



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement,
des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Office fédéral de l'énergie OFEN

Rapport final du 30.06.2015

Essais de performance sur une micro-turbine tubulaire

Mandant:

Office fédéral de l'énergie OFEN
Programme de recherche Force hydraulique
CH-3003 Berne
www.ofen.admin.ch

Mandataire:

Laboratoire de constructions hydrauliques (LCH)
EPFL ENAC IIC LCH
GC A3 514 (Bât. GC), Station 18
1015 Lausanne
<http://lch.epfl.ch/>

Auteurs:

Vlad Hasmatuchi, HES-SO; vlad.hasmatuchi@hevs.ch
Irene Samora, EPFL LCH; irene.almeidasamora@epfl.ch
Mario Franca, EPFL LCH; mario.franca@epfl.ch
Anton Schleiss, EPFL LCH; anton.schleiss@epfl.ch
Cécile Munch, HES-SO ; cecile.muench@hevs.ch

Responsable de domaine de l'OFEN:

Dr. Michael Moser

Chef du programme de l'OFEN:

Dr. Klaus Jorde

Numéro du contrat de l'OFEN:

SI/500xxx-yy

Le ou les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions de ce rapport.

Zusammenfassung

Die hydraulische Leistung einer axialen Picoturbine installiert in Krümmern für geringen Fallhöhen wurde im Versuchsstand der HES SO Wallis untersucht. Solche Turbinen sind für die Energierückgewinnung in Trinkwassersystemen gedacht. Ausgehend von einer Geometrie mit einem axialen Laufrad entwickelt am Wasserbaulabor der ETH Lausanne (LCH) wurde die Picoturbine entworfen und ein Prototyp im Modellmassstab 85/100 an der HES SO Wallis eingerichtet. Für die Messung der hydraulischen Leistung dieser axialen Picoturbine mit einer maximalen Ausgabeleistung von 300 W waren folgende Schritte nötig:

- Entwurf und Konstruktion der Picoturbine ausgehend vom Laufrad (Design zur Verfügung gestellt vom LCH) ;
- Bearbeitung des Laufrads (in Bronze) mit einer 5-Achsfräse;
- Herstellung verschiedener zusätzlicher Komponenten der Picoturbine (in Edelstahl);
- Montage der Picoturbine
- Montage des elektrischen Generators (Synchronmotor) mit elektrischer Versorgung;
- Instrumentierung und Kalibrierung;
- Anpassung der Steuer- und Messschnittstelle der Picoturbine;
- Definition des Messprotokolls;
- Messung der hydraulischen Leistung.

Der vorliegende Bericht beschreibt die gemessenen Kennlinien der Picoturbine, welche entsprechend der IEC 60193 Standardvorgaben ermittelt wurden. Das mechanische Konzept und der detaillierte experimentelle Versuchsaufbau sind ebenfalls im Bericht beschrieben.

Résumé

Les performances d'une pico-turbine axiale basse chute en coude, destinée à la récupération d'énergie sur les réseaux d'eau potable, ont été évaluées sur le stand d'essai de la HES SO Valais. En partant de la géométrie de la roue fournie par le Laboratoire de Constructions Hydrauliques de l'EPFL (LCH), la turbine a été conçue, exécutée et implantée sur le banc d'essais de la HES-SO Valais à l'échelle modèle (85/100). Afin de pouvoir évaluer les performances hydrauliques de cette pico-turbine axiale en coude d'une puissance maximale de 300W, les principales étapes franchies de la conception jusqu'aux mesures expérimentales sont :

- Design mécanique de la pico-turbine adapté à la roue (design fourni par le LCH) ;
- Exécution de la roue (en bronze) sur une machine d'usinage à 5-axes ;
- Exécution des différents éléments (en acier inoxydable) de la pico-turbine ;
- Montage mécanique de l'assemblage global ;
- Montage de la génératrice (moteur synchrone) et raccordement électrique ;
- Instrumentation et calibration ;
- Adaptation de l'interface de contrôle et mesures dédiée à la pico-turbine ;
- Définition du protocole de mesures ;
- Mesures de performance hydraulique.

Ce rapport fournit les courbes caractéristiques hydrauliques de la pico-turbine mesurées en suivant les prescriptions de la norme CEI 60193. Le concept mécanique ainsi que le setup expérimental complet sont également inclus.

Summary

The hydraulic performances of an axial low-head pico-turbine, being intended for recovering energy in drinking water networks, have been assessed at the testing platform of the HES SO Valais. Starting from the geometry of the axial runner provided by EPFL-Laboratory for Hydraulic Constructions (LCH),

the pico-turbine has been designed, executed and set up on the HES-SO Valais test rig at a model scale (85/100). In order to measure the hydraulic performances of this axial pico-turbine with a maximal output power of 300 W, the main steps performed from the design to the experimental measurements are:

- Mechanical design of a pico-turbine adapted to the runner (provided by LCH) ;
- Machining of the runner (in Bronze) on a 5-axis milling machine ;
- Manufacturing of different components (in Stainless Steel) of the pico-turbine ;
- Mechanical assembly of the machine;
- Assembly of the electrical generator (synchronous motor) and electrical connection ;
- Instrumentation and calibration ;
- Adaptation of the control and measurements interface dedicated to the pico-turbine ;
- Definition of the measurements protocol;
- Measurements of hydraulic performance.

The present report comes describes the obtained hydraulic characteristic curves of the pico-turbine measured following the IEC 60193 standard recommendations. The mechanical concept and the full experimental set-up are included as well.

Contents

Zusammenfassung 3

Résumé 3

Summary 3

Nomenclature 6

1. CONTEXTE 7

2. OBJECTIF 7

3. MÉTHODOLOGIE 7

4. SETUP EXPERIMENTAL 12

5. RESULTATS 26

6. DISCUSSION 37

7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES 38

ANNEXES

Nomenclature

Symbole	Dénomination	Valeur	Unité
A	Superficie		m^2
C_m	Vitesse moyenne		$m \cdot s^{-1}$
D_e	Diamètre extérieur de la roue		m
D_i	Diamètre du moyeu de la roue		m
DN	Diamètre nominal		mm
E	Energie spécifique		$J \cdot kg^{-1}$
g	Accélération gravitationnelle	9.80665	$m \cdot s^{-2}$
H	Chute		m
H_s	Niveau d'implantation		m
H_t	Chute de pression statique sur la roue		m
j	Jeu radial		mm
k_{m-p}	Echelle modèle-prototype		-
N	Vitesse de rotation		rpm
N_{ED}	Facteur de vitesse		-
NPSE	Energie massique nette à l'aspiration		$J \cdot kg^{-1}$
p	Pression statique		Pa
p_{amb}	Pression atmosphérique ambiante	101325	Pa
P_h	Puissance hydraulique		W
P_{mec}	Puissance mécanique		W
p_{va}	Pression de vaporisation	2340	Pa
Q	Débit		$m^3 \cdot s^{-1}$
Q_{ED}	Facteur de débit		-
Re	Nombre de Reynolds		-
T_{ED}	Facteur de couple		-
T_{mec}	Couple mécanique		N·m
T_w	Température de l'eau		°C
z_b	Nombre d'aubes		-
ε	Erreur		%
η_h	Rendement hydraulique		%
ν	Viscosité cinématique de l'eau	$1.007 \cdot 10^{-6}$	$m^2 \cdot s^{-1}$
ρ	Densité de l'eau	997	$kg \cdot m^{-3}$
σ	Nombre de Thoma		-
ϕ	Coefficient de débit		-
ψ	Coefficient d'énergie		-
ω	Vitesse angulaire		$rad \cdot s^{-1}$

1. CONTEXTE

Le potentiel d'une micro-turbine installée dans un système d'assainissement est analysé par des essais de performance en laboratoire. La micro-turbine tubulaire a été développée et optimisée par simulation numérique et, à présent, une validation expérimentale en laboratoire est nécessaire. Le principal objectif de cette étude est d'obtenir les courbes caractéristiques et de rendement d'un proto-type. L'étude est accomplie dans le cadre d'une thèse de doctorat au LCH, EPFL et à IST, Université de Lisbonne en collaboration avec la HES SO Valais. Dans le futur une dans une conférence ou congrès, une autre dans un journal professionnel et une troisième dans un journal scientifique avec comité de lecteur sont prévus. Le support de l'OFEN sera reconnu dans ces publications.

2. OBJECTIF

L'objectif du projet est de mesurer les courbes caractéristiques hydrauliques d'une pico-turbine axiale en coude dédiée à la récupération d'énergie dans les réseaux d'eau potable. Pour atteindre cet objectif, la HES-SO Valais a réalisé dans un premier temps la conception mécanique du modèle réduit (échelle modèle/prototype 85/100) de la pico-turbine axiale basse chute à partir de la roue fournie par le Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH) de l'EPFL. Les différentes pièces mécaniques du concept validé ont été réalisées par l'atelier mécanique de la HES SO Valais, excepté la roue (en bronze) dont la fabrication a été prise en charge par le LCH. L'assemblage de tous les composants mécaniques et de l'instrumentation nécessaire pour piloter la vitesse de rotation de la machine et pour mesurer la puissance mécanique de la roue a ensuite été effectué par l'atelier mécanique de la HES SO Valais. Le moteur électrique ainsi que l'électronique de puissance nécessaires pour le contrôle de la machine ont également été fournis par la HES-SO Valais. Durant la seconde phase du projet, la conception et la réalisation des conduites nécessaires pour l'implantation de la machine sur le banc d'essais ont été réalisées. Finalement, les courbes caractéristiques hydrauliques de la machine ont été mesurées en suivant les prescriptions de la norme CEI 60193¹.

Le rapport présente dans un premier temps la méthodologie utilisée pour les tests de performance hydraulique. La transposition prototype/modèle employée afin de pouvoir déterminer le diamètre du modèle réduit est brièvement décrite. Le protocole d'essais employé est également présenté. Ensuite, le setup expérimental incluant la conception mécanique du modèle, la description du banc d'essais hydrauliques et l'instrumentation sont détaillés. Les points de fonctionnement ainsi que les courbes caractéristiques correspondantes sont ensuite présentés. La répétabilité et les incertitudes de mesures sont également traitées. Les conclusions concernant les différents aspects des essais réalisés sont finalement données. Les annexes incluent le cahier des charges, le planning de réalisation ainsi que la liste du personnel participant à la réalisation de la machine et aux essais. Une mise en plan de l'assemblage global de la pico-turbine testée est également fournie. Enfin, les courbes de calibration des différents capteurs utilisés complètent le rapport.

3. MÉTHODOLOGIE

3.1. Transposition prototype-modèle

En analysant les courbes caractéristiques théoriques du prototype obtenues par simulation numérique de l'écoulement 3D (voir Figure 1), il a pu être constaté que le débit de la pico-turbine pour un diamètre nominal de 100 mm dépasse la valeur maximale de 45 m³/h fournie par les trois pompes de recirculation équipant le banc d'essais. En conséquence, il a été établi de commun accord avec le mandant de réduire le diamètre nominal de la roue en vue de couvrir toute la plage de débit de la machine à tester.

La puissance hydraulique disponible, la puissance mécanique de la roue, ainsi que le rendement de transformation hydraulique-mécanique sont définis de la manière suivante :

¹ Commission Electrotechnique Internationale, 1999, "*Turbines hydrauliques, pompes d'accumulation et pompes-turbines – Essais de réception sur modèle*", Norme Internationale CEI 60193 - Deuxième Edition, Genève, Suisse

$$P_h = \rho \cdot Q \cdot E = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H \text{ [W]} \quad (1)$$

$$P_{mec} = \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{60} \cdot T_{mec} = \omega \cdot T_{mec} \text{ [W]} \quad (2)$$

$$\eta_h = \frac{P_{mec}}{P_h} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (3)$$

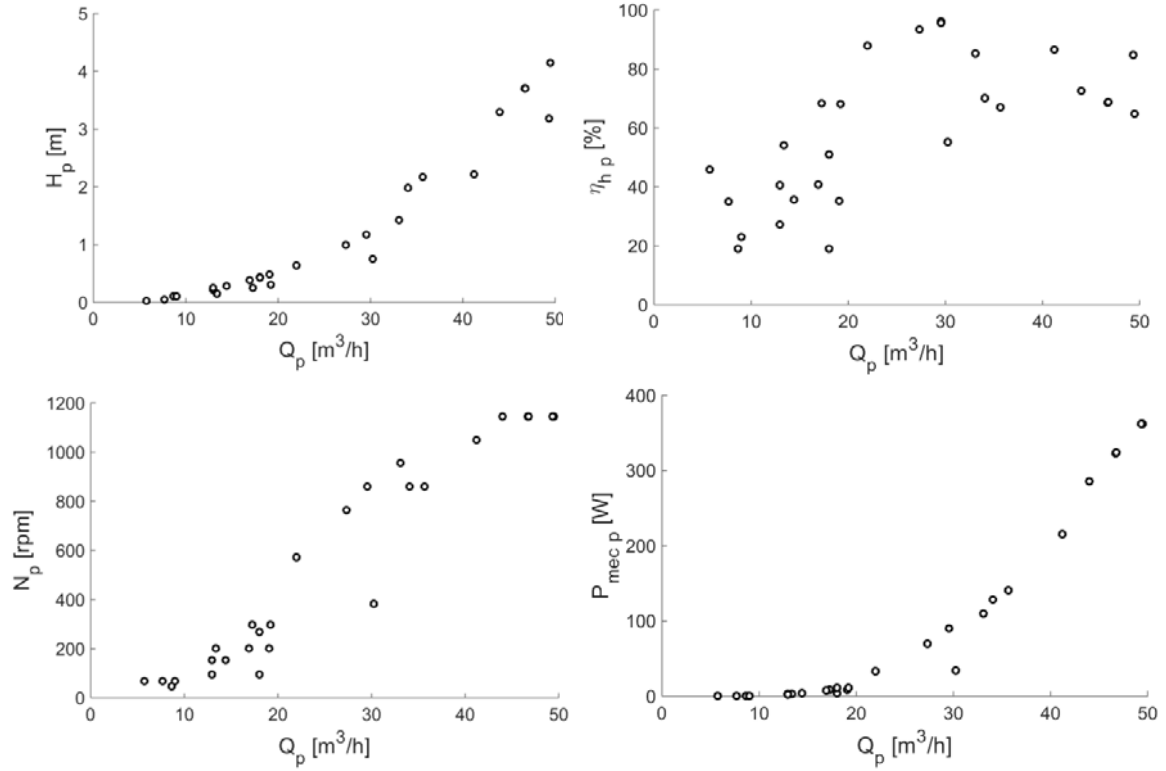


Figure 1 - Courbes caractéristiques théoriques du prototype (DN100) obtenue par simulation numérique d'écoulement 3D – fournies par l'EPFL-LCH.

La caractéristique théorique adimensionnelle de la machine à tester peut être représentée à l'aide du coefficient de débit ϕ et du celui d'énergie ψ (voir Figure 2) définis comme:

$$\phi = \frac{2 \cdot Q}{A \cdot \omega \cdot D_e} [-] \quad (4)$$

$$A = \frac{\pi}{4} (D_e^2 - D_i^2) [m^2] \quad (5)$$

$$\psi = \frac{8 \cdot E}{\omega^2 \cdot D_e^2} [-] \quad (6)$$

Les formules de similitude hydraulique pour le débit, la chute, le couple et la puissance mécanique entre le modèle et le prototype sont fournies dans les équations (7)+(10).

$$\frac{Q_m}{Q_p} = \frac{N_m}{N_p} \cdot \left(\frac{D_{em}}{D_{ep}} \right)^3 \quad (7)$$

$$\frac{H_m}{H_p} = \left(\frac{N_m}{N_p} \right)^2 \cdot \left(\frac{D_{em}}{D_{ep}} \right)^2 \quad (8)$$

$$\frac{T_{mec m}}{T_{mec p}} = \left(\frac{N_m}{N_p} \right)^2 \cdot \left(\frac{D_{em}}{D_{ep}} \right)^5 \quad (9)$$

$$\frac{P_{mec\ m}}{P_{mec\ p}} = \left(\frac{N_m}{N_p} \right)^3 \cdot \left(\frac{D_{em}}{D_{ep}} \right)^5 \quad (10)$$

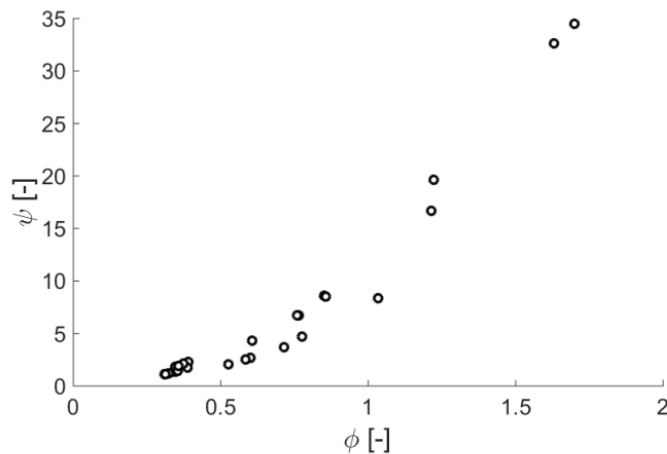


Figure 2 - Caractéristique théorique adimensionnelle de la pico-turbine à tester obtenue par simulation numérique d'écoulement 3D – fournie par EPFL-LCH

Les caractéristiques géométriques principales de la roue axiale à tester sont fournies dans le Tableau 1. Si le diamètre nominal de la roue à l'échelle prototype est de 100 mm, un diamètre de 85 mm a été choisi pour le modèle réduit afin de pouvoir couvrir toute la plage de fonctionnement de la machine. A noter ici que le jeu radial de 1 mm du prototype ne sera pas respecté sur le modèle. Il a été convenu avec le mandant de le réduire à seulement 0.1 mm (à la place de 0.85 mm) afin de minimiser les pertes volumétriques sur la roue. Ceci est également justifié par le fait que dans les simulations numériques effectuées sur le prototype aucun jeu n'a été modélisé. De plus, dans l'ensemble des calculs présentés dans le rapport, le diamètre extérieur de la roue D est toujours considéré comme étant égal au diamètre nominal DN .

Tableau 1 – Caractéristiques géométriques principales de la roue axiale à tester.

Caractéristique	Symbole	Valeur		Unité
		Echelle prototype	Echelle modèle	
Diamètre nominal	DN	100	85	[mm]
Nombre d'aubes	Z_b	5	5	[-]
Diamètre extérieur de la roue	D_e	98	84.8	[mm]
Diamètre du moyeu de la roue	D_i	50	4.25	[mm]
Jeu radial	j	1	0.1	[mm]
Niveau d'implantation	H_s	35	22.623	[m]

Pour la transposition entre le prototype et le modèle, il a été convenu de garder identique la vitesse de rotation de la roue (éq. (11)), alors que le facteur d'échelle modèle-prototype est de 0.85 (éq. (12)).

$$N_m = N_p \text{ [rpm]} \quad (11)$$

$$k_{m-p} = \frac{D_{em}}{D_{ep}} = 0.85 \text{ [-]} \quad (12)$$

Avec ces relations définies, les courbes caractéristiques théoriques du modèle (Figure 3) sont calculées à partir de celles du prototype (voir Figure 1) en utilisant les équations suivantes :

$$Q_m = Q_p \cdot k_{m-p}^3 [m^3 / s] \quad (13)$$

$$H_m = H_p k_{m-p}^2 [m] \quad (14)$$

$$T_{mec\ m} = T_{mec\ p} k_{m-p}^5 [N \cdot m] \quad (15)$$

$$P_{mec\ m} = P_{mec\ p} k_{m-p}^5 [W] \quad (16)$$

Concernant le rendement de transformation hydraulique-mécanique, aucune correction n'est appliquée concernant la transposition prototype-modèle étant donné que le facteur d'échelle géométrique est très petit (1:0.85) comparé au cas des machines de grande puissance où il est plutôt de l'ordre de 1:0.1. Autrement dit, malgré le fait que la similitude de Reynolds (eq. (17) et (18)) n'est pas respectée entre le prototype et le modèle (voir Figure 4), la différence entre les deux échelles est suffisamment petite pour pouvoir considérer que le facteur de correction sur le rendement est négligeable.

$$C_m = \frac{Q}{A} [m / s] \quad (17)$$

$$Re = \frac{C_m \cdot D_e}{\nu} [-] \quad (18)$$

Enfin, le développement du phénomène de cavitation est caractérisé par le nombre adimensionnel de Thoma (voir eq. (19) et (20)). Il représente en effet un autre paramètre qui pourrait influencer la transposition du rendement entre le prototype et le modèle. On peut observer ici que l'énergie massique nette à l'aspiration, NPSE, dépend non seulement de la pression ambiante p_{amb} , de la pression de vaporisation p_{va} et de la vitesse moyenne C_m à la sortie de la roue, mais également du niveau d'implantation de la machine H_s . Dans le Tableau 1 on peut observer que le niveau d'implantation de base du prototype est de $H_{sp} = 35$ m, ce qui représente le fonctionnement standard sur un réseau d'eau potable où la pression à la sortie de la machine doit absolument rester supérieure à environ 3 bars (pression minimale au robinet des consommateurs).

$$\sigma = \frac{NPSE}{E} [-] \quad (19)$$

$$NPSE = \frac{\rho \cdot g \cdot H_s + p_{amb} - p_{va}}{\rho} + \frac{C_m^2}{2} [-] \quad (20)$$

Considérant maintenant le respect de la similitude du nombre adimensionnel σ :

$$\sigma_m = \sigma_p [-] \quad (21)$$

Le niveau d'implantation à l'échelle modèle peut être calculé avec l'eq. (22), ce qui donne pour le cas actuel un $H_{sm} = 22.62$ m.

$$H_{sm} = H_m \cdot \left(\sigma_p - \frac{C_{mm}^2}{2 \cdot g \cdot H_m} \right) - \frac{(p_{amb} - p_{va})}{\rho \cdot g} [m] \quad (22)$$

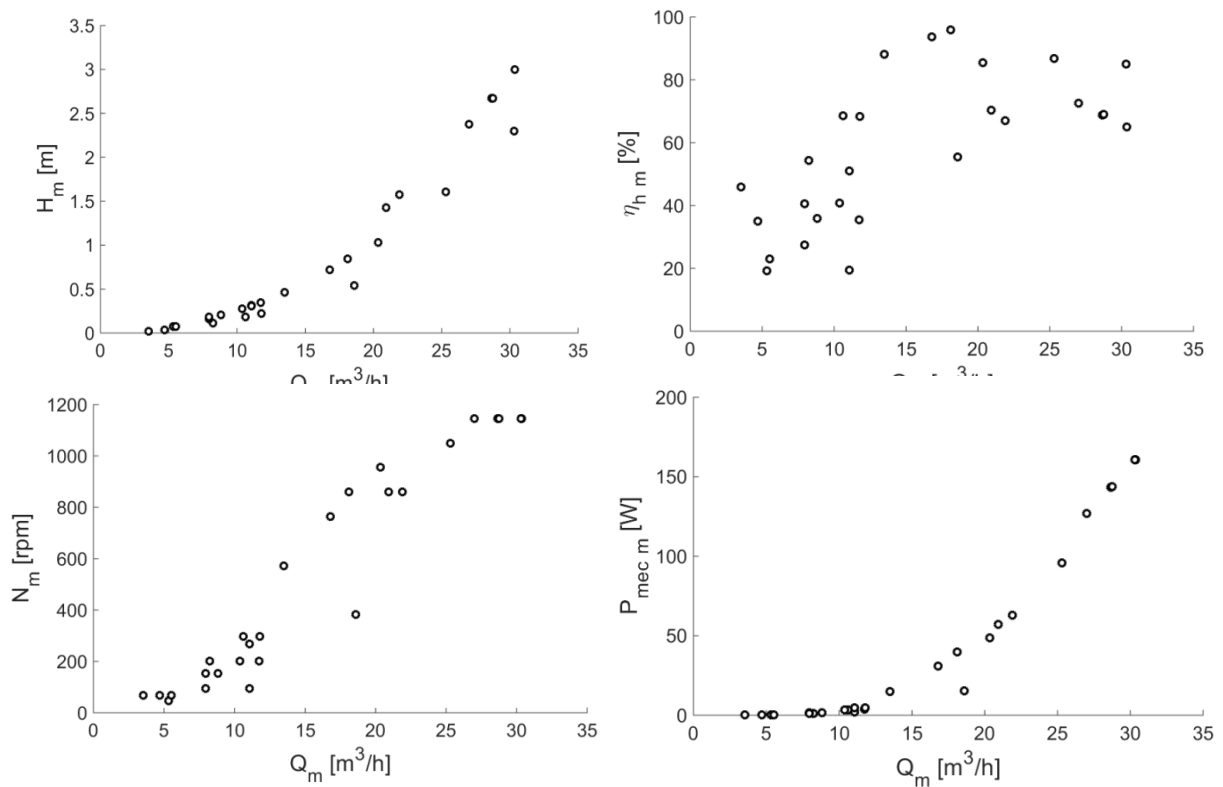


Figure 3 – Courbes caractéristiques théoriques du modèle réduit (DN85) obtenues par similitude.

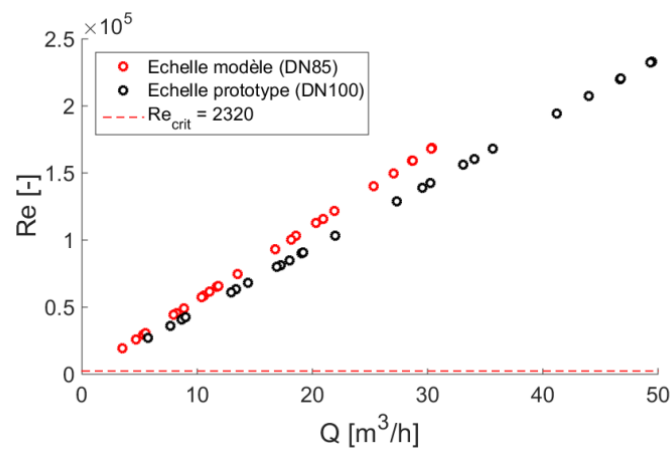


Figure 4 – Valeurs du nombre adimensionnel de Reynolds pour les points de fonctionnement théoriques de la pico-turbine.

3.2. Définition du protocole d'essais

Une fois tous les composants mécaniques de la machine à tester rassemblés, la campagne d'essais est réalisée d'après le protocole suivant :

Tableau 2 – Protocole d'essais employé pour les tests sur la pico-turbine tubulaire.

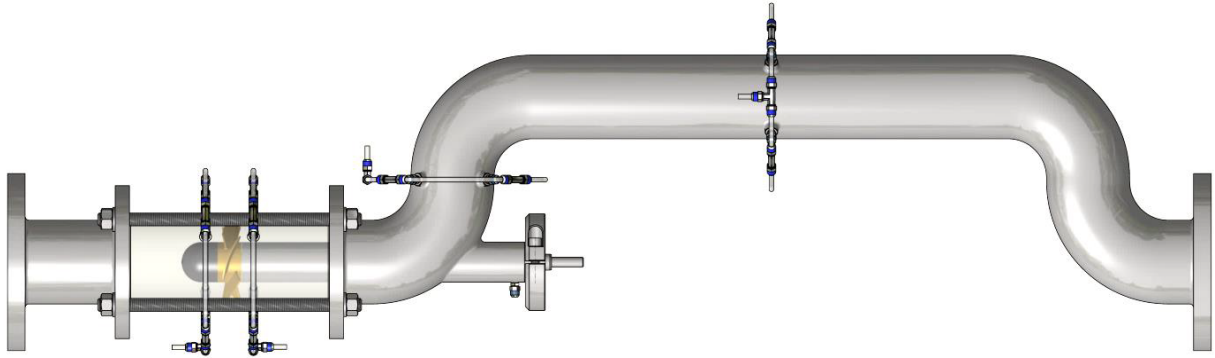
Etape	Liste d'opérations
Implantation du modèle	• Assemblage mécanique complet de la machine à tester • Alignement de la mécanique tournante (roue, tube extérieur, etc.) • Montage de la machine sur le banc d'essais • Raccordement électrique de la génératrice
Instrumentation et calibration	• Instrumentation complète pour mesurer la puissance hydraulique (capteur(s) de pression différentielle, débitmètre) • Instrumentation complète pour mesurer la puissance mécanique de la machine à tester (capteur de couple, encodeur) • Instrumentation additionnelle pour la température de l'eau, le niveau d'implantation et la pression absolue à la paroi aux différents endroits sur la machine • Calibration préalable et/ou vérification du fonctionnement de chaque capteur employé
Adaptation de l'interface de contrôle et mesures	• Modification de l'interface graphique de contrôle pour la machine à tester • Mise à jour des constants (pente et offset) de chaque capteur en conformité avec les éventuelles nouvelles courbes de calibration • Mise à jour des constants de temps d'acquisition adaptées à l'état courant de l'instrumentation
Mise en route initiale	• Mise en charge et vérification de l'étanchéité du circuit hydraulique complet • Exploration de la plage de fonctionnement afin de déterminer les valeurs minimum et maximum du débit, de la chute, du couple et de la vitesse de rotation • Identification des pentes d'accélération et décélération sécurisées pour la vitesse de rotation de la turbine et de trois pompes de recirculation
Mesures de performance hydraulique	• Tarage du couple à l'arrêt • Fixation de la hauteur d'implantation par pressurisation du réservoir aval • Purge des capteurs de pression • Mesures de performance hydraulique à vitesse de rotation constante de la roue : pour chaque vitesse de rotation choisie le débit est varié du maximum au minimum en régulant la vitesse de trois pompes de recirculation
Mesures complémentaires	• Vérification de la répétabilité des mesures : la courbe caractéristique de la turbine à la vitesse de rotation constante de 1'000 rpm est mesurée deux fois dans des jours différents • Mesure de la courbe caractéristique à l'emballement de la roue avec la génératrice découplée mécaniquement, tout en variant le débit du minimum au maximum • Mesures du couple de frottement sans chargement axiale des paliers(sans la roue) en entrainant la mécanique à l'aide de la génératrice, du zéro jusqu'à la vitesse maximale de rotation

4. SETUP EXPERIMENTAL

4.1. Modèle réduit de la pico-turbine tubulaire

La conception mécanique de la turbine, autour de la roue fournie par EPFL-LCH, a été entièrement réalisées par la HES-SO Valais. Deux versions à l'échelle prototype (DN100) ont été initialement conçues dans un premier temps, une à 90° et une autre à 45° :

Version 90°



Version 45°

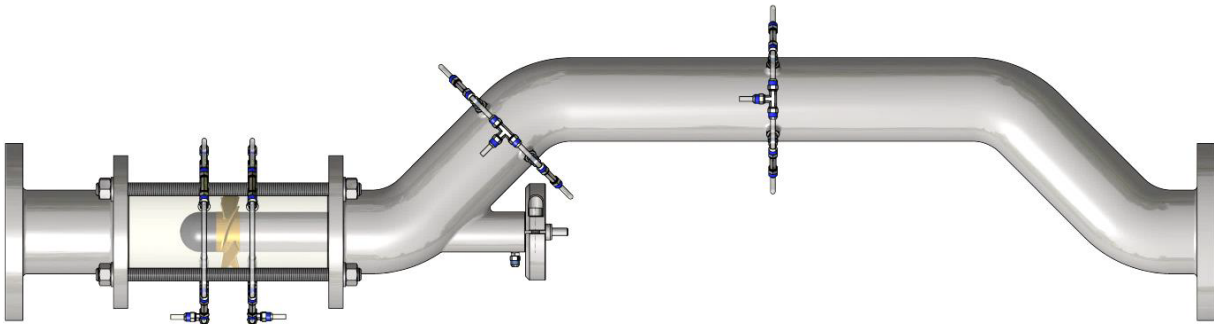


Figure 5 – Conception mécanique de la turbine tubulaire – échelle prototype (DN100).

Suite aux différents échanges techniques avec le mandant, plusieurs décisions ont été prises pour le design final de la machine à tester (voir l'Annexe 4 - Note d'information du 10 décembre 2014). Pour résumer, la version 45°, permettant de réduire les pertes hydrauliques et de rendre la machine plus compacte, a été retenue. Un facteur d'échelle modèle/prototype de 0.85 a été sélectionné pour les considérations techniques déjà expliquées dans le chapitre antérieur. Le positionnement de la roue a été choisi en amont du coude principal de la machine afin de favoriser un écoulement uniforme à son entrée. De plus, un diamètre extérieur du tube de centrage de l'arbre ($D = 42.5 \text{ mm}$) a permis de réduire les pertes hydrauliques en aval de la roue (due aux changements réduits de section) et une simplification géométrique de la machine. Le jeu radial roue-tube extérieur de 0.1 mm a été choisi comme étant le minimum possible (de point de vue mécanique) afin de limiter au maximum les pertes volumétriques sur la roue. Enfin, les quatre prises de pression statique prévues à la paroi permettent de mesurer la chute totale de la machine ainsi que la différence de pression statique sur la roue. En effet le diamètre étant constant, la vitesse débitante et donc l'énergie cinétique correspondante sont constantes. De plus, la machine étant horizontale, l'énergie potentielle est constante elle aussi. La chute disponible aux bornes de la turbine est donc égale, dans ce cas, à la différence de pression statique.

Le concept mécanique final de la pico-turbine tubulaire à l'échelle modèle (DN85) exécutée à la HES-SO Valais est illustré sur la Figure 6, alors que les éléments principaux de la transmission mécanique sont présentés dans Figure 7. Une mise en plan de l'assemblage global est fournie dans l'Annexe 5.

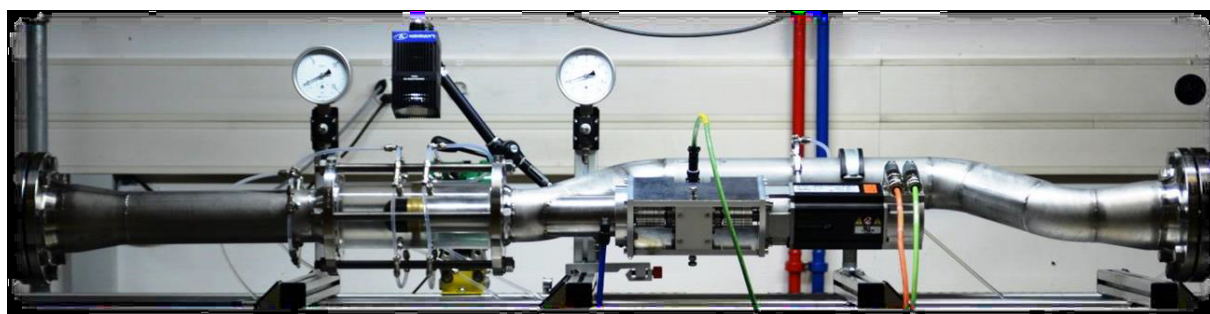
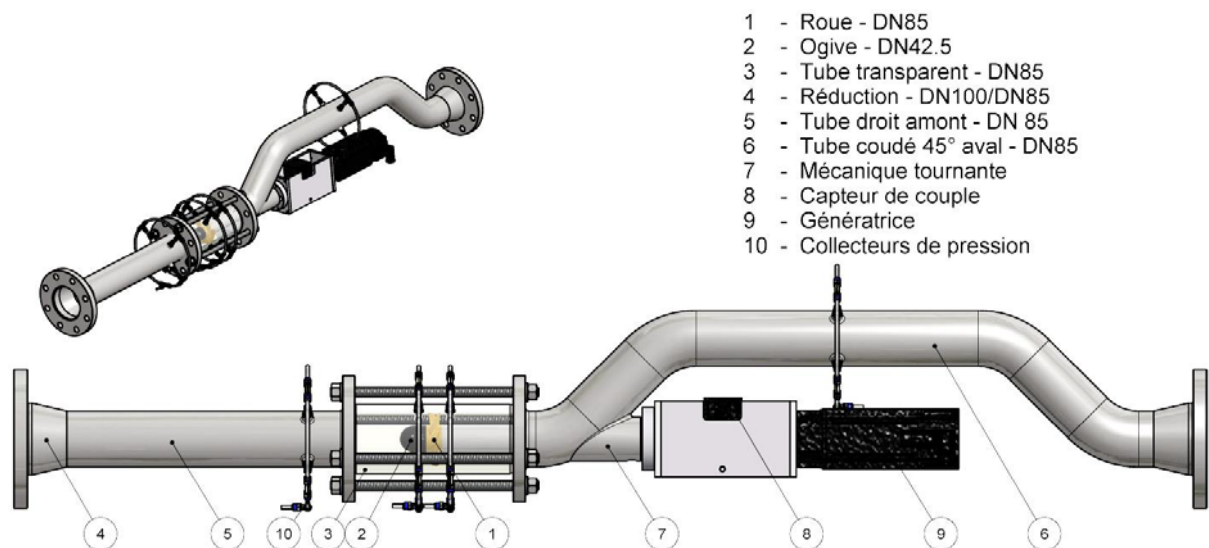


Figure 6 – Concept finale de la turbine tubulaire – échelle modèle (DN85).

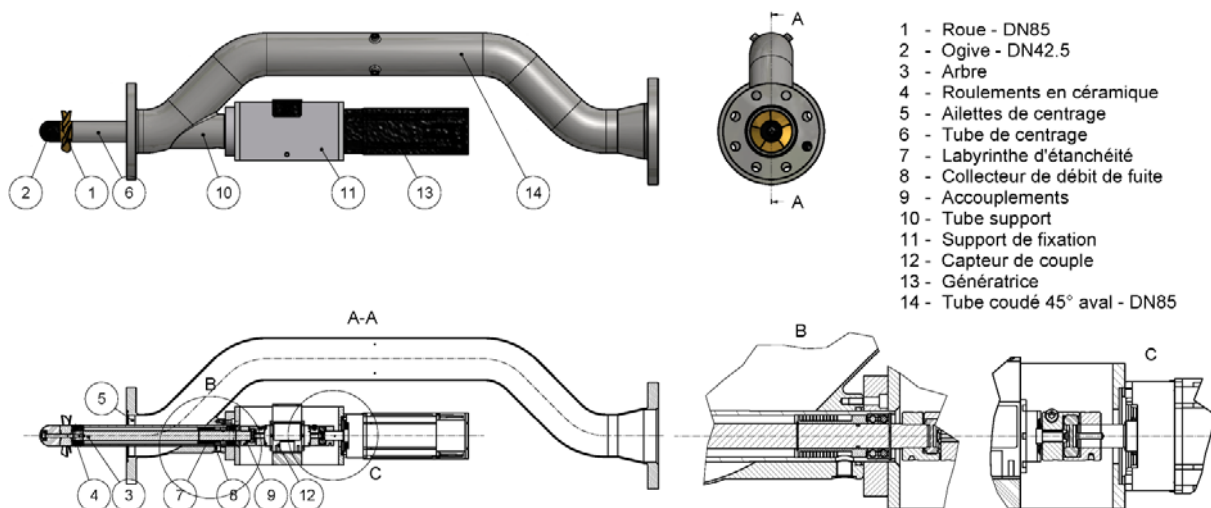


Figure 7 – Eléments principaux de la transmission mécanique - version finale DN85.

Les versions de design de la roue : initiale DN100, modifiée DN100 et finale DN85 sont présentées sur la Figure 8. Les versions fabriquées par l'EPFL-LCH par prototypage rapide (initiale DN100) ou par usinage sur une machine à 5-axes (version finale DN85), sont illustrées sur la Figure 9. Pour finir, le Tableau 3 résume l'ensemble des spécifications techniques du modèle réduit à tester.

Tableau 3 – Résumé des spécifications techniques principales du modèle réduit.

Spécification	Valeur
Corps de la machine	Version en coude à 45° Acier inoxydable – DN85, PN16 Zone transparente autour de la roue en PMMA
Roue	Bronze – DN85 Diamètre extérieur $D_e = 84.8\text{ mm}$ Diamètre intérieur $D_i = 42.5\text{ mm}$ Jeu radial $j = 0.1\text{ mm}$
Transmission mécanique	Arbre de transmission réalisé sur mesure Palier - roulements en céramique radiaux à billes – type 61904-KER-LL-ZRO2-PEEK Labyrinthe d'étanchéité réalisé sur mesure Accouplements KTR – type ROTEX GS 19
Génératrice	Servomoteur à aimants permanents Emerson – Type 095U2B300 Puissance nominale 1.23 kW Vitesse maximale 4880 rpm Fonctionnement bidirectionnel en termes de sens de rotation et de puissance
Instrumentation	Collecteurs de pression statique à la paroi en quatre points Capteur de couple Magtrol – type TM 305/011 Encodeur à 4096 ppr – intégré dans le servomoteur

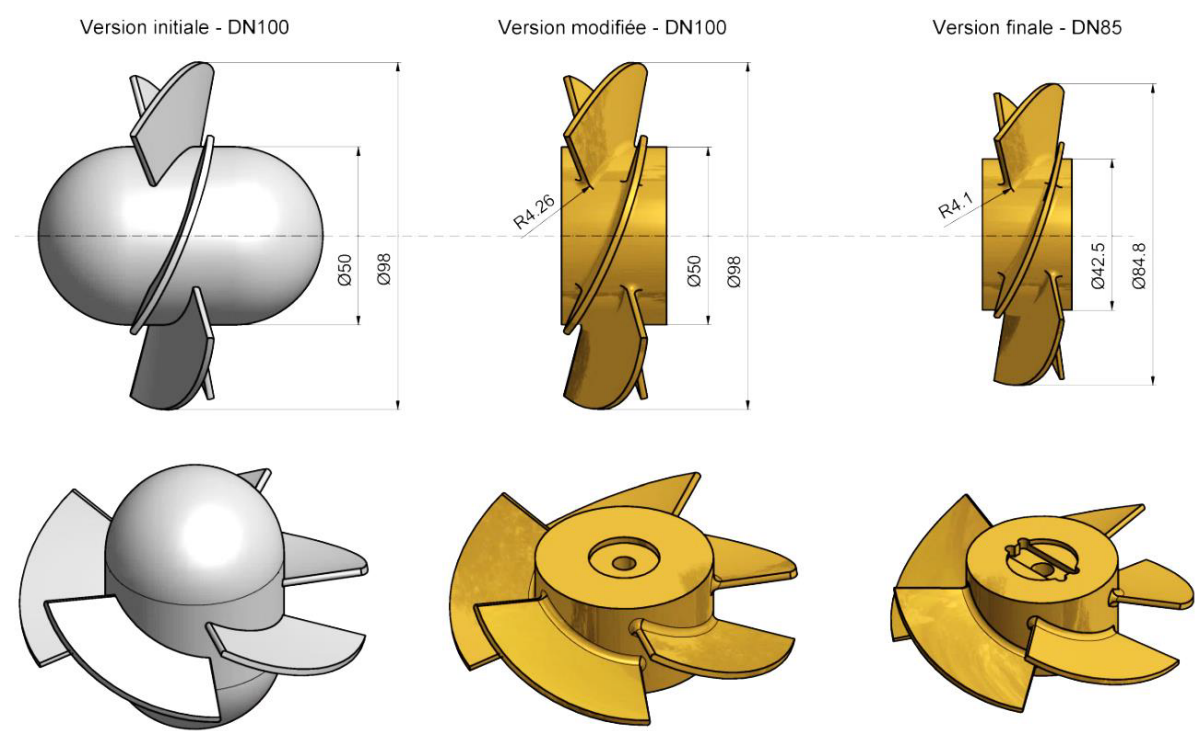


Figure 8 – Versions de design de la roue : initiale DN100, modifiée DN100 et finale DN85.

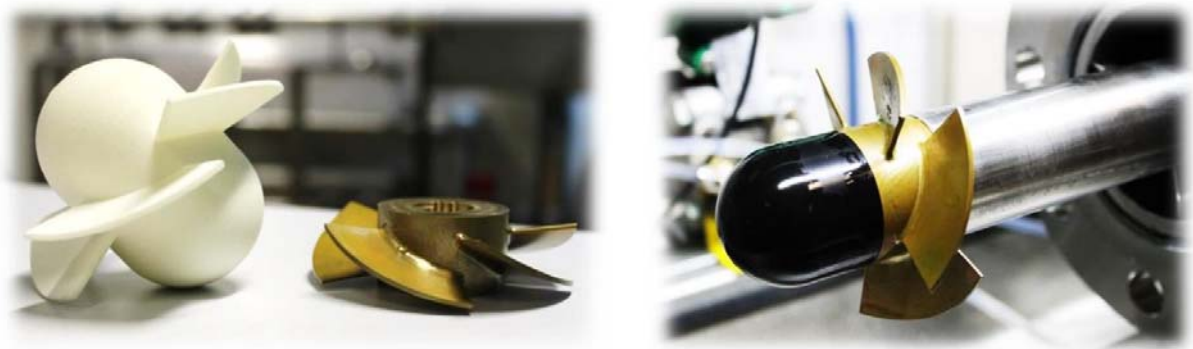


Figure 9 – Versions initiale (DN100) et finale (DN85) de la roue – fournies par EPFL-LCH.

4.2. Banc d'essais hydrauliques universel de la HES-SO VS

4.2.1. Description générale

Construit sur deux étages dans le laboratoire d'hydraulique de la HES-SO Valais (voir Figure 10), le circuit hydraulique fermé, représenté schématiquement sur la Figure 11, est alimenté avec de l'eau depuis le réservoir principal R_1 . Ce réservoir est alimenté à son tour depuis le réseau d'eau potable, sa vidange étant assurée par une pompe centrifuge immergée P4. Son volume de 3 m^3 a été choisi comme étant égal avec deux fois le volume total du circuit fermé (y compris le réservoir pressurisable R_2).

Trois pompes centrifuges multi-étage à vitesse variable, $P_{1,2,3}$, ayant chacune une puissance de 5.5 kW, sont connectées en parallèle et fournissent au circuit la puissance hydraulique. Les pompes peuvent fournir un débit maximal de $3 \times 15 \text{ m}^3/\text{h}$ et une pression maximale de 160 mCE. Le modèle à tester à vitesse variable T/P, d'une puissance maximale de 10 kW, est installé dans la partie supérieure du circuit afin de faciliter l'instrumentation et les observations au cours des mesures. Finalement, le réservoir pressurisable R_2 , placé à l'aval de la section de test, permet de simuler différents niveaux d'implantation (positive ou négative) du modèle à tester et, implicitement, de déterminer également les performances à la cavitation. Ce réservoir à surface libre a été conçu pour supporter également le vide et la surpression (jusqu'à une pression de 8 bars), son volume de 1 m^3 étant choisi comme étant égal à deux fois le volume du reste de circuit fermé.

Pour compléter, plusieurs électrovannes $EV_{2...9}$ (de type papillon) sont utilisées pour configurer le circuit hydraulique. Le reste des vannes (électriques ou manuelles) sont utilisées pour le remplissage, le refroidissement, la vidange, le control, la sécurité et l'opération du banc d'essais. De plus, des sections en nid d'abeille assurent un écoulement uniforme à l'entrée du débitmètre et du modèle à tester. Le reste des composants additionnels non-énumérés se trouve dans la liste complète avec les principaux composants hydrauliques et leur fonctionnalité dans Tableau 4.

Pour conclure, le banc d'essais avec la pico-turbine installée dans la section de tests est illustré sur la Figure 12.

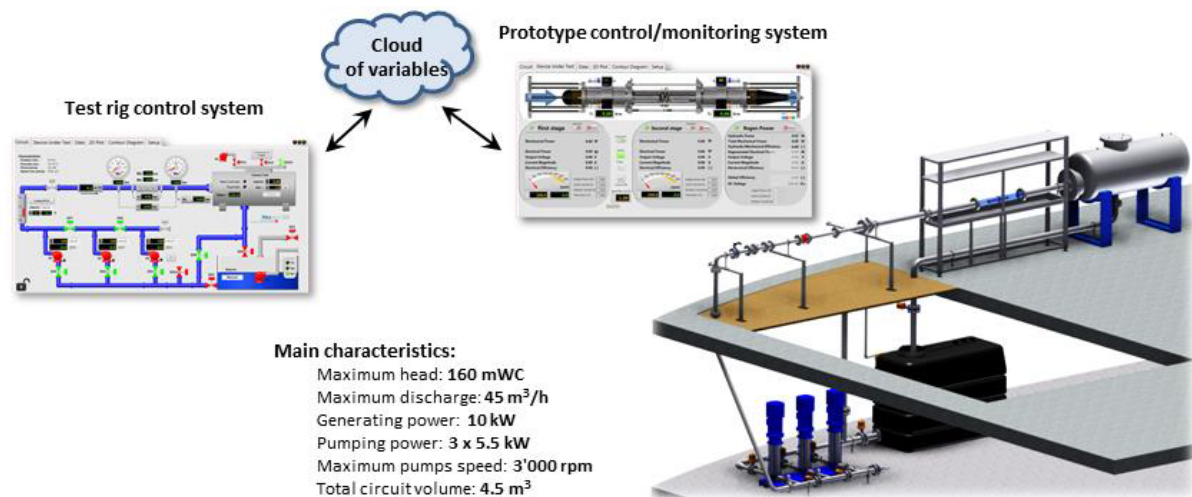


Figure 10 – Banc d'essais hydraulique universel de la HES-SO Valais².

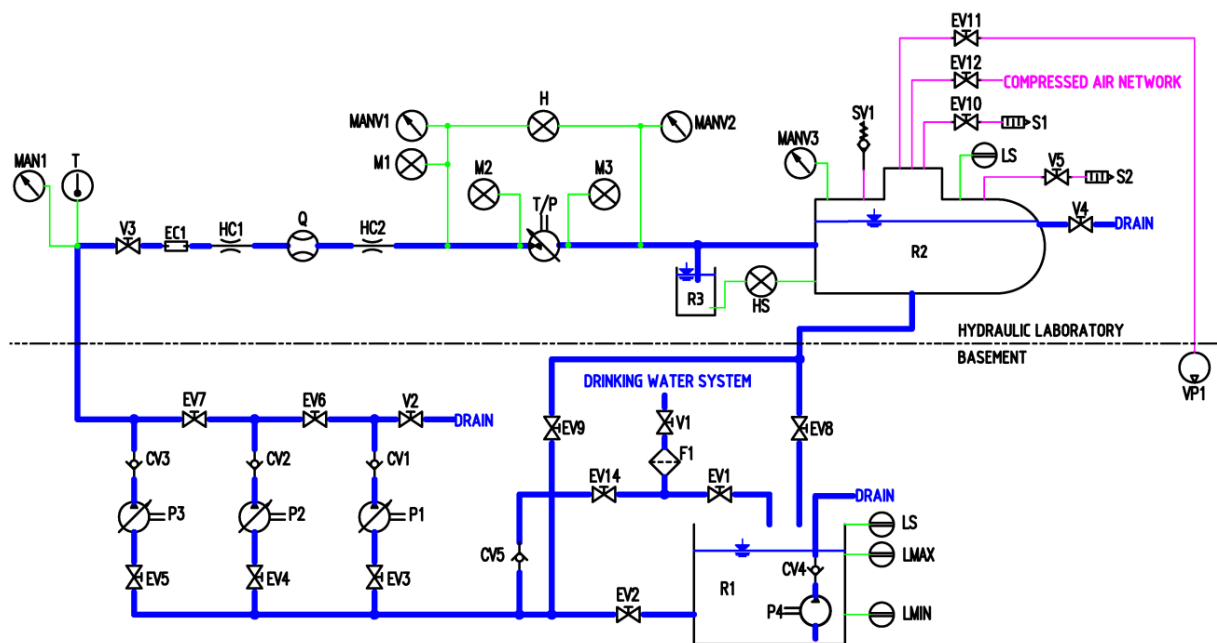


Figure 11 – Schéma de principe du circuit hydraulique.

² Hasmatuchi V., Botero F., Gabathuler S., Münch C., 2014, "Design and Control of a New Hydraulic Test Rig for Small-Power Turbomachines", Hydro 2014, Cernobbio, Italie, Oct. 13-15

Tableau 4 – Les principaux éléments du banc d'essais et leur fonctionnalité.

Acronyme	Composante	Fonctionnalité
R ₁	Réservoir principal	Alimentation du banc d'essais avec de l'eau
F ₁	Filtre	Filtrage de l'eau
EV ₁	Electrovanne	Control de l'alimentation du circuit avec l'eau de réseau
P ₄	Pompe centrifuge	Vidange du réservoir principal
CV ₄	Clapet anti-retour	Assure un écoulement unidirectionnel vers l'évacuation de l'eau
P _{1, 2, 3}	Pompes centrifuges	Alimentation du circuit avec puissance hydraulique
CV _{1, 2, 3}	Clapets anti-retour	Assure un écoulement unidirectionnel dans le circuit en mode turbine
T/P	Turbine/Pompe	Modèle à tester à vitesse variable
EV _{2, 3...9}	Electrovannes	Control de la configuration du circuit hydraulique
EV ₁₄	Electrovanne	Control de l'alimentation avec de l'eau pour le refroidissement
CV ₅	Clapet anti-retour	Assure un écoulement unidirectionnel vers le circuit pendant le refroidissement
EC ₁	Compensateur de dilatation	Assure une flexibilité dimensionnelle axiale pendant le montage du modèle
HC _{1, 2}	Sections nid d'abeille	Assure un écoulement uniforme en amont du débitmètre et du modèle à tester
R ₂	Réservoir pressurisable	Permet de simuler différents niveaux d'implantation (positive ou négative) du modèle
EV _{10, 11, 12}	Electrovannes	Control de la pression de l'air dans le réservoir pressurisable
VP ₁	Pompe à vide	Alimentation du réservoir pressurisable avec du vide
SV ₁	Vanne de sécurité	Protection du réservoir pressurisable contre la surpression
S _{1, 2}	Silencieux	Réduction du bruit pendant l'évacuation de l'air du réservoir pressurisable
R ₃	Réservoir de niveau	Indique le niveau zéro d'implantation du modèle à tester
V _{1, 2, ...}	Vannes manuelles	Sécurité et control pendant le remplissage, la vidange et l'opération du banc d'essais



Figure 12 – Modèle réduit de la pico-turbine installé sur le banc d'essais.

4.2.2. Instrumentation

Chute, pression absolue et niveau d'implantation du modèle

Comme spécifié dans l'Annexe 4, il a été décidé avec le mandant de mesurer non seulement la chute totale H disponible aux bornes de la turbine mais également la chute de pression statique à la paroi entre l'entrée et la sortie de la roue, H_t . Pour cela, 4 collecteurs ont été spécialement conçus et installés sur le modèle aux positions décrites sur la Figure 13. Par ce système, la pression à la paroi est récupérée simultanément en 4 points (déphasés à 90°) dans la même section, permettant ainsi de moyenner et de lisser la valeur mesurée. A noter ici que le perçage de la paroi au contact avec le liquide est de seulement $\Phi 2\text{mm}$ de diamètre, permettant ainsi de rester le moins intrusive possible. Enfin, les collecteurs sont reliés aux capteurs de pression afférents.

Les trois capteurs de pression absolue M_1 , M_2 et M_3 , ainsi que les deux capteurs de pression différentielle H et H_t , présentés dans Figure 14, permettent de caractériser entièrement la chute de pression statique à la paroi depuis l'entrée jusqu'à la sortie de la machine, y compris autour de la roue. Ensuite, un troisième capteur de pression différentielle, reliant d'un côté une colonne de liquide fixé au même niveau que l'axe de la machine et de l'autre côté le réservoir pressurisable R_2 , permet de récupérer le niveau d'implantation H_s dans des conditions de fonctionnement à l'atmosphère, sous pression ou sous vide.

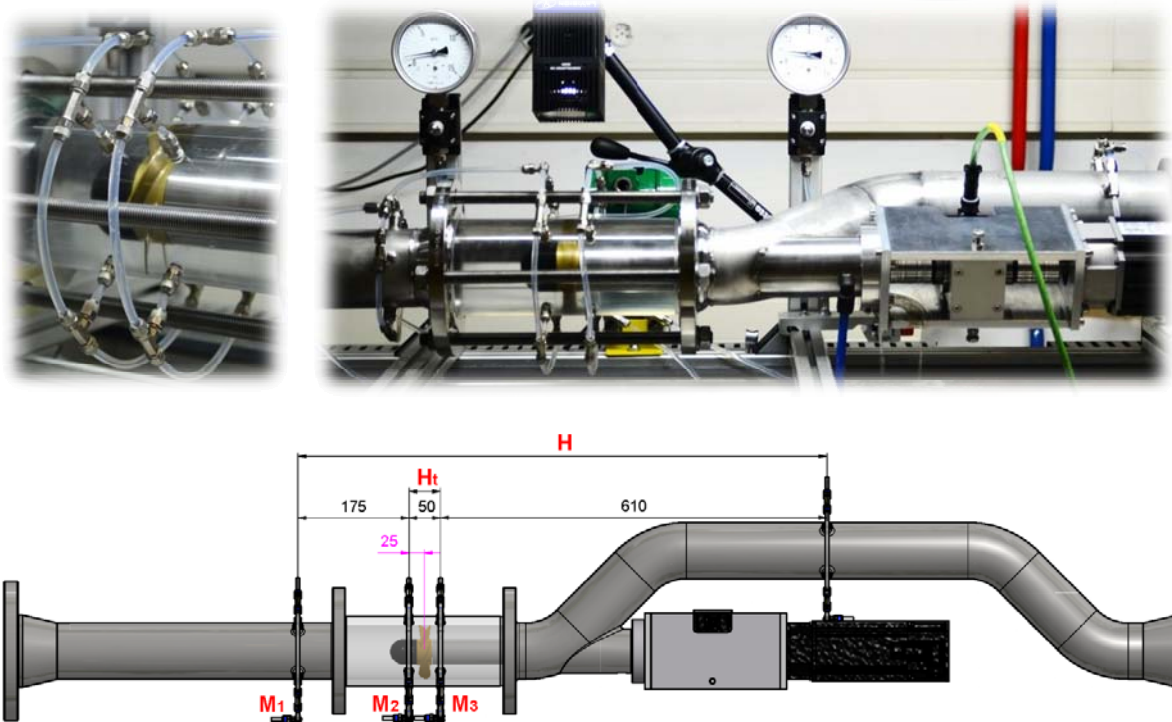


Figure 13 – Position des collecteurs de pression statique installés sur le modèle.

Pour ce qui concerne la calibration, une vérification de la constante de chaque capteur a été préalablement effectuée. Pour cela, un capteur de pression de référence à haute précision, Haenni M 1900/2 (voir Figure 15), a été employé. En effet, pour chaque capteur, le signal électrique de sortie en courant a été enregistré pour différents niveaux statiques précis de pressurisation (fournis par le capteur de référence) entre l'atmosphère et la valeur maximale donnée par le fabricant. Les fiches de calibration résultantes des capteurs de pression employés pour ces tests sont fournies dans les Annexes 7 - 10.

Débit

Les mesures du débit ont été effectuées à l'aide d'un débitmètre électromagnétique Magflo – Mag3100 Water équipé d'un analyseur Mag 5000 (voir Figure 16). Le débitmètre peut effectuer des mesures sur une plage de 0 à 50 m³/h avec une précision de $\pm 0.5\%$ (voir le dernier certificat d'étalonnage dans l'Annexe 6). Comme déjà indiqué dans la description du banc d'essais, une section en nid d'abeille a été installée en amont du débitmètre afin d'assurer un écoulement uniforme à son l'entrée et, implicitement, d'améliorer la précision de mesure. De plus, étant donné que le débitmètre est placé dans le circuit hydraulique en amont de la pico-turbine et que le débit de fuite à travers le labyrinthe de la machine s'écoule uniquement après la roue, la valeur mesurée est considérée telle quelle dans le calcul de la puissance hydraulique. A noter encore ici que le débit de fuite à travers le labyrinthe n'a pas été mesuré dans ces tests. En effet, la quantité infime d'eau sortante du labyrinthe n'a pas été suffisante pour assurer un écoulement mesurable, même pour un débitmètre avec une plage d'uniquement 0.06 à 20 L/min, disponible dans le laboratoire.



Fabricant : Endress+Hauser
Type : Deltabar M PMD55
Plage de fonctionnement : 0..16 [bar]
Signal de sortie : 4..20 [mA]
Précision de mesure : ± 0.1 [%]



Fabricant : Schlumberger
Type : 8D
Plage de fonctionnement : 0..1 [bar]
Signal de sortie : 4..20 [mA]
Précision de mesure : ± 0.5 [%]



Fabricant : Endress+Hauser
Type : Cerabar T PMC 131
Plage de fonctionnement : 0..20 / 20 / 10 [bar]
Signal de sortie : 4..20 [mA]
Précision de mesure : ± 0.05 [%]



Fabricant : Fuji
Type : FCX-CII Series
Plage de fonctionnement : 0..5 [bar]
Signal de sortie : 4..20 [mA]
Précision de mesure : ± 0.2 [%]

Figure 14 – Capteurs de pression différentielle et absolue.

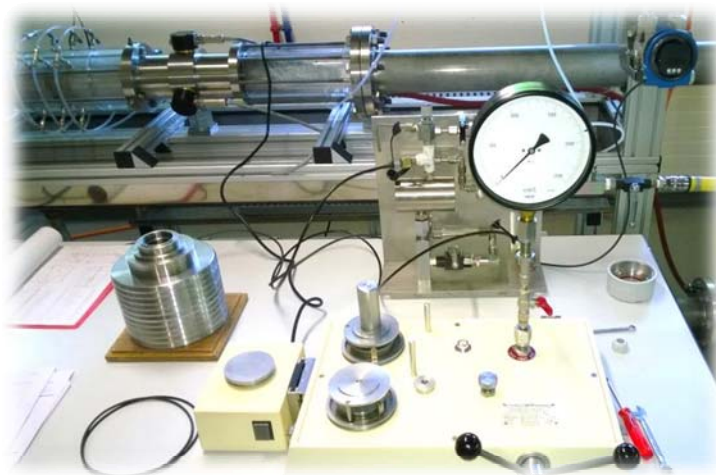


Figure 15 – Setup pour la calibration des capteurs de pression différentielle et absolue.



Fabricant : Danfoss
Type : MAGFLO – MAG3100 Water
Analyseur : MAGFLO – MAG5000
Taille : DN65
Plage de fonctionnement : 0..50 [m³/h]
Signal de sortie : 4..20 [mA]
Précision de mesure : ± 0.5 [%]

Figure 16 – Débitmètre électromagnétique Danfoss Magflo.

Température

La température de l'eau a été mesurée à l'aide d'une sonde PT100 équipée avec un transmetteur de courant intégré (voir Figure 17), installé dans le circuit hydraulique dans le coude principal à l'arrivée de la ligne droite supérieure du banc d'essais.



Fabricant : Endress+Hauser
Type : Easytemp TMR 31
Plage de fonctionnement : 0..100 [°C]
Temps de réponse : < 3 [s]
Signal de sortie : 4..20 [mA]
Précision de mesure : ± 0.1 [%]

Figure 17 – Capteur de température Endress+Hauser Easytemp TMR 31.

Comme pour la pression, une vérification préalable du capteur a été effectuée à l'aide d'un capteur de référence de précision Jofra D55SE. Le signal électrique de sortie en courant a été enregistré pour différents niveaux statiques précis de température (fournis par le capteur de référence) entre 0 et 100°C. La fiche de calibration résultante est fournie dans l'Annexe 11.

Couple et vitesse de rotation

Le couple mécanique à l'arbre de la roue a été mesuré à l'aide d'un capteur Magtrol TM 305/011 équipé d'un analyseur Magtrol 3410 Torque Display (voir Figure 18). Le capteur a été fixé entre l'arbre de la roue et celui de la génératrice à l'aide des accouplements KTR Rotex GS 19. Préalablement à son utilisation, une vérification de la constante du capteur a été effectuée. Le setup pour la calibration est illustré dans Figure 19. En effet, le signal électrique de sortie en tension a été enregistré pour différents niveaux statiques précis de couple (appliqué à l'arbre du capteur avec une poulie et des poids) entre -4 et 4 Nm. La fiche de calibration résultante du capteur est fournie dans l'Annexe 12.



Fabricant : Magtrol
Type : TM 305/011
Analyseur : Magtrol 3410 Torque Display
Plage de fonctionnement : -4..4 [Nm]
Signal de sortie : -10..10 [V]
Précision de mesure : ± 1 [%]

Figure 18 – Capteur de couple Magtrol TM 305/011.

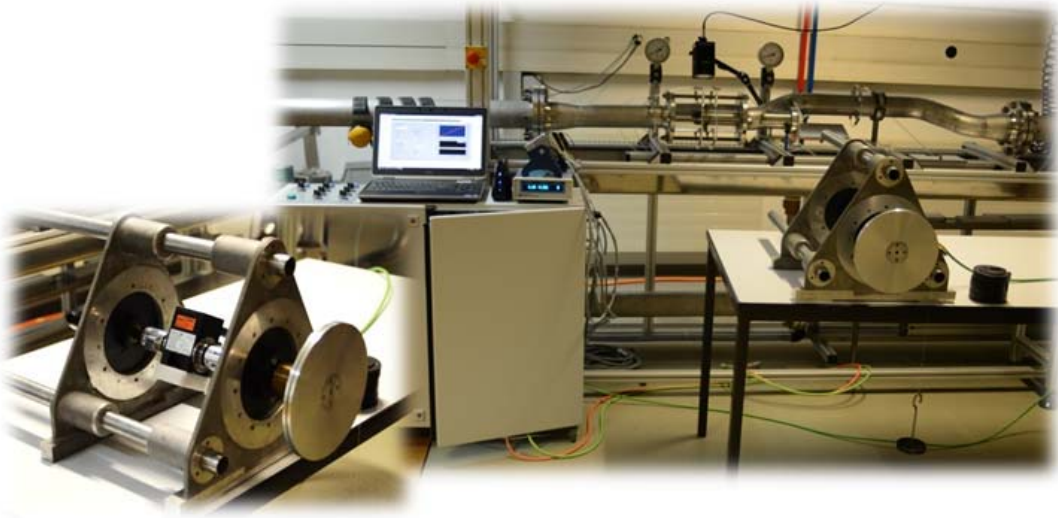


Figure 19 – Setup pour la calibration du capteur de couple.

Enfin, la vitesse de rotation est mesurée à l'aide d'un encodeur à 4096 ppr (pulses par rotation) intégré dans le servomoteur. La valeur directement interprétée est fournie par le convertisseur de fréquence Emerson Unidrive SP 1403 (voir la configuration de l'électronique de commande dans l'Annexe 13).

4.2.3. Système d'acquisition

Le système de régulation autonome, basé sur mesures en temps réel, a été développé en utilisant les propriétés d'un Compact RIO 9074 de National Instruments (voir Figure 20 et Tableau 5) équipé avec 5 modules (de différents types) adaptés aux capteurs et relais utilisés. La communication entre le banc d'essais et les autres systèmes de contrôle et monitoring (voir le système de control du modèle à tester) est assuré par une architecture Wi-Fi. Cette architecture spécifique de réseau, implémentée dans Labview 2013, fournit de la robustesse et de la modularité au système automatique de régulation. De plus, les valeurs des différents systèmes d'acquisition sont collectées par le moteur des variables partagées (Shared Variable Engine SVE), qui tourne dans le contrôleur, et partagées à chaque client connecté au réseau local de pilotage. Une telle approche permet une centralisation sécurisée des données, ainsi que le stockage et le partage.

Enfin, une boucle multiple Proportionnelle-Intégrale-Dérivée (PID) a été implémentée pour contrôler la régulation de la vitesse de rotation des pompes centrifuges de recirculation. Leurs points de fonctionnement peuvent être fixés par trois paramètres différents : la vitesse de rotation, la chute et le débit. La calibration initiale des coefficients PID a été réalisée pour chaque pompe par la méthode « step-response » de Ziegler-Nichols. De plus, en fonction de la rapidité et de la stabilité désirées pour la réponse du système, les constantes PID peuvent être ajustées sur mesure.

Le contrôle du banc d'essais et du modèle de test est effectué à travers six interfaces conçues sur mesure avec le logiciel Labview (voir Figure 21). La première est dédiée au contrôle et monitoring des paramètres spécifiques du banc d'essais. La deuxième est dédiée au modèle à tester, reliée au système de contrôle et acquisition NI cDAQ-9174, connectée physiquement à l'un des ordinateurs client. Cette interface est en effet la seule adaptée à chaque campagne de test. Pour la pico-turbine tubulaire, l'interface dédiée, créée sur mesure, peut être observée sur la Figure 22. Ensuite, une troisième interface permet à l'utilisateur de régler les différents paramètres pour l'acquisition et le contrôle. Les trois interfaces restantes donnent accès aux données complètes de mesure, au même temps que l'affichage des graphiques 2D et 3D, en temps réel, avec les paramètres désirées disponibles dans la table de mesure et enregistrement.

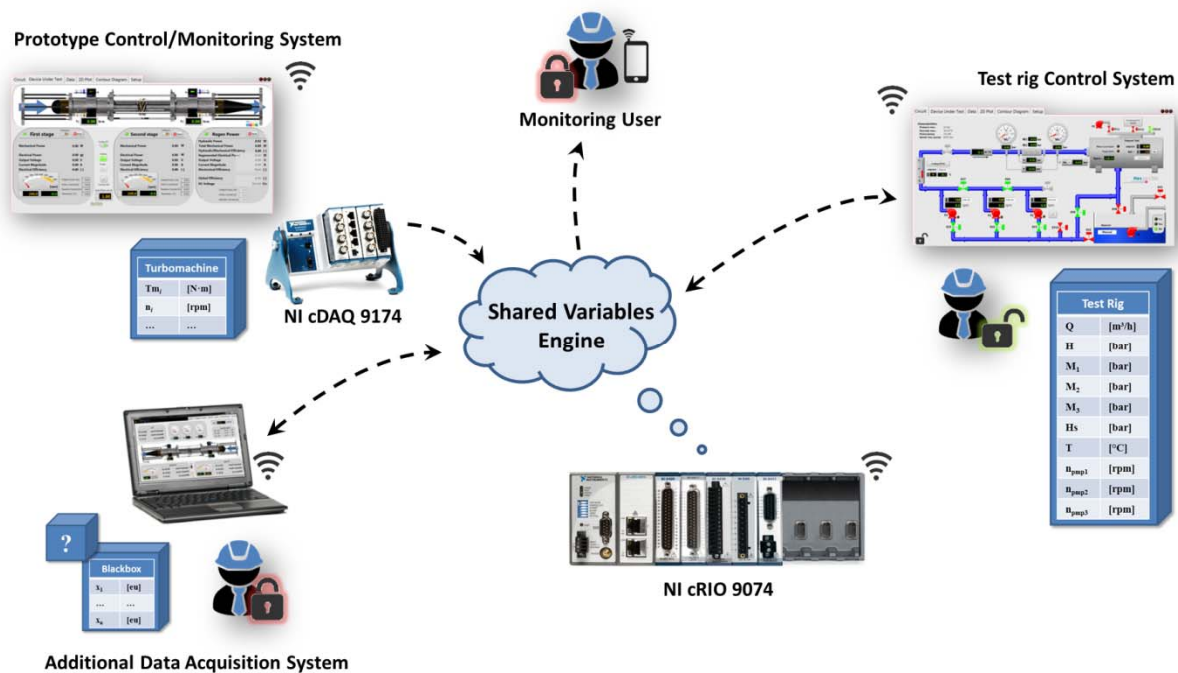


Tableau 5 – Spécifications techniques des principaux éléments du système de contrôle et acquisition du banc d'essais et du modèle de test.

Composante		Spécifications
Contrôle et acquisition des données du banc d'essais	NI CompactRIO-9074	- Système embarqué de contrôle et de surveillance - Equipé d'un processeur industriel temps réel 400 MHz - Châssis FPGA à 8 emplacements et 2 millions de portes - Communication par 2 ports Ethernet 10/100 BaseT et 1 port série RS-232
	• NI 9425	- Module d'entrées numériques à courant absorbé 32 voies, 7 µs - Compatible avec des niveaux logiques 24 V
	• NI 9477	- Module de sortie numérique 32 voies, 8 µs - Sorties numériques à courant absorbé, gamme de sortie de 5 V à 60 V, jusqu'à 1 A par voie (20 A par module)
	• NI 9203	- Module d'entrée de courant 8 voies, 200 kéch./s - ±20 mA, entrées programmables de 0 à 20 mA, résolution de 16 bits
	• NI 9265	- Module de sortie analogique 4 voies à échantillonnage simultané 100 kéch./s/voie - Gamme de sortie de 0 à 20 mA, résolution de 16 bits
Contrôle et acquisition des données du modèle de test	• NI 9411	- Module d'entrée numérique 6 voies, 500 ns - Entrées numérique différentielle/asymétrique ±5 V à 24 V
	NI cDAQ-9174	- Châssis à 4 emplacements destiné aux systèmes de test de mesures de signaux mixtes compacts et portables. - Intègre 4 compteurs/timers 32 bits d'usage général. - Transfer des mesures de signaux en continu par NI Signal Streaming via une connexion USB
	• NI 9205	- Module d'entrées asymétriques (32) ou différentielles (16), 250 kéch./s - Gammes de mesures programmables de ±200mV, ±1V, ±5V et ±10V ; résolution de 16 bits
	• NI 9203	- Module d'entrée de courant 8 voies, 200 kéch./s - ±20 mA, entrées programmables de 0 à 20 mA, résolution de 16 bits

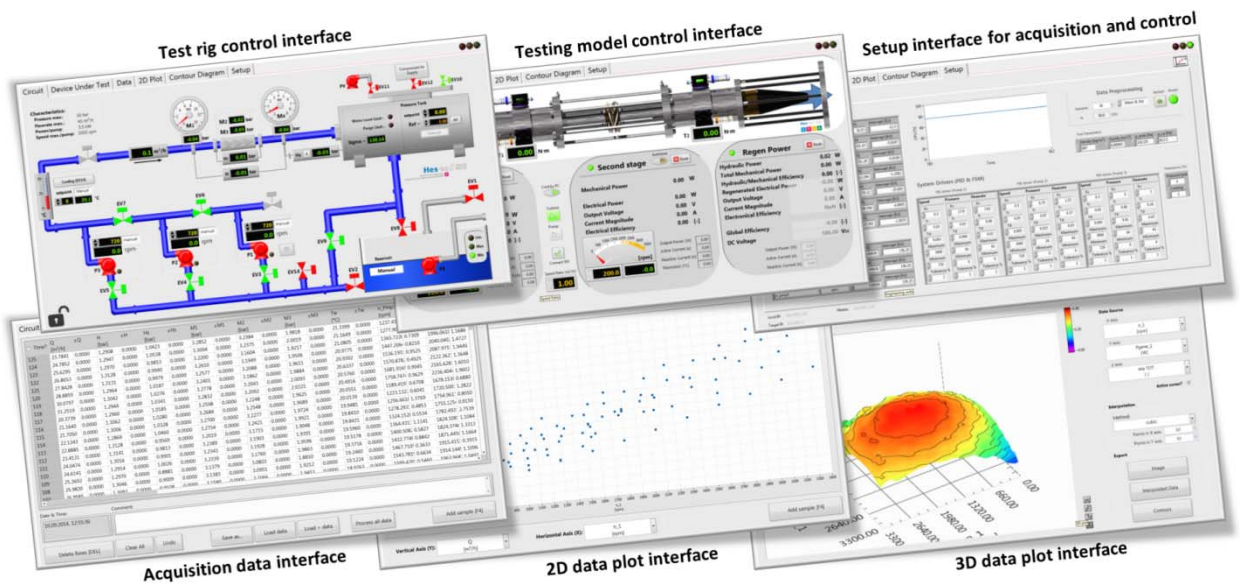


Figure 21 – Interfaces du system de contrôle et acquisition du banc d'essais.

Concernant l'acquisition des données, les valeurs des principaux paramètres utilisés pour les mesures effectuées dans le cadre du projet actuel sont listées dans le Tableau 6, alors que la liste des variables d'entrée/sortie enregistrées utilisées est présentée dans le Tableau 7. A retenir ici que les valeurs affichées et enregistrées ce sont pour la plupart des moyennes glissantes. En revanche, les valeurs envoyés par le convertisseur de fréquence (la vitesse de rotation du modèle N , l'intensité du courant I , la tension aux bornes U et la puissance électrique P_e de la génératrice) ce sont des valeurs instantanées.

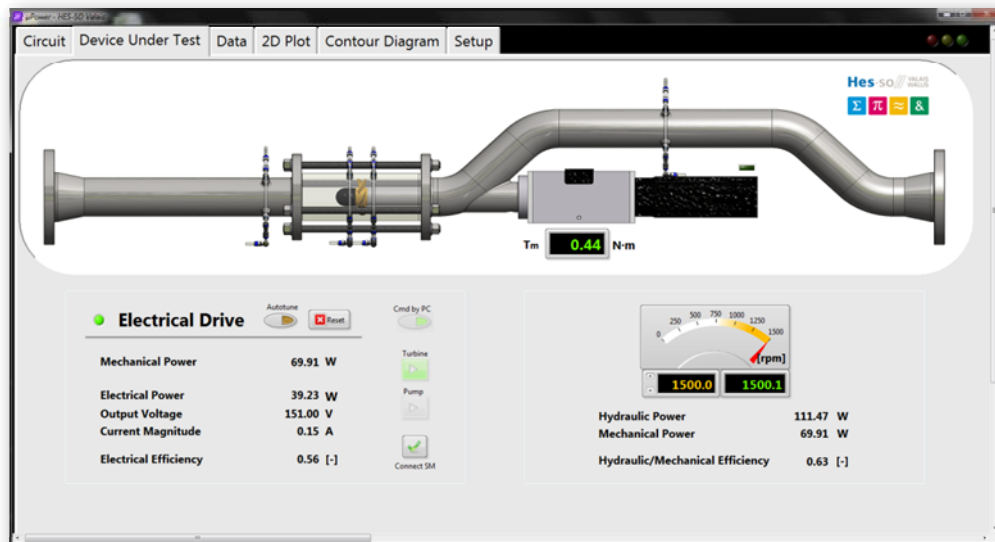


Figure 22 – Interface de contrôle et d'acquisition Labview dédiée à la pico-turbine tubulaire.

Tableau 6 – Valeurs des principaux paramètres d'acquisition.

Système d'acquisition	Paramètre	Valeur	Variables
Acquisition des données du banc d'essais	Vitesse d'acquisition	50 [Hz]	$N_{\text{pump1, 2, 3}}, T_w, Q, M_{1, 2, 3}, H, H_s$
	Nombre d'échantillons	200	
	Calcul des valeurs enregistrées	Moyenne et écart type	
Acquisition des données du modèle de test	Vitesse d'acquisition	1'000 [Hz]	T_{mec}, H_t
	Nombre d'échantillons	900	
	Nombre des paquets	10	
	Calcul des valeurs enregistrées	Moyenne et écart type	

Tableau 7 – Liste des variables d'entrée/sortie enregistrées.

Variable	Acronyme	Unité	Type de signal		Enregistrement
			Entrée	Sortie	
Vitesse de rotation des pompes	$N_{\text{pump1, 2, 3}}$	[rpm]	x	x	x
Température de l'eau	T_w	[°C]	x		x
Débit	Q	[m ³ /h]	x	(x)	x
Pression statique absolue	$M_{1, 2, 3}$	[bar]	x		x
Chute totale sur modèle	H	[bar]	x	(x)	x
Chute sur la roue	H_t	[bar]	x		x
Niveau implantation	H_s	[bar]	x	(x)	x
Vitesse de rotation du modèle	N	[rpm]	x	x	x
Couple	T_{mec}	[Nm]	x		x
Intensité du courant sur le moteur	I	[A]	x		x
Tension aux bornes du moteur	U	[V]	x		x
Puissance électrique du moteur	P_e	[W]	x		x

5. RESULTATS

5.1. Points de fonctionnement

En suivant les étapes du protocole d'essais (voir Tableau 2), une mise en route initiale de la pico-turbine a été effectuée préalablement aux tests de performance hydraulique. Avec l'étanchéité du circuit hydraulique validé, la plage de fonctionnement du modèle a été explorée afin de pouvoir déterminer les valeurs minimales et maximales du débit, de la chute, du couple et de la vitesse de rotation. De plus, des pentes d'accélération et décélération sécurisées ont été identifiées pour la vitesse de rotation de la turbine et des trois pompes de recirculation.

La procédure de mesures de performance hydraulique appliquée consiste dans un premier temps au tarage du couple à l'arrêt, suivi par la purge du circuit hydraulique et de l'ensemble des capteurs de pression (différentielle et absolue). La hauteur d'implantation du modèle est également fixée (à environ 1 [bar]) par pressurisation du réservoir aval.

Les mesures de performance hydraulique ont été effectuées à vitesse de rotation constante de la roue de la turbine. Pour chaque vitesse de rotation choisie, le débit a été varié progressivement de sa valeur maximale à sa valeur minimale en régulant la vitesse de trois pompes de recirculation. Plus précisément, pour chaque vitesse de pompes choisie, une fois le point de fonctionnement stabilisé, une mesure simultanée de toutes les variables d'entrée/sortie a été effectuée. A noter ici qu'à partir des signaux accueillis avec les paramètres du Tableau 6, le programme enregistre non seulement les valeurs moyennes mais également l'écart type, là où cela est possible.

Le Tableau 8 inclut les paramètres principaux de tous les points de fonctionnement mesurés en vue de reconstituer la colline de rendement de la pico-turbine tubulaire.

Tableau 8 – Paramètres principaux des points de fonctionnement mesurés.

Q [m ³ /h]	H [bar]	H _t [bar]	H _s [bar]	E [J/kg]	σ [-]	N [rpm]	T _{mec} [Nm]	P _{mec} [W]	P _h [W]	η _h [-]
5.808	0.0090	0.0111	0.8631	0.900	206.662	48.100	0.065	0.325	1.447	0.225
6.538	0.0131	0.0148	0.8729	1.312	142.444	50.600	0.088	0.467	2.376	0.197
5.132	0.0072	0.0100	0.8886	0.725	260.091	48.800	0.052	0.266	1.030	0.258
7.476	0.0161	0.0165	0.8976	1.614	117.343	51.000	0.103	0.549	3.342	0.164
8.409	0.0211	0.0203	0.8996	2.121	89.422	50.800	0.131	0.698	4.939	0.141
9.683	0.0284	0.0259	0.9086	2.844	67.033	50.100	0.173	0.907	7.626	0.119
10.983	0.0355	0.0316	0.9185	3.565	53.762	50.400	0.213	1.126	10.843	0.104
12.345	0.0482	0.0399	0.9238	4.830	39.807	51.300	0.278	1.495	16.513	0.091
13.952	0.0624	0.0499	0.9369	6.255	30.965	52.000	0.356	1.940	24.168	0.080
15.671	0.0784	0.0618	0.9427	7.859	24.732	52.200	0.446	2.439	34.106	0.071
17.719	0.1017	0.0785	0.9572	10.198	19.216	49.200	0.570	2.938	50.041	0.059
19.722	0.1279	0.0970	0.9649	12.825	15.352	52.000	0.713	3.881	70.049	0.055
22.104	0.1577	0.1194	0.9908	15.818	12.625	53.100	0.879	4.888	96.832	0.050
24.428	0.1973	0.1467	0.9963	19.794	10.129	51.500	1.097	5.917	133.914	0.044
26.662	0.2355	0.1734	1.0118	23.623	8.563	52.400	1.300	7.136	174.425	0.041
28.469	0.2691	0.1979	1.0257	26.990	7.554	53.300	1.490	8.318	212.796	0.039
30.444	0.3063	0.2241	1.0373	30.725	6.682	52.000	1.693	9.220	259.048	0.036
32.448	0.3468	0.2536	1.0530	34.788	5.954	52.400	1.918	10.526	312.618	0.034
34.463	0.3933	0.2862	1.0590	39.452	5.273	53.100	2.173	12.082	376.546	0.032
36.676	0.4431	0.3213	1.0675	44.446	4.707	51.700	2.446	13.241	451.450	0.029
39.457	0.5125	0.3706	1.0846	51.403	4.112	53.800	2.823	15.903	561.692	0.028
42.011	0.5820	0.4209	1.0936	58.371	3.644	50.400	3.204	16.908	679.125	0.025
44.320	0.6464	0.4663	1.1030	64.834	3.302	47.100	3.552	17.518	795.778	0.022
46.613	0.7138	0.5140	1.1090	71.598	3.005	47.800	3.916	19.602	924.286	0.021
9.326	0.0180	0.0194	0.7986	1.802	99.667	249.000	0.103	2.694	4.654	0.579
9.903	0.0218	0.0211	0.8258	2.184	83.481	247.400	0.119	3.091	5.990	0.516
10.412	0.0249	0.0236	0.8339	2.497	73.353	249.900	0.133	3.490	7.199	0.485
11.263	0.0298	0.0280	0.8393	2.986	61.527	247.200	0.162	4.187	9.315	0.450
11.924	0.0355	0.0317	0.8451	3.556	51.835	247.200	0.193	4.999	11.745	0.426
12.718	0.0412	0.0359	0.8536	4.137	44.774	248.100	0.224	5.819	14.573	0.399
13.620	0.0480	0.0415	0.8666	4.813	38.767	251.100	0.257	6.760	18.155	0.372
15.004	0.0599	0.0500	0.8921	6.013	31.472	250.400	0.318	8.348	24.985	0.334
16.319	0.0721	0.0590	0.9115	7.231	26.453	251.500	0.386	10.156	32.681	0.311
18.158	0.0927	0.0745	0.9241	9.298	20.723	254.500	0.498	13.267	46.755	0.284
19.791	0.1100	0.0869	0.9403	11.030	17.627	250.600	0.589	15.469	60.459	0.256
21.454	0.1317	0.1027	0.9553	13.213	14.840	252.200	0.706	18.634	78.506	0.237
23.547	0.1609	0.1224	0.9775	16.140	12.299	250.200	0.866	22.682	105.256	0.215
25.137	0.1858	0.1416	0.9794	18.633	10.673	252.000	1.007	26.582	129.719	0.205
27.054	0.2157	0.1627	1.0031	21.638	9.310	248.600	1.170	30.449	162.121	0.188
28.880	0.2496	0.1871	1.0185	25.039	8.116	253.600	1.354	35.958	200.268	0.180
31.170	0.2919	0.2163	0.9627	29.274	6.761	249.900	1.579	41.331	252.700	0.164
33.292	0.3345	0.2464	0.9755	33.546	5.947	252.500	1.807	47.779	309.289	0.154
35.472	0.3827	0.2804	0.9894	38.390	5.241	249.500	2.066	53.980	377.133	0.143
37.220	0.4210	0.3086	1.0022	42.225	4.802	249.300	2.277	59.446	435.249	0.137
38.943	0.4621	0.3374	1.0148	46.346	4.408	251.800	2.499	65.894	499.840	0.132

Q [m ³ /h]	H [bar]	H _t [bar]	H _s [bar]	E [J/kg]	σ [-]	N [rpm]	T _{mec} [Nm]	P _{mec} [W]	P _h [W]	η _h [-]
41.277	0.5219	0.3800	1.0310	52.352	3.941	254.100	2.817	74.946	598.449	0.125
43.122	0.5769	0.4198	1.0491	57.859	3.603	249.500	3.116	81.412	690.966	0.118
45.455	0.6370	0.4632	1.0714	63.892	3.305	249.000	3.450	89.957	804.296	0.112
47.735	0.7069	0.5110	1.1302	70.908	3.067	248.100	3.817	99.181	937.391	0.106
13.204	0.0292	0.0296	0.9768	2.929	67.481	501.700	0.127	6.656	10.709	0.622
13.888	0.0340	0.0333	0.9922	3.409	58.443	499.900	0.151	7.888	13.111	0.602
14.634	0.0403	0.0381	1.0108	4.038	49.811	501.500	0.180	9.457	16.364	0.578
15.203	0.0454	0.0419	0.9886	4.557	43.649	500.800	0.202	10.602	19.188	0.553
16.251	0.0535	0.0477	1.0030	5.367	37.348	498.500	0.250	13.039	24.155	0.540
17.066	0.0610	0.0531	0.8469	6.120	30.204	498.700	0.284	14.814	28.925	0.512
18.383	0.0744	0.0629	0.8931	7.459	25.416	500.600	0.357	18.695	37.975	0.492
20.133	0.0923	0.0757	0.9259	9.259	20.848	499.400	0.453	23.691	51.622	0.459
21.835	0.1130	0.0906	0.9531	11.329	17.291	501.700	0.561	29.455	68.509	0.430
23.777	0.1389	0.1100	0.9780	13.930	14.256	499.200	0.689	36.035	91.727	0.393
25.447	0.1654	0.1300	0.9872	16.586	12.039	499.600	0.830	43.446	116.891	0.372
27.424	0.1954	0.1528	0.9954	19.602	10.240	500.800	0.970	50.864	148.870	0.342
29.312	0.2264	0.1759	1.0076	22.712	8.902	500.600	1.127	59.083	184.376	0.320
31.148	0.2616	0.2022	0.9598	26.235	7.533	502.400	1.321	69.504	226.304	0.307
33.229	0.2984	0.2302	0.9712	29.934	6.650	499.400	1.509	78.924	275.470	0.287
35.387	0.3445	0.2644	0.9788	34.550	5.792	498.500	1.759	91.851	338.600	0.271
37.375	0.3917	0.2997	0.9868	39.292	5.121	500.800	2.001	104.919	406.704	0.258
39.672	0.4427	0.3374	0.9988	44.408	4.567	501.000	2.298	120.584	487.903	0.247
42.286	0.5080	0.3853	1.0098	50.955	4.011	499.200	2.632	137.590	596.722	0.231
44.962	0.5801	0.4378	1.0149	58.180	3.530	501.700	3.006	157.932	724.458	0.218
47.783	0.6588	0.4949	1.0285	66.081	3.137	499.200	3.446	180.124	874.463	0.206
17.516	0.0462	0.0448	0.8821	4.638	40.620	749.600	0.180	14.147	22.501	0.629
16.688	0.0407	0.0403	0.8912	4.087	46.308	749.800	0.153	11.999	18.889	0.635
13.840	0.0182	0.0214	0.9224	1.823	105.456	750.300	0.053	4.138	6.986	0.592
14.275	0.0217	0.0243	0.9305	2.172	88.874	749.800	0.068	5.325	8.587	0.620
15.003	0.0266	0.0286	0.9409	2.667	72.803	750.300	0.089	7.001	11.080	0.632
15.946	0.0340	0.0343	0.9552	3.413	57.317	750.700	0.122	9.611	15.074	0.638
18.053	0.0508	0.0484	0.9714	5.093	38.760	751.200	0.203	15.936	25.465	0.626
18.645	0.0575	0.0534	0.9734	5.769	34.261	750.700	0.232	18.257	29.790	0.613
19.252	0.0618	0.0571	0.9975	6.202	32.269	749.100	0.253	19.877	33.065	0.601
19.786	0.0682	0.0619	1.0227	6.843	29.618	750.300	0.285	22.375	37.499	0.597
20.790	0.0784	0.0698	1.0438	7.863	26.058	749.400	0.338	26.519	45.273	0.586
21.690	0.0879	0.0768	1.0039	8.815	22.801	749.400	0.390	30.601	52.948	0.578
22.435	0.0977	0.0844	1.0181	9.796	20.669	750.700	0.438	34.454	60.865	0.566
23.375	0.1079	0.0920	1.0288	10.820	18.821	749.100	0.493	38.653	70.044	0.552
24.247	0.1187	0.0998	1.0446	11.909	17.241	749.100	0.542	42.546	79.968	0.532
25.803	0.1402	0.1154	0.8797	14.064	13.434	749.800	0.648	50.867	100.499	0.506
27.311	0.1629	0.1315	0.8931	16.337	11.658	750.500	0.763	59.942	123.565	0.485
28.605	0.1836	0.1464	0.9056	18.413	10.420	750.700	0.868	68.244	145.865	0.468
29.961	0.2057	0.1628	0.9142	20.628	9.351	750.700	0.978	76.882	171.162	0.449
31.446	0.2302	0.1804	0.9262	23.089	8.415	749.800	1.109	87.055	201.075	0.433
32.808	0.2573	0.1998	0.9328	25.811	7.560	750.700	1.238	97.350	234.524	0.415
34.123	0.2843	0.2197	0.9447	28.511	6.893	749.600	1.369	107.430	269.429	0.399
35.801	0.3191	0.2460	0.9518	32.002	6.171	749.400	1.555	122.041	317.290	0.385

Q [m ³ /h]	H [bar]	H _t [bar]	H _s [bar]	E [J/kg]	σ [-]	N [rpm]	T _{mec} [Nm]	P _{mec} [W]	P _h [W]	η _h [-]
37.625	0.3586	0.2759	0.9650	35.964	5.536	749.600	1.746	137.034	374.751	0.366
39.752	0.4082	0.3128	0.9902	40.938	4.934	749.600	1.993	156.477	450.688	0.347
42.333	0.4722	0.3608	1.0000	47.363	4.294	751.400	2.332	183.493	555.278	0.330
45.089	0.5432	0.4138	1.0107	54.479	3.763	750.000	2.687	211.034	680.282	0.310
47.761	0.6207	0.4728	1.0267	62.256	3.327	750.500	3.081	242.125	823.459	0.294
24.643	0.0978	0.0876	0.9150	9.809	19.609	999.500	0.388	40.648	66.948	0.607
26.665	0.1268	0.1097	0.9258	12.718	15.227	999.800	0.525	54.973	93.920	0.585
29.403	0.1623	0.1377	0.9389	16.281	11.996	1000.200	0.705	73.873	132.578	0.557
17.357	0.0261	0.0280	0.9844	2.622	75.781	999.800	0.053	5.592	12.601	0.444
17.744	0.0301	0.0312	0.9902	3.016	66.065	1000.200	0.066	6.931	14.823	0.468
18.256	0.0337	0.0341	0.9978	3.375	59.275	1000.000	0.084	8.775	17.065	0.514
19.211	0.0418	0.0410	1.0047	4.195	47.876	999.800	0.121	12.668	22.319	0.568
20.330	0.0525	0.0497	1.0202	5.262	38.483	999.800	0.167	17.433	29.624	0.588
21.438	0.0627	0.0587	0.9543	6.287	31.173	1000.000	0.215	22.558	37.325	0.604
22.632	0.0763	0.0699	0.9638	7.650	25.757	1000.000	0.281	29.447	47.951	0.614
23.528	0.0863	0.0779	0.9682	8.659	22.817	1000.200	0.331	34.688	56.421	0.615
25.754	0.1153	0.1004	0.9815	11.560	17.227	1000.200	0.469	49.092	82.450	0.595
27.702	0.1393	0.1193	1.0132	13.969	14.500	1000.200	0.594	62.176	107.168	0.580
31.552	0.2012	0.1656	1.0250	20.178	10.120	999.300	0.893	93.451	176.321	0.530
35.836	0.2776	0.2207	1.0369	27.848	7.398	999.800	1.280	134.062	276.379	0.485
39.870	0.3629	0.2825	1.0387	36.404	5.682	1000.900	1.719	180.160	401.966	0.448
44.041	0.4662	0.3555	1.0562	46.760	4.477	998.800	2.219	232.139	570.334	0.407
47.890	0.5782	0.4400	1.0613	57.992	3.632	1000.900	2.779	291.237	769.148	0.379
21.988	0.0423	0.0427	0.8978	4.241	44.890	1249.900	0.084	10.993	25.824	0.426
22.894	0.0504	0.0500	0.9019	5.053	37.772	1249.700	0.117	15.291	32.037	0.477
23.522	0.0590	0.0575	0.9099	5.917	32.402	1249.900	0.149	19.486	38.545	0.506
24.260	0.0671	0.0640	0.9181	6.729	28.627	1250.200	0.181	23.753	45.208	0.525
25.091	0.0770	0.0724	0.9236	7.721	25.031	1249.700	0.227	29.714	53.651	0.554
25.855	0.0863	0.0801	0.9426	8.652	22.567	1250.200	0.269	35.202	61.953	0.568
26.415	0.0932	0.0861	0.9514	9.346	20.993	1250.600	0.305	39.916	68.370	0.584
27.309	0.1038	0.0953	0.9587	10.408	18.931	1249.900	0.357	46.704	78.715	0.593
28.028	0.1150	0.1041	0.9652	11.531	17.151	1250.400	0.409	53.589	89.506	0.599
28.910	0.1266	0.1136	0.9766	12.694	15.678	1250.400	0.465	60.893	101.632	0.599
29.647	0.1381	0.1227	0.9158	13.852	13.935	1249.900	0.520	68.065	113.729	0.598
30.734	0.1543	0.1356	0.9262	15.474	12.550	1249.700	0.599	78.327	131.710	0.595
31.801	0.1704	0.1485	0.9376	17.086	11.441	1249.700	0.676	88.415	150.479	0.588
33.025	0.1891	0.1631	0.9454	18.969	10.355	1250.600	0.766	100.354	173.489	0.578
33.936	0.2071	0.1771	0.9567	20.772	9.517	1250.200	0.854	111.793	195.221	0.573
35.224	0.2265	0.1919	0.9009	22.722	8.463	1250.800	0.946	123.966	221.650	0.559
36.458	0.2505	0.2100	0.9120	25.121	7.706	1250.400	1.063	139.246	253.639	0.549
37.420	0.2722	0.2259	0.9224	27.302	7.135	1249.700	1.167	152.716	282.936	0.540
39.182	0.3061	0.2512	0.9653	30.698	6.495	1251.100	1.337	175.145	333.106	0.526
40.465	0.3348	0.2715	0.9745	33.581	5.971	1249.200	1.479	193.455	376.332	0.514
42.216	0.3744	0.3006	0.9867	37.549	5.381	1250.800	1.676	219.545	439.003	0.500
43.760	0.4120	0.3270	0.9976	41.324	4.923	1249.900	1.863	243.901	500.809	0.487
45.606	0.4576	0.3602	1.0163	45.895	4.481	1249.500	2.093	273.854	579.662	0.472
47.910	0.5179	0.4042	1.0294	51.943	3.993	1250.200	2.401	314.348	689.200	0.456
26.321	0.0615	0.0595	0.9374	6.167	31.585	1500.300	0.103	16.137	44.953	0.359

Q [m ³ /h]	H [bar]	H _t [bar]	H _s [bar]	E [J/kg]	σ [-]	N [rpm]	T _{mec} [Nm]	P _{mec} [W]	P _h [W]	η _h [-]
27.051	0.0703	0.0670	0.9606	7.047	27.982	1500.300	0.140	22.027	52.794	0.417
27.607	0.0778	0.0733	0.9705	7.800	25.418	1499.900	0.170	26.750	59.632	0.449
28.166	0.0839	0.0792	0.9699	8.420	23.546	1500.300	0.202	31.736	65.678	0.483
29.082	0.0979	0.0908	0.9825	9.823	20.322	1500.100	0.262	41.228	79.116	0.521
29.897	0.1101	0.1013	0.9868	11.046	18.120	1499.900	0.319	50.041	91.461	0.547
30.972	0.1261	0.1149	0.9985	12.652	15.924	1500.500	0.392	61.596	108.527	0.568
32.305	0.1444	0.1301	1.0067	14.484	13.980	1499.900	0.482	75.647	129.579	0.584
33.499	0.1634	0.1461	0.8614	16.393	11.473	1499.400	0.573	89.974	152.080	0.592
35.028	0.1895	0.1672	0.8704	19.003	9.956	1499.600	0.697	109.448	184.346	0.594
36.733	0.2187	0.1901	0.8807	21.937	8.684	1499.400	0.835	131.074	223.168	0.587
38.245	0.2470	0.2128	0.8861	24.773	7.721	1499.600	0.971	152.414	262.396	0.581
39.998	0.2833	0.2410	0.8934	28.417	6.767	1499.600	1.142	179.379	314.780	0.570
41.677	0.3191	0.2684	0.9041	32.005	6.051	1500.300	1.323	207.784	369.409	0.562
43.866	0.3667	0.3045	0.9130	36.778	5.301	1499.900	1.554	244.151	446.795	0.546
46.030	0.4196	0.3438	0.9234	42.084	4.667	1500.300	1.817	285.516	536.477	0.532
48.152	0.4764	0.3847	0.9371	47.787	4.148	1500.100	2.087	327.890	637.253	0.515
30.423	0.0771	0.0729	0.9660	7.734	25.619	1750.300	0.124	22.728	65.165	0.349
31.306	0.0909	0.0852	0.9745	9.120	21.833	1750.300	0.169	30.991	79.069	0.392
32.182	0.1037	0.0963	0.9886	10.400	19.292	1749.600	0.218	39.907	92.696	0.431
33.224	0.1186	0.1093	0.9926	11.899	16.909	1749.100	0.287	52.519	109.487	0.480
34.534	0.1394	0.1267	0.9967	13.981	14.433	1750.300	0.376	68.983	133.714	0.516
35.734	0.1612	0.1446	1.0229	16.167	12.656	1750.500	0.474	86.857	159.992	0.543
37.240	0.1866	0.1665	0.9447	18.720	10.523	1750.300	0.591	108.288	193.071	0.561
39.018	0.2188	0.1934	0.9511	21.948	9.018	1750.000	0.747	136.885	237.167	0.577
40.847	0.2563	0.2237	0.9655	25.703	7.769	1749.600	0.918	168.139	290.762	0.578
42.994	0.2983	0.2572	0.9732	29.918	6.713	1750.300	1.119	205.085	356.230	0.576
44.776	0.3391	0.2894	0.9798	34.009	5.935	1750.000	1.316	241.145	421.726	0.572
46.487	0.3781	0.3198	0.9889	37.920	5.355	1749.100	1.508	276.262	488.193	0.566
48.034	0.4129	0.3467	0.9984	41.411	4.934	1749.100	1.674	306.570	550.875	0.557
34.480	0.0992	0.0921	0.9625	9.954	19.928	2000.200	0.126	26.381	95.049	0.278
35.165	0.1080	0.1003	0.9688	10.829	18.384	1999.700	0.170	35.501	105.465	0.337
35.816	0.1191	0.1103	0.9740	11.946	16.718	1999.500	0.215	44.956	118.492	0.379
36.337	0.1282	0.1182	0.9806	12.856	15.592	2000.000	0.253	53.015	129.374	0.410
37.131	0.1418	0.1301	0.9862	14.225	14.139	1999.700	0.312	65.340	146.283	0.447
38.193	0.1595	0.1452	1.0024	15.994	12.688	1999.500	0.389	81.480	169.180	0.482
39.308	0.1812	0.1636	1.0054	18.178	11.190	2000.700	0.482	100.930	197.890	0.510
40.507	0.2025	0.1816	1.0124	20.309	10.061	1999.300	0.575	120.420	227.829	0.529
42.006	0.2324	0.2069	1.0187	23.306	8.805	2000.200	0.715	149.836	271.119	0.553
43.664	0.2686	0.2368	1.0538	26.936	7.761	1999.300	0.881	184.512	325.718	0.566
45.664	0.3121	0.2731	1.0752	31.299	6.760	1999.300	1.090	228.124	395.821	0.576
48.048	0.3657	0.3159	0.9052	36.685	5.315	2000.400	1.345	281.743	488.150	0.577
38.261	0.1184	0.1092	0.9568	11.874	16.706	2249.200	0.122	28.838	125.821	0.229
38.919	0.1292	0.1190	0.9638	12.961	15.367	2250.100	0.172	40.622	139.702	0.291
39.391	0.1391	0.1279	0.9702	13.953	14.327	2249.700	0.213	50.083	152.210	0.329
40.107	0.1505	0.1382	0.9756	15.093	13.289	2250.100	0.269	63.342	167.642	0.378
40.992	0.1652	0.1507	0.9838	16.573	12.161	2248.800	0.329	77.411	188.141	0.411
41.726	0.1807	0.1645	0.9935	18.123	11.181	2250.400	0.395	93.198	209.423	0.445
42.573	0.1951	0.1773	0.8214	19.573	9.479	2249.500	0.460	108.354	230.775	0.470

Q [m ³ /h]	H [bar]	H _t [bar]	H _s [bar]	E [J/kg]	σ [-]	N [rpm]	T _{mec} [Nm]	P _{mec} [W]	P _h [W]	η _h [-]
43.966	0.2273	0.2037	0.8309	22.795	8.192	2249.700	0.597	140.745	277.557	0.507
46.187	0.2739	0.2444	0.8421	27.477	6.853	2249.500	0.809	190.655	351.468	0.542
48.283	0.3223	0.2843	0.8520	32.327	5.868	2249.700	1.039	244.777	432.265	0.566
41.553	0.1290	0.1178	0.8717	12.934	14.721	2499.800	0.083	21.653	148.842	0.145
42.190	0.1406	0.1284	0.8741	14.107	13.522	2500.100	0.140	36.645	164.831	0.222
42.924	0.1554	0.1419	0.8793	15.582	12.283	2500.500	0.194	50.677	185.232	0.274
44.329	0.1810	0.1651	0.8852	18.150	10.593	2499.600	0.306	80.191	222.816	0.360
45.669	0.2104	0.1903	0.8878	21.102	9.135	2500.300	0.435	113.864	266.895	0.427
47.046	0.2398	0.2168	0.8944	24.052	8.054	2499.600	0.568	148.743	313.378	0.475
48.368	0.2091	0.1899	0.9428	20.970	9.482	2750.200	0.314	90.469	280.898	0.322

Tableau 9 – Paramètres principaux des points de fonctionnement mesurés à l'emballlement.

Q [m ³ /h]	H [bar]	H _t [bar]	H _s [bar]	E [J/kg]	σ [-]	N [rpm]	T _{mec} [Nm]	P _{mec} [W]	P _h [W]	η _h [-]
3.533	0.0008	0.0057	0.9951	0.085	2353.191	129.000	0.000	0.000	0.083	0.000
7.087	0.0039	0.0084	1.0061	0.387	517.951	386.000	0.000	0.000	0.759	0.000
10.825	0.0086	0.0127	1.0133	0.858	234.334	632.000	0.000	0.000	2.574	0.000
12.292	0.0111	0.0149	1.0225	1.115	181.241	725.000	0.000	0.000	3.797	0.000
13.605	0.0134	0.0168	1.0283	1.347	150.558	806.000	0.000	0.000	5.076	0.000
14.925	0.0163	0.0195	1.0374	1.639	124.368	899.000	0.000	0.000	6.774	0.000
16.281	0.0196	0.0219	1.0442	1.961	104.327	981.000	0.000	0.000	8.842	0.000
17.681	0.0225	0.0246	1.0536	2.254	91.213	1064.000	0.000	0.000	11.039	0.000
18.924	0.0263	0.0278	1.0603	2.640	78.170	1151.000	0.000	0.000	13.837	0.000
20.381	0.0298	0.0309	1.0683	2.991	69.321	1233.000	0.000	0.000	16.881	0.000
21.710	0.0339	0.0344	1.0719	3.397	61.162	1319.000	0.000	0.000	20.427	0.000
22.924	0.0377	0.0378	1.0794	3.776	55.257	1402.000	0.000	0.000	23.975	0.000
24.659	0.0435	0.0425	1.0983	4.367	48.255	1500.000	0.000	0.000	29.824	0.000
25.959	0.0476	0.0465	0.9583	4.774	41.232	1582.000	0.000	0.000	34.321	0.000
27.183	0.0516	0.0507	0.9667	5.173	38.243	1664.000	0.000	0.000	38.940	0.000
28.554	0.0578	0.0551	0.9767	5.798	34.319	1745.000	0.000	0.000	45.850	0.000
29.929	0.0625	0.0597	0.9875	6.271	31.932	1826.000	0.000	0.000	51.975	0.000
31.247	0.0691	0.0650	0.9942	6.930	29.018	1911.000	0.000	0.000	59.967	0.000
32.466	0.0754	0.0705	1.0037	7.558	26.754	1995.000	0.000	0.000	67.952	0.000
33.883	0.0814	0.0755	1.0131	8.165	24.903	2079.000	0.000	0.000	76.621	0.000
35.235	0.0880	0.0811	1.0261	8.822	23.219	2158.000	0.000	0.000	86.090	0.000
37.118	0.0973	0.0894	1.0308	9.756	21.074	2272.000	0.000	0.000	100.292	0.000
38.705	0.1056	0.0967	1.0438	10.595	19.553	2369.000	0.000	0.000	113.570	0.000
39.967	0.1134	0.1034	1.0577	11.373	18.358	2456.000	0.000	0.000	125.879	0.000
41.662	0.1217	0.1111	1.0652	12.211	17.182	2549.000	0.000	0.000	140.891	0.000
43.049	0.1305	0.1184	1.0851	13.089	16.202	2635.000	0.000	0.000	156.049	0.000
44.292	0.1393	0.1256	0.9455	13.968	14.197	2723.000	0.000	0.000	171.330	0.000
45.614	0.1482	0.1336	0.9542	14.867	13.414	2810.000	0.000	0.000	187.810	0.000
47.241	0.1579	0.1419	0.9625	15.836	12.666	2900.000	0.000	0.000	207.189	0.000
48.562	0.1670	0.1500	0.9716	16.749	12.046	2987.000	0.000	0.000	225.260	0.000

En plus des tests de performance hydraulique de la pico-turbine, des mesures complémentaires ont été effectuées pour tracer la courbe caractéristique d'emballlement de la roue. Pour cela, préalablement aux mesures, la génératrice a été découplée mécaniquement de couplemètre afin d'éliminer tout

freinage supplémentaire de la roue due aux frottements mécaniques. A noter ici que le frottement dans les paliers de l'arbre de la machine, due aux forces radiales et axiales, n'a pas été ni éliminé, ni mesuré. Dans ces conditions (mise hors service de la génératrice et implicitement de l'encodeur), la vitesse de rotation de la roue a été fournie par l'analyseur du capteur de couple et introduite manuellement dans le champ des commentaires pour chaque point de fonctionnement enregistré. Concernant la procédure de tests, avec la roue en rotation libre, le débit a été varié de sa valeur minimale à sa valeur maximale. Pour chaque valeur de la vitesse de rotation des pompes de recirculation, une fois les points de fonctionnement stabilisés, les valeurs des paramètres d'entrée/sortie ont été enregistrées. L'acquisition et le traitement des signaux ont été faits avec les mêmes paramètres que les tests de performance hydraulique. Enfin, le Tableau 9 inclut les paramètres principaux des points de fonctionnement mesurés à l'emballage de la roue de la pico-turbine.

5.2. Courbes caractéristiques du modèle

Les courbes caractéristiques résultantes de la pico-turbine, mesurées à vitesse de rotation constante de la roue, sont représentées sur la Figure 23 avec les valeurs du Tableau 8.

La puissance mécanique P_{mec} sur l'arbre de la roue a été calculée avec l'eq. (2), alors que le rendement hydraulique η_h a été calculé à l'aide des équations (1) et (3). En plus de la plage totale de fonctionnement de la pico-turbine, les résultats montrent un rendement hydraulique maximale d'environ 60-65%. De plus, la puissance mécanique maximale obtenue atteint une valeur d'environ 300 W.

Ensuite, la courbe caractéristique adimensionnelle de la machine est représentée sur la Figure 24 à l'aide des coefficients de débit ϕ et d'énergie ψ , définis dans les équations (4) – (6). La fonction théorique résultante $\psi = f(\phi)$ a été calculée par régression polynomiale avec le logiciel Matlab. A noter ici que, malgré le fait que la machine fonctionne à vitesse variable, tous les points de fonctionnement s'alignent sur une même courbe. Cela semble valable également pour la variation du rendement hydraulique en fonction du coefficient de débit. Ce résultat est justifié par l'absence des directrices ou de la possibilité de changer l'angle des pales de la roue.

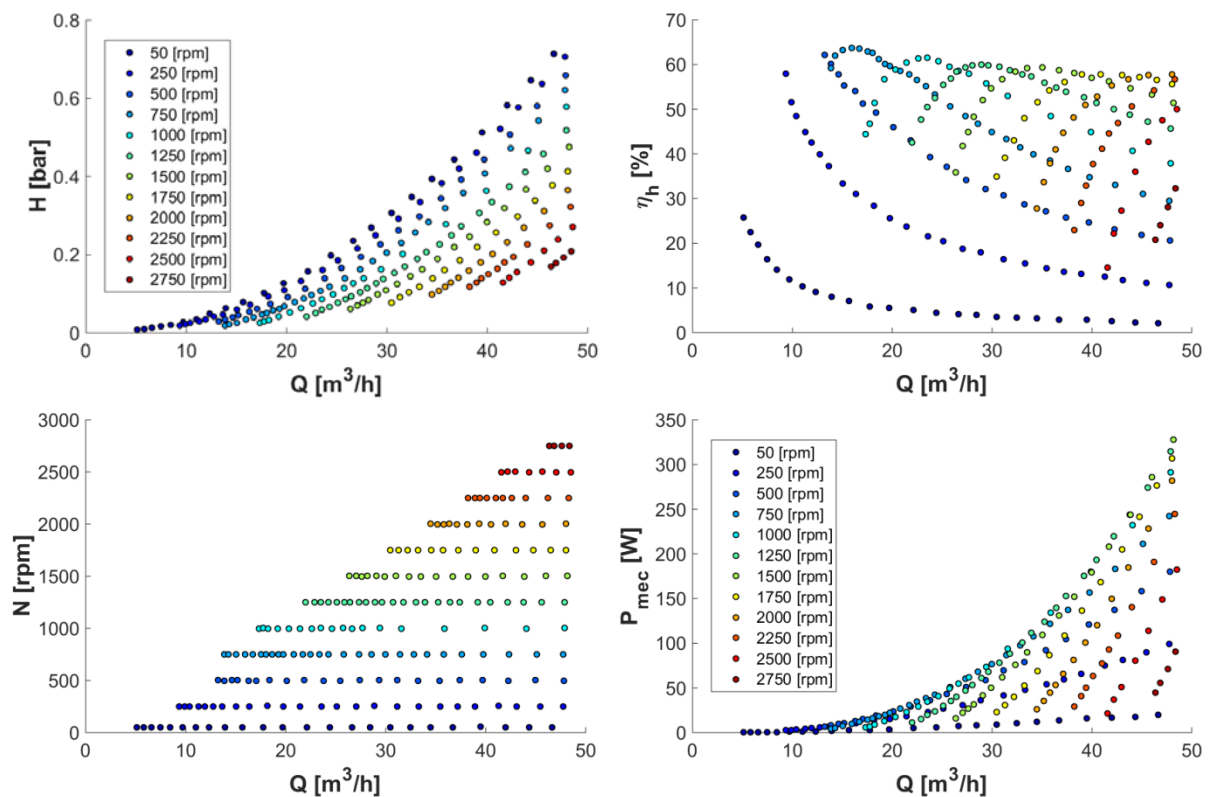


Figure 23 – Courbes caractéristiques de la pico-turbine.

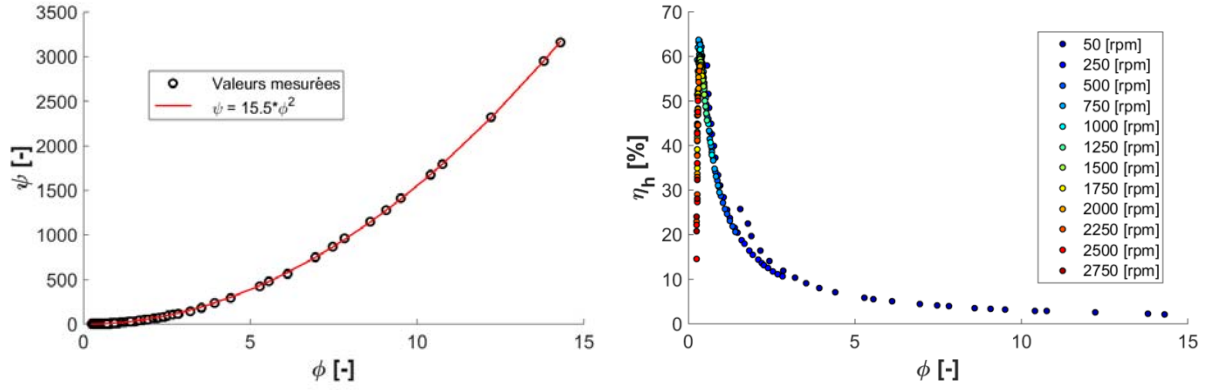


Figure 24 – Courbes caractéristiques adimensionnelles $\psi(\phi)$ et $\eta_h(\phi)$ de la pico-turbine.

Considérant maintenant le facteur de vitesse N_{ED} , le facteur de débit Q_{ED} et le facteur de couple T_{ED} , définis de manière suivante :

$$N_{ED} = \frac{N \cdot D_e}{60 \cdot \sqrt{E}} [-] \quad (23)$$

$$Q_{ED} = \frac{Q}{D_e^2 \cdot \sqrt{E}} [-] \quad (24)$$

$$T_{ED} = \frac{T_{mec}}{\rho \cdot D_e^3 \cdot \sqrt{E}} [-] \quad (25)$$

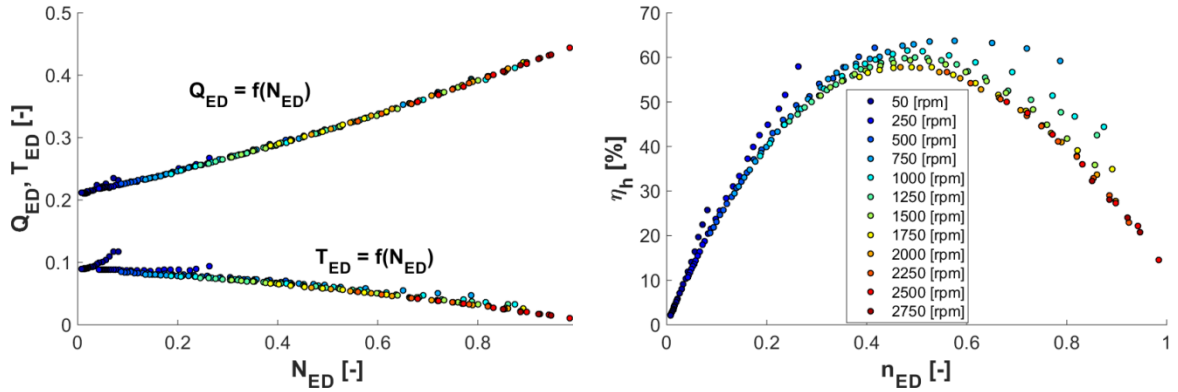


Figure 25 – Courbes caractéristiques adimensionnelles $Q_{ED}(N_{ED})$, $T_{ED}(N_{ED})$, $\eta_h(N_{ED})$ de la pico-turbine.

Les courbes caractéristiques adimensionnelles résultantes sont présentées sur la Figure 25. A nouveau, à quelques petites exceptions près, les points de fonctionnement de la machine s'alignent tous sur la même courbe. En revanche, la variation du rendement hydraulique en fonction du facteur de vitesse montre des courbes de rendement bien distinctes entre les différentes vitesses de rotation de la roue.

La colline de rendement résultante de la pico-turbine est représentée en fonction du débit et de la vitesse de rotation sur la Figure 26, ainsi qu'en fonction du débit et de la chute sur la Figure 27. Les surfaces d'interpolation ont été calculées et représentées à nouveau avec le logiciel Matlab. Les points de fonctionnement mesurés, utilisés pour le calcul de la colline sont représentés en noir, superposés sur les surfaces 3D. De plus, les contours de rendement hydraulique représentés dans les images à droite permettent d'identifier le rapport optimal d'opération entre le débit et la vitesse de

rotation ou la chute, pour toute la plage de fonctionnement de la machine.

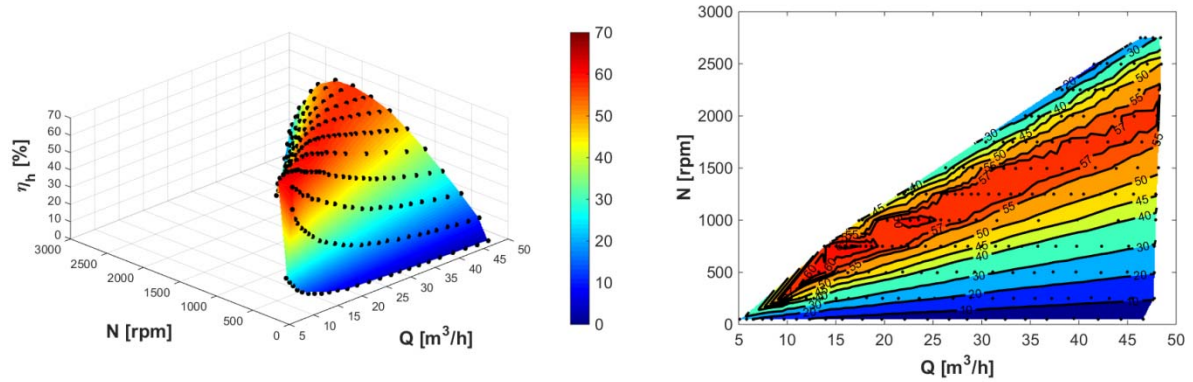


Figure 26 – Colline de rendement Q-N- η_h de la pico-turbine.

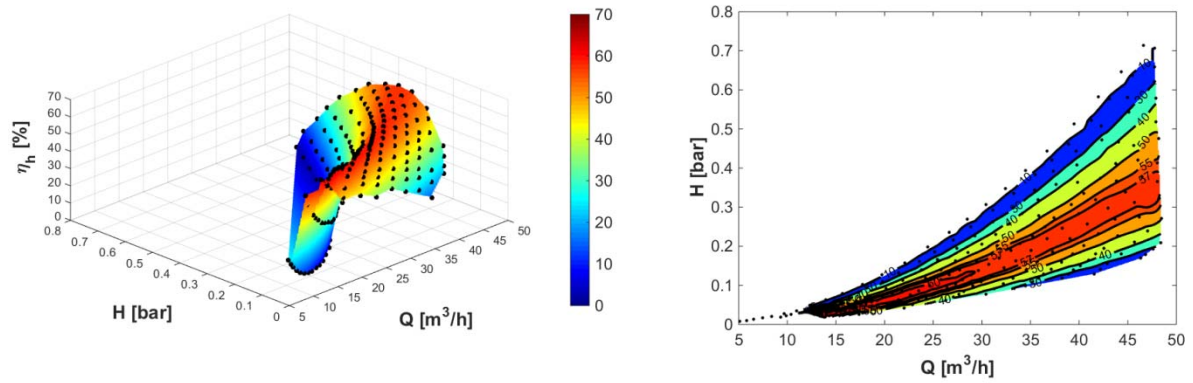


Figure 27 – Colline de rendement Q-H- η_h de la pico-turbine.

Enfin, la courbe d'emballlement de la roue, mesurée avec la génératrice découplée mécaniquement de la pico-turbine, est représentée en rouge sur la Figure 28, en fonction du débit, de la chute et de la vitesse de rotation, à partir des valeurs du Tableau 9. A noter ici que le couple de frottement des paliers de l'arbre et du labyrinthe de la machine n'a pas été extrait de ces mesures, car il n'y avait pas la possibilité de le mesurer.

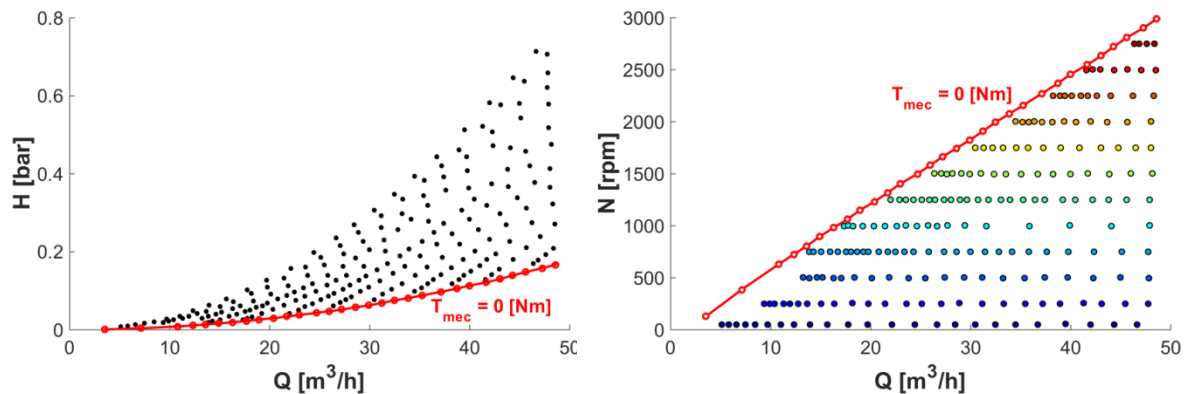


Figure 28 – Courbe d'emballlement ($T_{mec} = 0$) de la de la pico-turbine.

5.3. Répétabilité et incertitude de tests

La répétabilité des mesures effectuées est mise en évidence en représentant les courbes caractéristiques de la machine, à vitesse constante de rotation de la roue de $N = 1'000$ rpm, obtenues lors de deux journées consécutives (voir Figure 29). On peut conclure ici que les mesures de tous les paramètres importants qui caractérisent la performance de la machine sont obtenues de manière répéti-

tive.

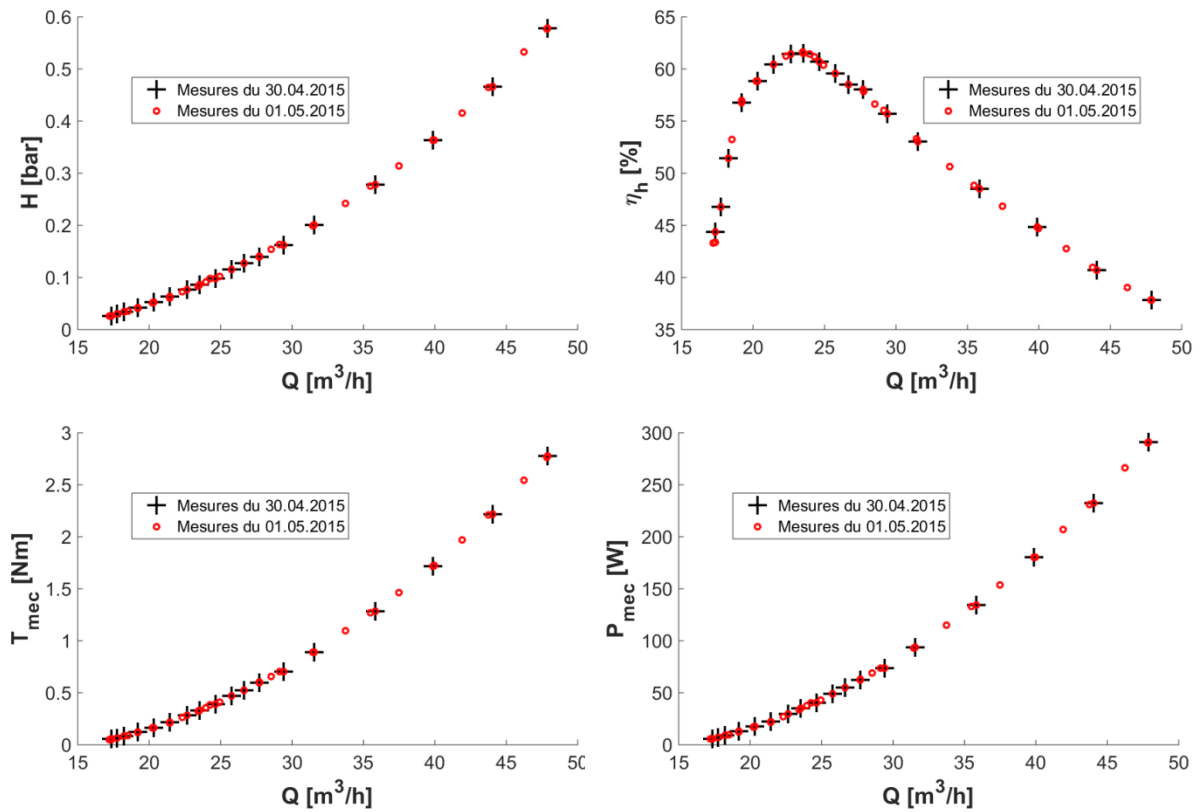


Figure 29 – Courbes caractéristiques de la pico-turbine à vitesse de rotation constante, ($N = 1'000$ [rpm]) mesurées lors de deux journées consécutives.

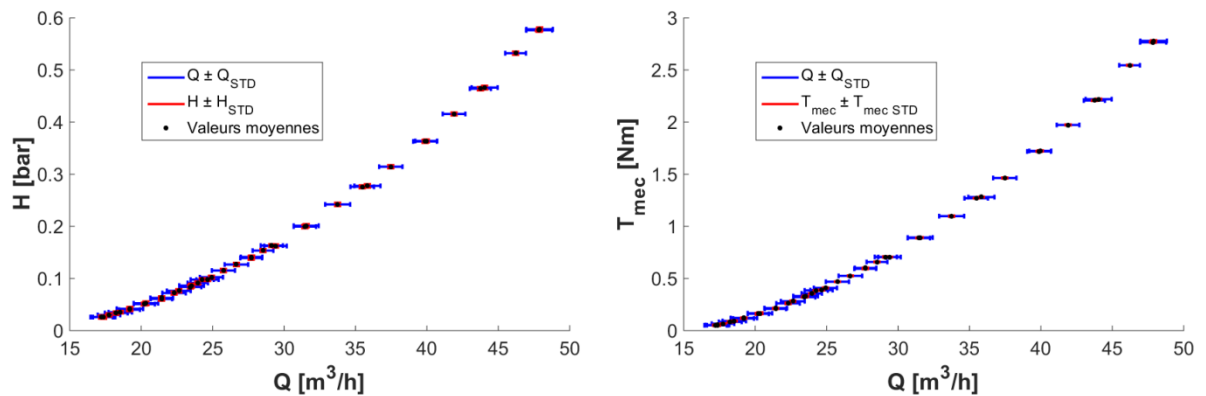


Figure 30 – Ecart type des principales valeurs, mesurées à vitesse de rotation constante ($N = 1'000$ [rpm]).

Ensuite, l'écart type des principales valeurs mesurées à vitesse de rotation constante de la roue à $N = 1'000$ rpm est représenté au même temps que les valeurs moyennes sur la Figure 30. Si les mesures de la chute et du couple mécanique présentent des valeurs négligeables, ce n'est pas la même chose pour le débit. Cet écart vient en réalité de la qualité du signal envoyé par l'analyseur, malgré le fait que son affichage respecte en principe une erreur de seulement 0.5% (voir le certificat d'étalonnage dans l'Annexe 6). Il faut en revanche retenir que les valeurs moyennes enregistrées ont bien été validées avec l'affichage de l'analyseur du débitmètre à plusieurs reprises pendant les tests. La preuve que les valeurs obtenues peuvent être validées est donnée par la bonne répétabilité (voir Figure 29).

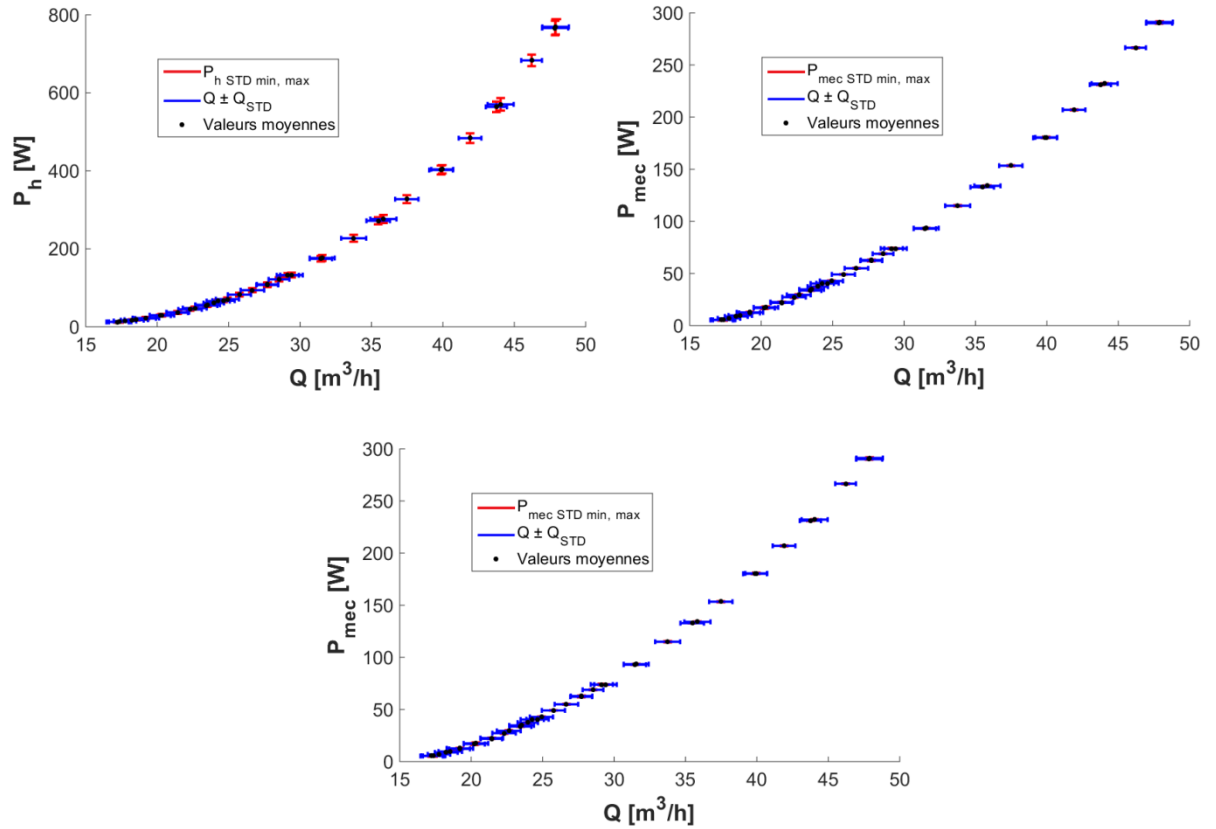


Figure 31 – Erreurs de mesure résultantes pour la puissance hydraulique, la puissance mécanique et le rendement hydraulique – mesures à vitesse de rotation constante ($N = 1'000$ [rpm]).

L'écart type équivalent pour la puissance hydraulique P_h et pour la puissance mécanique P_{mec} peut être calculé à partir de la valeur moyenne et l'écart type des principales valeurs mesurées de manière suivante :

$$P_{h\,STD\,min} = \rho \cdot (Q - Q_{STD}) \cdot g \cdot (H - H_{STD}) [W] \quad (26)$$

$$P_{h\,STD\,max} = \rho \cdot (Q + Q_{STD}) \cdot g \cdot (H + H_{STD}) [W] \quad (27)$$

$$P_{mec\,STD\,min} = \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{60} \cdot (T_{mec} - T_{mec\,STD}) = \omega \cdot (T_{mec} - T_{mec\,STD}) [W] \quad (28)$$

$$P_{mec\,STD\,max} = \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{60} \cdot (T_{mec} + T_{mec\,STD}) = \omega \cdot (T_{mec} + T_{mec\,STD}) [W] \quad (29)$$

Comme déjà précisé dans le chapitre sur l'instrumentation, la vitesse de rotation a été enregistrée à partir des valeurs instantanées. C'est la raison pour laquelle l'écart type de la vitesse de rotation a été ignoré dans les calculs.

Avec des valeurs minimales et maximales pour la puissance hydraulique et mécanique, on peut ensuite calculer un écart type équivalent pour le rendement hydraulique en utilisant les relations suivantes:

$$\eta_{h\,STD\,min} = \frac{P_{mec\,STD\,min}}{P_{h\,STD\,max}} \cdot 100 [\%] \quad (30)$$

$$\eta_{h\,STD\,max} = \frac{P_{mec\,STD\,max}}{P_{h\,STD\,min}} \cdot 100 [\%] \quad (31)$$

Sur la Figure 31 les erreurs de mesure résultantes pour la puissance hydraulique, la puissance mécanique et le rendement hydraulique sont représentées pour les mesures à vitesse de rotation constante $N = 1'000$ rpm, en même temps que les valeurs moyennes. On peut constater que, en exagérant les erreurs de mesures par l'approche de calcul adopté, les erreurs de mesure obtenue pour le rendement atteignent 10% de la valeur moyenne. Ce résultat est dû principalement au grand écart type des valeurs de débit.

Pour conclure, en se basant sur la bonne validation des valeurs moyennes enregistrées pour le débit, ainsi que sur la bonne répétabilité des mesures, les valeurs moyennes du rendement peuvent être également validées.

6. DISCUSSION

Le réglage du point de fonctionnement du banc d'essais employé pendant les tests a été sélectionné en mode manuel (et non pas automatique), justifié par le fait que les mesures ont été effectuées à vitesse de rotation constante de la roue de la pico-turbine. Effectivement, la vitesse de rotation des pompes de recirculation a été directement imposée sans utiliser l'algorithme de régulation automatique PID disponible dans le programme. L'avantage d'utilisation du mode manuel de pilotage du banc d'essais vient principalement de la rapidité de changement de point d'opération et bien sûr de la stabilité de fonctionnement.

Le positionnement de la machine dans la section de test n'a pas été ni vertical, ni horizontal, mais plutôt à environ 45° , due à l'immobilité d'une des flasques reliant la machine avec le banc d'essais. Néanmoins, cela ne devrait pas influencer les mesures de chute de pression sur la machine, car selon la manière de faire les mesures, les pertes dépendent uniquement de l'écoulement et du changement de section entre l'entrée et la sortie, et non pas de l'inclinaison de la conduite.

Le rendement hydraulique de la roue pourrait être calculé en prenant en compte non pas la chute totale de la machine H , mais plutôt la chute de pression statique sur la roue H_t . En réalité, la section d'entrée de la prise de pression M_2 sur la roue est très proche d'un changement de section (voir la position du bord d'attaque de l'ogive), et donc la vraie section de passage à reste inconnue. Cela induit l'impossibilité d'appliquer correctement l'équation de Bernoulli pour calculer un rendement hydraulique uniquement de la roue. En revanche, la différence de pression statique mesurée peut servir à valider des calculs numériques sur une même géométrie de la machine.

Le débit de fuite à travers le labyrinthe de l'arbre n'a pas été mesuré dans ces tests. Considérant que le débitmètre est placé dans le circuit hydraulique en amont de la pico-turbine et que le débit de fuite à travers le labyrinthe de la machine s'écoule uniquement après la roue, la valeur mesurée a été directement utilisée dans le calcul de la puissance hydraulique. De plus, la quantité infime d'eau sortante du labyrinthe n'a pas été suffisante pour assurer un écoulement mesurable.

Le niveau d'implantation H_s de la machine a été fixé pour les tests à seulement 1 bar (env. 10 m) et non pas à 22.62 m (comme calculé dans le chapitre 2.1) car il a été constaté qu'à l'atmosphère ($H_s \approx 0.3$ m), il n'y a pas de développement de cavitation dans aucun point sur toute la plage de fonctionnement de la machine. Par conséquent, dans ces conditions, un test d'influence de la cavitation sur le rendement hydraulique n'a pas de sens.

Le couple de frottement des paliers et du labyrinthe de la mécanique n'a pas pu être mesuré. Cela influence certainement légèrement les valeurs du couple enregistrées et utilisées dans le calcul du rendement hydraulique, et encore les tests d'emballement. Malgré tout cela, une évaluation du couple de frottement radial de la mécanique a pu être effectuée en entraînant l'arbre (sans la roue) avec la génératrice (en mode moteur) pour des valeurs de vitesse de rotation de 0 à 3000 rpm. De plus, avec la machine montée normalement dans le circuit hydraulique du banc d'essais, le test a été effectué à environ $50 \text{ m}^3/\text{h}$ avec un niveau d'implantation d'environ 1 bar. Les valeurs de couple de frottement observées n'ont pas été enregistrées car les valeurs obtenues étaient infiniment petites (dans la plage de résolution du capteur).

7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les performances hydrauliques d'une pico-turbine axiale basse chute en coude, destinée à la récupération d'énergie sur les réseaux d'eau potable, ont été évaluées.

Pour atteindre cet objectif, la HES-SO Valais a réalisé dans un premier temps la conception mécanique du modèle réduit (échelle modèle/prototype de 85/100) de la pico-turbine autour de la roue fournie (dessinée et fabriquée en bronze) par l'EPFL-LCH. Les différentes pièces mécaniques du concept validé ont été ensuite réalisées par l'atelier mécanique de la HES-SO Valais ainsi que l'assemblage de tous les composants mécaniques et de l'instrumentation nécessaire pour piloter la vitesse de rotation de la machine et pour mesurer la puissance mécanique de la roue. Le moteur électrique ainsi que l'électronique de puissance nécessaires pour le contrôle de la machine ont également été fournis par la HES-SO Valais.

Durant la seconde phase du projet, la conception et la réalisation des conduites nécessaires pour l'implantation de la machine sur le banc d'essais ont été réalisées. Ensuite, préalablement aux mesures, le modèle a été instrumenté et les capteurs employés vérifiés et/ou calibrés. L'interface de contrôle et mesures dédiée à la pico-turbine a également été adaptée.

Pour conclure, les courbes caractéristiques hydrauliques de cette pico-turbine axiale en coude, ont été mesurées avec succès en suivant les prescriptions de la norme CEI 60193. La turbine, à l'échelle modèle (DN85), permet de récupérer l'énergie hydraulique sur une plage de débit de 5 à 50 m³/h en récupérant une chute comprise entre 0 et 7.5 mCE. Sur cette plage de fonctionnement, le point nominal mesuré de la turbine, à 750 rpm, se situe à 15.95 m³/h pour une chute de 0.34 mCE avec un rendement de 63.75 %, ce qui permet de produire 9.6 W. Une puissance maximale de 328 W est récupérable à 1'500 rpm, pour un débit de 48.15 m³/h et une chute de 4.76 mCE avec un rendement de 51.45 %.

Les résultats de cette campagne expérimentale seront utilisés pour simuler la production dans des cas d'études réels dans des villes suisses. La localisation optimale des turbines au sein des réseaux d'approvisionnement d'eau sera évaluée et le potentiel d'utilisation de cette technologie sera étudié.