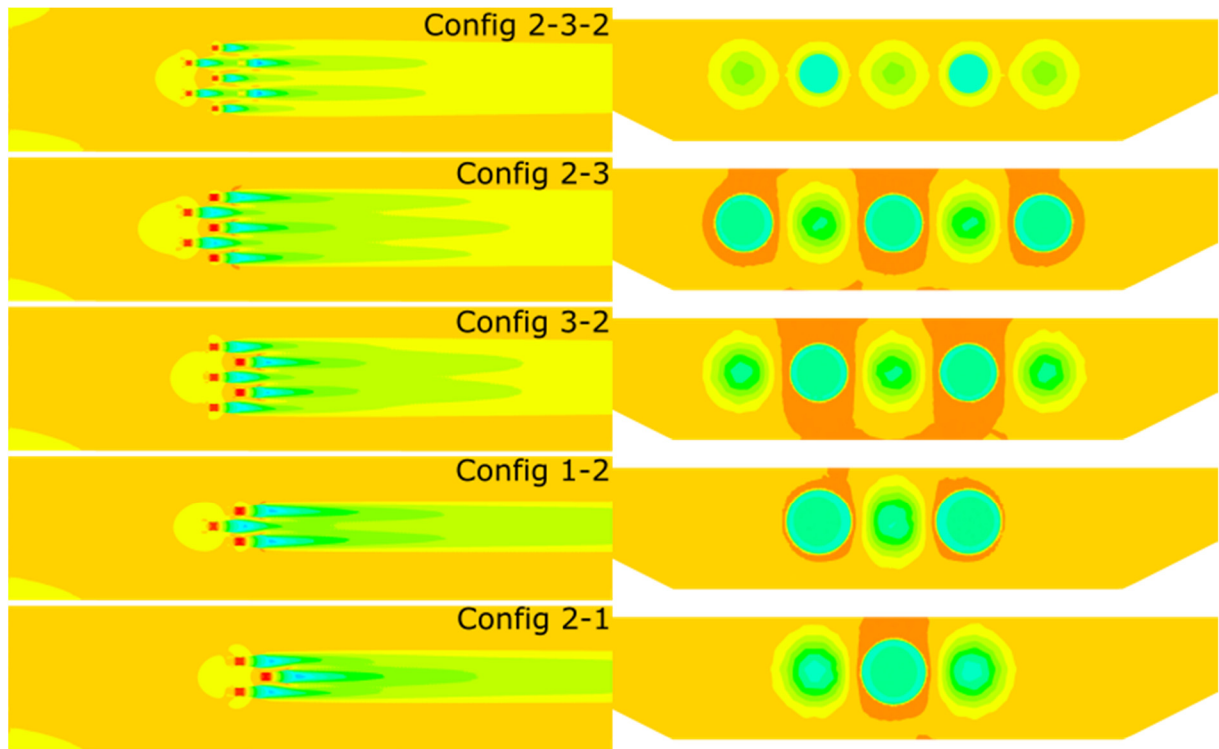


Figure 50 Champs de vitesse longitudinale normalisés pour les cinq configurations simulées, réf [12].

Ces différentes simulations ont permis d'estimer la puissance maximale d'une ferme d'hydroliennes, voir **Tableau 11**. Les différentes configurations simulées ne présentent pas de différence significative. Cependant, aux vues des inconvénients rencontrés avec les configurations à sept et cinq hydroliennes, une configuration à trois machines est avantageuse et sélectionnée pour la suite. Une étude plus détaillée sera nécessaire pour déterminer quelle configuration choisir entre la configuration 1-2 et 2-1 et ce d'un point de vu hydraulique, mécanique et économique.

Tableau 11 Estimation de la puissance maximale de la ferme d'hydroliennes en fonction de la configuration choisie.

<i>Configuration</i>	<i>2-3-2</i>	<i>2-3</i>	<i>3-2</i>	<i>1-2</i>	<i>2-1</i>
Puissance [kW]	9.51	10.21	10.24	10.04	10.07



Communication

Le projet pilote et démonstrateur « Réalisation d'une hydrolienne pour les canaux artificiels » a fait l'objet d'une relativement grande attention médiatique en particulier lors de la mise en service de l'hydrolienne en février 2017, voir Annexe 1.

Canal 9 a consacré un reportage à cette mise en service et au projet de développement durant la première année, réf. [5]. La HES-SO Valais-Wallis a aussi réalisée un petit montage pour expliquer le projet, réf. [9].

Par ailleurs les résultats scientifiques obtenus dans le cadre de ce projet ont été présentés lors de conférences nationales, réf. [4], [7], [8], [12], [13] et internationales, réf. [6] et ont été publiés dans des revues scientifiques, réf. [10], [11].

Ce projet a aussi fait l'objet de deux travaux de Bachelor qui ont permis de pré-dimensionner la plateforme de test, ref [3], et de réaliser une pré-étude de potentiel sur le Rhône dans le canton de Genève à l'aval de la centrale de Chancy-Pougny, réf. [14].

Finalement, l'étude numérique en cours portant sur l'analyse de l'influence de la profondeur et de l'inclinaison sur les performances sera présentée en mars 2019 à la conférence intitulée « Innovative Applied Energy » à l'université de Oxford , réf [15].



Perspectives, étapes ultérieures

Une suite possible pour ce projet pourrait se réaliser dans le cadre d'un projet Interreg NWE, le projet « Flash », qui a été déposé fin octobre 2018 avec 17 partenaires européens dans cinq pays différents avec cinq technologies différentes. Dans ce cadre, la HES-SO Valais-Wallis a proposé deux activités :

- Réaliser la ferme de 10 kW à Lavey pré-dimensionnée dans le cadre de la dernière année du projet grâce au soutien financier de l'OFEN, des SIL, de The Ark et de la HES-SO Valais-Wallis. Le but est de faire fonctionner la ferme pendant une durée suffisante entre 3'000 h et 4'000 h pour valider la robustesse de la structure et des machines. L'influence de la ferme sur le cours d'eau et l'interaction mutuelle des machines seront étudiées. Ce projet devra bénéficier du soutien des SIL, des cantons de Vaud et du Valais et de la confédération via le fonds Interreg. Le planning prévu serait le suivant :

Lavey Project : First Farm demo in Switzerland 10kW		2019			2020			2021			2022		
WP0	Management, meetings, deliveries, dissemination												
WP1	CFD Model of 3 turbines in a box												
	CFD of the Farm of 3 x 3.3 kW												
WP2	Validation of CFD of the Farm of 3 x 3.3 kW												
	Hydraulic and mechanical specifications												
	Instrumentation specifications												
WP3	Electric and electronics specifications												
	Manufacturing and installation												
WP4	Commissioning												
	Measurements campaign												
WP5	Monitoring of the farm												
	Legislation												

Figure 51 Planning prévu pour la ferme d'hydroliennes de 10 kW à Lavey dans le cadre du projet Interreg NWE FLASH.

- Faire une étude de potentiel cinétique et de production sur le Rhône dans le canton de Genève à l'aval de la centrale de Chancy-Pougny. Cette partie du projet sera menée en collaboration avec les SIG, les bureaux GREN et AquaVision ainsi que le canton de Genève. Une demande de soutien au fonds Vitale Innovation a été faite mi-novembre. Le planning prévu pour réaliser cette étude serait le suivant :

Etude du potentiel d'une ferme d'hydroliennes sur le Rhône à Chancy-Pougny		2019			2020		
WP0	Management						
WP1	Potentiel cinétique du site						
	1.1 Géométrie CAO 3D du site						
	1.2 Simulations numériques						
	1.3 Mesures sur site						
	1.4 Validation						
WP2	1.5 Estimation du potentiel cinétique du site						
	Potentiel de production de la ferme						
	2.1 Simulations numériques simplifiées de différentes configurations de ferme						
	2.2 Calcul des lignes d'eau pour différentes configurations de ferme						
	2.3 Estimations des risques liés au charriage et aux sédiments						
WP3	2.4 Sélection de la configuration optimale						
	2.5 Estimation du potentiel de production d'électricité de la ferme						
	Impact environnemental et législation						
WP4	3.1 Impact environnemental						
	3.2 Impact de la ferme sur l'habitabilité et la libre migration						
	3.3 Législation						
	Estimation des coûts						
WP4	4.1 Pré-dimensionnement des turbines						
	4.2 Pré-dimensionnement de la structure						
	4.3 Pré-dimensionnement de l'électronique						
	4.4 Synthèse						

Figure 52 Planning prévu pour l'étude de potentiel à Chancy dans le cadre du projet Interreg NWE FLASH et SIG.



Discussion

Ce projet a été mené sur une durée de près de trois ans. La finalisation du développement de la machine, le développement de la plateforme, leur réalisation et leur installation sur le site pilote auront duré une année. Les mesures ont ensuite pu être réalisées sans problèmes techniques durant près de deux ans, essentiellement durant le printemps et l'été pour des raisons de sécurité et pour avoir un débit suffisamment important. Les résultats sont très encourageants et le projet a eu un accueil très positif du public. Actuellement la plateforme et la turbine sont en cours de démontage pour pouvoir faire des modifications dans le cas où la suite du projet pourrait voir le jour, c'est-à-dire la mise en place de trois machines de 3.3 kW pour atteindre une puissance installée de 10 kW. Ceci permettrait, basé sur cette première étude, de mettre en place la première ferme d'hydroliennes en Suisse, certes à petite échelle, mais permettant ainsi de répondre encore à un certain nombre de questions et faire accepter ce type de technologie avant de mettre en place des fermes plus conséquentes pourquoi pas sur des cours d'eau naturels. En effet, depuis le démarrage de ce projet, d'autres projets ont vu le jour en Europe. Actuellement une ferme d'hydroliennes est en cours de construction sur le Rhône côté français et les études d'impact pour ce type de technologie ont montré qu'elles pouvaient être compatibles avec une utilisation en cours d'eau naturel. Ceci laisse entrevoir un potentiel important en Suisse. Une première pré-étude a ainsi été réalisée dans le cadre d'un travail de Bachelor à la HES-SO Valais-Wallis pour un site potentiel sur le Rhône dans le canton de Genève. Des études similaires pourraient voir le jour sur les cantons de Vaud et du Valais et pourquoi pas sur d'autres fleuves en Suisse.

Conclusions

Ce projet pilote et démonstrateur « Réalisation d'une hydrolienne pour les canaux artificiels » a permis de tester pour la première fois en Suisse une hydrolienne dans des conditions réelles d'exploitation en mettant en place un laboratoire éphémère en plein air dans le canal de fuite de la centrale de Lavey.

La machine a pu être mise en eau avec succès et ses performances correspondent à celles prédites par les simulations numériques. L'influence de différents paramètres sur ses performances a pu être étudiée et ont permis d'améliorer encore le coefficient de puissance de la machine en inclinant la turbine. Finalement, un coefficient de puissance maximal compris entre 0.77 et 0.93 a pu être mesuré pour un facteur de vitesse compris entre 2.1 et 2.6. La puissance électrique maximale injectée sur le réseau a d'ailleurs dépassée les attentes fixées initialement dans le projet atteignant une valeur de 1.5 kW.

Deux semaines de tests en continu ont permis d'explorer le comportement de la machine sur une durée plus longue et ont déjà permis de soulever un certain nombre de questions dans le cas où une ferme serait installée à cet endroit.

Une pré-étude pour une ferme de 10 kW a finalement été menée, des structures pour tenir la ferme ont été développées et des simulations ont permis de sélectionner la configuration qui permettrait de récupérer un maximum d'énergie. Une estimation des coûts de la ferme avec les prix « prototypes » avec trois machines a été réalisée ainsi qu'une première analyse économique.



Références

- [1] V. Hasmatuchi, F. Avellan, and C. Münch, 2014, "Numerical Modelling of a Run-off-River Tailrace Channel", Hydro 2014, Cernobbio, Italy.
- [2] V. Hasmatuchi, S. Alligné, J.-L. Kueny, C. Münch, 2015, "Hydraulic performance of a new isokinetic turbine for rivers and artificial channels", E-proceedings of the 36th IAHR World Congress, The Hague, The Netherlands, 28 June - 3 July.
- [3] J. Amacker, «Design der Versuchsplattform einer Durchströmturbine», travail de Bachelor, HES-SO Valais-Wallis, 2016.
- [4] V. Hasmatuchi, A. Gaspoz, L. Rapillard, N. Brunner, S. Richard, S. Chevailler, C. Münch-Alligné, 2016, "Open-air laboratory for a new isokinetic turbine prototype", SCCER-SoE Annual Conference 2016, Sion, Switzerland.
- [5] Reportage sur Canal 9 pour l'émission les pieds sur terre en février 2017 : <https://youtu.be/BpPLh4fyX0w>
- [6] C. Münch, A. Gaspoz, S. Richard, V. Hasmatuchi, N. Brunner, 2017. "New Prototype of a Kinetic Turbine for Rivers and Artificial Channels", SimHydro 2017: Choosing the right model in applied hydraulics, 14-16 June 2017, Sophia Antipolis, France.
- [7] A. Gaspoz, S. Richard, V. Hasmatuchi, N. Brunner, C. Münch-Alligné, 2017, "Performance assessment of a new kinetic turbine prototype", SCCER-SoE Annual Conference 2017, Birmensdorf, Switzerland. **1st Price for the poster.**
- [8] S. Richard, A. Gaspoz, V. Hasmatuchi, N. Brunner, S. Chevailler, C. Münch-Alligné, 2017, "Development of an experimental protocol to assess the new kinetic turbine performance", SCCER-SoE Annual Conference 2017, Birmensdorf, Switzerland.
- [9] Montage vidéo présentant le projet réalisé par la HES-SO Valais-Wallis: https://youtu.be/8R_hQHtdo_k
- [10] C. Münch-Alligné, J. Schmid, S. Richard, A. Gaspoz, N. Brunner, V. Hasmatuchi, 2018, "[Experimental Assessment of a New Kinetic Turbine Performance for Artificial Channels](#)", Water 2018, Volume 10, Issue 3, 311.
- [11] C. Münch-Alligné, S. Richard, A. Gaspoz, V. Hasmatuchi, N. Brunner, 2018, "[New Prototype of a Kinetic Turbine of Artificial Channels](#)", Advances in Hydroinformatics, Springer, Singapore, 2018, pp. 981-996
- [12] O. Pacot, J. Schmid, S. Martignoni, J. Decaix, N. Brunner, C. Münch-Alligné, "Configuring a hydrokinetic turbine farm by CFD", SCCER-SoE Annual Conference 2018, Horw, Switzerland.
- [13] O. Pacot, J. Schmid, S. Martignoni, J. Decaix, N. Brunner, C. Münch-Alligné, "Hydrokinetic turbine farm: challenges & expectations", SCCER-SoE Annual Conference 2018, Horw, Switzerland
- [14] D. Pettinaroli, "Simulation d'une ferme d'hydrolennes », travail de Bachelor, HES-SO Valais-Wallis, 2018.
- [15] O. Pacot, J. Schmid, J. Decaix, N. Brunner, C. Münch-Alligné, 2019 "New hydrokinetic turbine: insight on the pitch and depth effects", Innovative Applied Energy Conference, University of Oxford, to be presented.



Annexe

Revue de presse de février 2017 du projet.



Liste des abréviations

Symbols

A_c	[m ²]	Surface de la section du canal: 137 m ² .
C_p	[-]	Coefficient de puissance.
$C_{p\text{ ref}}$	[-]	Coefficient de puissance maximal sans incidence à une profondeur de 2.5m égal à 0.83.
C_∞	[m·s ⁻¹]	Vitesse de référence loin en amont.
I_g	[A]	Courant aux bornes de la génératrice.
N_g	[min ⁻¹]	Vitesse de rotation de la génératrice.
N_r	[min ⁻¹]	Vitesse de rotation de la roue.
P_e	[W]	Puissance électrique.
P_h	[W]	Puissance hydraulique.
P_m	[W]	Puissance mécanique.
Q	[m ³ ·s ⁻¹]	Débit.
R_r	[m]	Rayon de la roue.
T_r	[N·m]	Couple mécanique.
U_g	[V]	Tension aux bornes de la génératrice.
η_g	[-]	Rendement de la génératrice.
η_{e-m}	[-]	Rendement électromécanique.
λ	[-]	Facteur de vitesse.
λ_{ref}	[-]	Facteur de vitesse de référence égal à 2.2 correspondant à $C_{p\text{ ref}}$.
ρ	[kg·m ⁻³]	Masse volumique de l'eau
ω_g	[rad·s ⁻¹]	Vitesse angulaire de la génératrice
ω_r	[rad·s ⁻¹]	Vitesse angulaire de la roue

Abbreviations

ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Motor