

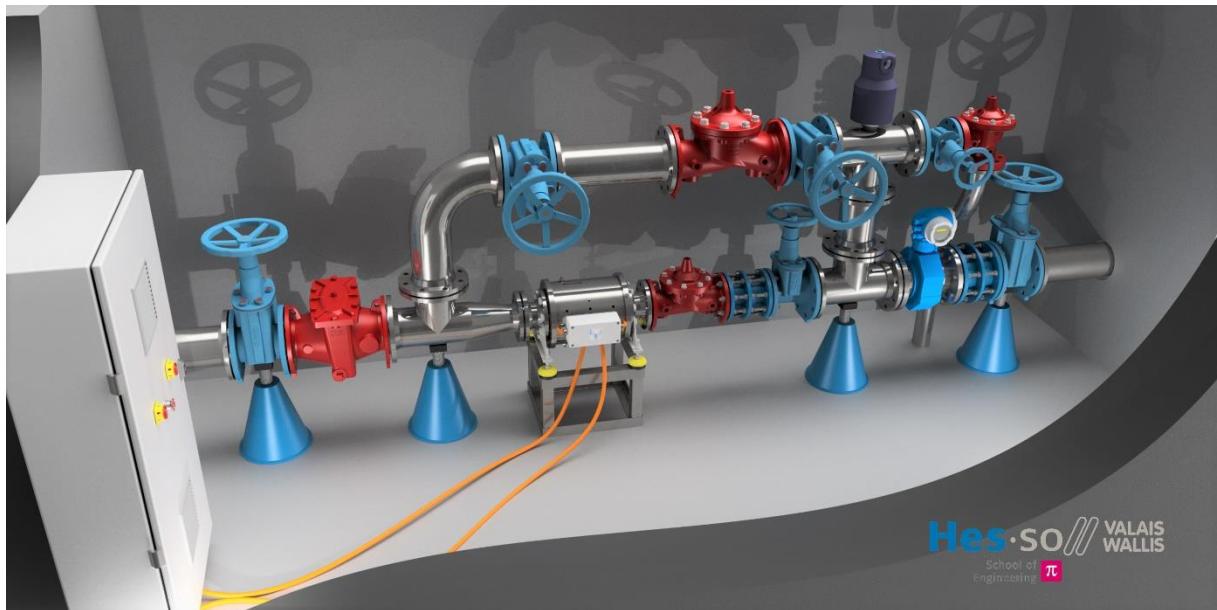


Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Rapport final du 26 Février 2024

Duo Turbo Urbaine pour les réseaux d'eau potable



Hes-SO VALAIS
School of Engineering π

Source: @HES SO VALAIS – 2021



Date: 26 février 2024

Lieu: Sion

Prestataire de subventions :
Office fédéral de l'énergie OFEN
Section Recherche énergétique et cleantech
CH-3003 Berne
www.ofen.admin.ch

Cofinancement:



FOWA
Forschungsfonds Wasser
Fonds de recherche pour l'eau

FOWA
Grütlistrasse 44, CH-8027 Zürich
www.svgw.ch

Bénéficiaires de la subvention :
HES SO Valais
Rue de l'industrie 23, CH-1902 Sion
www.hevs.ch

BG Ingénieurs Conseils SA
Avenue de Cour 61, CH-1001 Lausanne
www.bg.ch

Ville de Pully
Chemin de la Damataire 13, CH-1009 Pully
www.pully.ch

Cla-Val Europe
Chemin des Mésanges 1, CH-1032 Romanel-sur-Lausanne

Auteur(s):
Vlad Hasmatuchi, HES SO Valais, vlad.hasmatuchi@hevs.ch
Cécile Münch-Alligné, HES SO Valais, cecile.muench@hevs.ch
Irene Samora, BG Ingénieurs Conseils, irene.samora@bg-21.com
Khalid Essyad, BG Ingénieurs Conseils, khalid.essyad@bg-21.com

Suivi du projet à l'OFEN:
Karin Söderström, Karin.Soederstroem@bfe.admin.ch
Klaus Jorde, klaus.jorde@kjconsult.net

Numéro du contrat de l'OFEN: SI/502060-1
Les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions du présent rapport.



Zusammenfassung

In der Schweiz ist die Turbinierung von Trinkwasser in den Leitungsnetzen eine gängige Praxis, um einen Teil der durch Druckminderer verlorenen Energie durch die Erzeugung von Elektrizität zurückzugewinnen. Diese Produktion beläuft sich auf über 100 GWh/Jahr, wobei ein gleichwertiges Potenzial noch unerschlossen bleibt. Die Turbine Duo Turbo wurde vor kurzem entwickelt, um dieses Potenzial zu nutzen, insbesondere für Standorte in der Alpenregion mit großen Druck- und Durchflussschwankungen. Im Rahmen dieses Projekts wurde eine Stadtversion dieser Turbine entwickelt, um die Entwicklung von "Smart Cities" zu unterstützen. Ein Prototyp wurde in der Kammer von Verney der Gemeinde Pully installiert, um Strom zu erzeugen, der eingespeist oder zur Versorgung eines Überwachungssystems dieses Netzes verwendet werden kann, aber auch um die verschiedenen Zweige des Verteilungsnetzes zu regulieren, indem eine dynamische Steuerung in Verbindung mit der eines Druckminderers gewährleistet wird.

Résumé

En Suisse, le turbinage d'eau potable sur les réseaux d'adduction est une pratique courante permettant de récupérer une partie de l'énergie dissipée par réducteurs de pression en produisant de l'électricité. Cette production représente plus de 100 GWh/an, un potentiel équivalent reste encore à être exploité. La turbine Duo Turbo a été développée récemment pour exploiter ce potentiel, en particulier pour des sites en région alpine présentant des variations importantes de pression et de débit. Ce projet a permis de mettre au point une version urbaine de cette turbine pour soutenir le développement des « smart cities ». Un prototype a ainsi été installée dans la chambre de Verney de la commune de Pully pour produire de l'électricité, pouvant être injectée ou utilisée pour alimenter un système de monitoring de ce réseau, mais aussi pour réguler les différentes branches du réseau de distribution en assurant un pilotage dynamique associé à celui d'un réducteur de pression.

Summary

In Switzerland, harvesting the potential of drinking water networks to produce electricity is a common practice. It allows to recover part of the energy dissipated in pressure reducers by producing more than 100 GWh/year of electricity, while an equivalent potential remains unexploited. The Duo Turbo turbine was recently developed to harvest this potential in the Alpine region, for sites with significant variations in pressure and discharge. The goal of the present project is to develop an urban version of this turbine to support the concept of "smart cities". A prototype has thus been installed in the Verney chamber in the municipality of Pully to produce electricity, which can be injected or used to power a monitoring system for this network, but also to regulate the various branches of the distribution network by providing dynamic control combined with a pressure reducer.

Take-home messages

- Afin d'augmenter la production d'électricité d'origine renouvelable, il est possible d'exploiter le potentiel caché des infrastructures existantes.
- Usuellement le turbinage d'eau potable est réalisé entre deux réservoirs dans les régions montagneuses. Ce projet démontre que le turbinage d'eau potable est également possible sur un réseau d'eau potable maillé : la turbine DuoTurbo ainsi que son pilotage ont été adaptés pour un fonctionnement optimal en toute sécurité le réseau de la ville de Pully.
- Afin de maximiser la production d'électricité par la turbine installée sur un réseau d'eau potable maillé tout en améliorant la qualité de l'eau, il est possible de modifier la circulation entre les mailles du réseau d'eau potable en régulant les niveaux de pressions.
- Seul un réseau d'eau potable urbain alimentant plusieurs milliers de personnes, avec plusieurs dizaines de mètres de pression disponible, permet d'envisager l'installation d'une turbine.



Table des matières

| | |
|---|-----------|
| Zusammenfassung..... | 3 |
| Résumé..... | 3 |
| Summary | 3 |
| Take-home messages | 3 |
| Table des matières | 4 |
| 1 Introduction..... | 6 |
| 1.1 Contexte et arrière-plan..... | 6 |
| 1.2 Justification du projet..... | 7 |
| 1.3 Objectifs du projet..... | 8 |
| 2 Description des installations..... | 9 |
| 3 Procédure et méthode..... | 11 |
| 4 Résultats et commentaire..... | 13 |
| 4.1 WP1. Cahier des charges de l'installation..... | 13 |
| 4.1.1 T1.1 Définition des modes de fonctionnement | 13 |
| 4.1.2 T1.2 Architecture générale | 17 |
| 4.1.3 T1.3 Cahier des charges des équipements..... | 19 |
| 4.2 WP2 Développement..... | 21 |
| 4.2.1 T2.1 Développement de la turbine et son instrumentation..... | 21 |
| 4.2.2 T2.2 Sélection des vannes | 24 |
| 4.2.3 T2.3 Développement de l'armoire électrique et de sa régulation | 25 |
| 4.2.4 T2.4 Fonctionnement théorique du réseau | 30 |
| 4.2.5 T2.5 Fabrication..... | 38 |
| 4.3 WP3 Essais en laboratoire | 40 |
| 4.3.1 T3.0 Dispositif de test et instrumentation expérimentale | 40 |
| 4.3.2 T3.1 Plan d'expérience | 42 |
| 4.3.3 T3.2 Mesures de performance du prototype de Verney..... | 43 |
| 4.3.4 T3.3 Mesures transitoires | 48 |
| 4.3.5 T3.4 Mesures de fonctionnement MPPT | 53 |
| 4.3.6 T3.5 Mesures de comportement dynamique du débit turbiné | 55 |
| 4.4 WP4 Installation sur le site pilote..... | 56 |
| 4.4.1 T4.1 Installation | 56 |
| 4.4.2 T4.2 Mise en service | 57 |
| 4.4.3 T4.3 Mesures de performance sur site et surveillance | 65 |
| 5 Conclusions et résumé | 83 |
| 6 Aperçu et mise en œuvre prochaine | 84 |
| 7 Coopération nationale et internationale..... | 84 |



| | | |
|-----------|---------------------------|-----------|
| 8 | Publications | 85 |
| 9 | Bibliographie..... | 86 |
| 10 | Annexes..... | 87 |



1 Introduction

1.1 Contexte et arrière-plan

Le potentiel hydraulique, réévalué par l'OFEN en 2019, est en forte baisse par rapport aux estimations réalisées il y a quelques années¹. En effet, le nouveau cadre économique et les nouvelles réglementations pour protéger l'environnement limitent aujourd'hui la réalisation d'un potentiel technique. Néanmoins, les sites potentiels permettant de récupérer l'énergie des infrastructures existantes ne sont pas touchés par ces récentes modifications.

En effet, en turbinant l'eau potable, il n'y a pas d'impact sur l'environnement et pour le moment, le système de rétribution SRI soutient ce type d'installations. Une production d'électricité d'environ 100 GWh est ainsi récupérée sur les réseaux d'eau potable et un potentiel équivalent pourrait encore être exploité. C'est dans ce cadre qu'une nouvelle turbine axiale, avec deux roues contrarotatives par étage à vitesse variable, permettant de récupérer l'énergie des réseaux d'eau potable dissipée par les brise-charges, a été développée par la HES-SO Valais-Wallis et l'EPFL en collaboration avec des PME faisant l'objet d'un projet CTI de 2015 à 2018. Ce projet a permis de mettre au point un premier prototype fonctionnelle de 5kW testé en laboratoire à la HES-SO Valais-Wallis, atteignant un niveau de développement technologique TRL de 5. En 2019, deux premiers sites pilotes en zone rurale sur des réseaux d'adduction ont été équipés en Valais avec le soutien du SCCER SoE, la fondation The Ark, le BlueArk Entremont et les communes. Le site de Savièse est ainsi en service depuis le mois de mai 2019, celui de Médières à Verbier a été mis en route en décembre 2019. Ces deux premiers sites pilotes en zone rurale ont permis d'atteindre un niveau de maturité technologique TRL de 8. Cette technologie est complètement novatrice à notre connaissance.

Au niveau international, le turbinage d'eau potable est aussi un sujet de recherche, citons le projet Interreg REDAWN. Ce projet regroupe 15 partenaires de 5 pays de la côte atlantique travaillant dans le sens d'une plus grande efficacité des réseaux hydrauliques. Ce projet est cofinancé par le Fonds européen de développement régional dans le cadre du programme Interreg Atlantic Area. Un des sites pilotes en France vise à tester une microturbine très basse chute de 2m pour un débit de 15 m³/h. En Espagne, l'entreprise Perga a développé une turbine couplée à un générateur submersible pour des conduites jusqu'à 600 mm. Aux Etats-Unis, plusieurs projets sont en cours pour récupérer l'énergie des réseaux d'eau potable. Une compagnie à Portland, LucidPipes, propose une solution pour turbiner l'eau de grandes canalisations de 600mm à 1500mm de diamètre. Ces différentes technologies ne sont pas concurrentes de la Duo Turbo car elles ne permettent pas d'exploiter la même gamme de pression et de débit.

Si la production dans les réseaux d'adduction est aujourd'hui une pratique qui se développe, les réseaux urbains sont encore un domaine non exploré. Dans le cadre de ce projet, c'est une version « urbaine » de la turbine Duo Turbo qui sera développée et installée sur le réseau de la ville de Pully (VD). Le cahier de charge de cette nouvelle version de la turbine sera adapté par rapport au réseau d'adduction pour être encore plus robuste en vue d'un fonctionnement avec des variations régulières de pression et plusieurs arrêts démarrage par jour. Un pilotage de la turbine associé à celui d'un brise-charge sera développé afin de pouvoir réguler le débit et le niveau de pression dans ce réseau d'eau potable « maillé ». Il n'y a pas à ce jour de retour expériences d'un pilotage intelligent au sein d'un réseau d'eau potable de distribution. La validation de cette idée innovante et la robustesse d'un tel système requièrent un projet pilote, permettant de valider le concept en situation réelle.

¹ <https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/actualites-et-medias/communiques-de-presse/mm-test.msg-id-76258.html>



1.2 Justification du projet

La version urbaine de la Duo Turbo, développée et testée dans le cadre de ce projet, est une technologie complètement nouvelle qui permet d'équiper des sites avec des pressions de plusieurs dizaines de mètres pour des débits de plusieurs dizaines de m^3/h . L'électricité produite par cette turbine peut être injectée ou auto-consommée pour alimenter les différents capteurs du réseau d'eau. Sa grande flexibilité permet en plus de réguler les débits dans les branches du réseau considéré. Cette machine peut aussi fonctionner en pompe ce qui pourrait permettre sur d'autres sites d'augmenter la capacité de régulation du système.

Le concept de smart, i.e. le suivi en continu d'un système grâce à un monitoring adapté, est très répandu de nos jours, tant au niveau scientifique que commercial. Il peut s'appliquer à une multitude de domaines, dont les systèmes d'approvisionnement d'eau. Dans les réseaux d'eau potable, de plus en plus de capteurs de pression sont installés au niveau de points stratégiques pour suivre l'état du système. L'utilisation de l'information récoltée pour déclencher des modes de fonctionnement afin de régler intelligemment le réseau n'est cependant pas encore développée. Avec ce projet, des stratégies sont développées pour réagir de façon intelligente à l'état du réseau, avec une gestion dynamique des pressions et des modes spécifiques pour les situations accidentielles ou dégradées. En plus, cette gestion est intégrée au pilotage de la micro-turbine, maximisant l'énergie produite sans affecter le fonctionnement du réseau.

Ce savoir-faire est utile pour améliorer la qualité des systèmes de distribution. Pour les gestionnaires d'eau potable en région urbaine, plusieurs types de gains économiques sont imaginables :

- Une production électrique équivalente à 5-50 ménages par nœud ;
- La gestion dynamique des pressions du réseau, diminuant les sollicitations et, ainsi, les fuites ;
- La détection anticipée de dysfonctionnements, en complétant l'instrumentation du réseau (smart-city), pour éviter des dégâts ;
- L'amélioration de la qualité de l'eau, en diminuant la stagnation ;

Ce projet est mené par un groupement d'entités d'ingénierie, académiques, industrielles et institutionnelles qui maîtrise tous les domaines de compétences nécessaires :

- La groupe hydroélectricité de HES-SO Valais-Wallis, qui a déjà mené le développement de la première turbine Duo Turbo et son installation sur deux sites pilotes d'un réseau d'adduction (Biner 2021). Des essais de développement seront menés dans le laboratoire d'hydraulique de l'école qui est équipé d'un banc de test spécifiquement développé pour ces applications de turbinage d'eau potable. Une instrumentation adaptée au site pilote sera développée.
- BG Ingénieurs Conseils, bureau d'ingénieurs avec une longue expérience dans le domaine de l'eau potable et de l'hydroélectricité, en particulier dans la modélisation de réseaux et le turbinage d'eau potable.
- Cla-Val, spécialiste en vantellerie et principale fournisseur en Suisse des brise-charges.
- La Ville de Pully, qui met à disposition un site pilote et prendra en charge les travaux à mener pour la mise en place de la machine.



1.3 Objectifs du projet

Le présent projet vise à démontrer la faisabilité et l'intérêt d'un brise-charge intelligent, où le concept de micro-turbinage est associé aux fonctionnalités de réglage du réseau et de transmission d'information. La turbine devra opérer avec des fortes et rapides variations de débit et de chute, ainsi que résister physiquement aux régimes variables qui peuvent avoir lieu dans les réseaux urbains. En plus, le fonctionnement du nœud hydraulique en tant que brise charge doit être assuré même en cas de coupure de courant. Ainsi, le projet est développé en synergie entre les deux objectifs. Ceci permet le développement de solutions intégrales, car l'intégration d'une micro-turbine nécessite un réglage fin du réseau et un réseau intelligent pourra bénéficier d'une solution avec récupération d'énergie. Cette synergie permet aussi d'optimiser les ressources, tant en termes de matériel qu'en termes de temps de développement.

Les objectifs du projet pilote sur ce site, du point de vue du micro-turbinage, sont :

- Tester la bonne adaptabilité de la turbine à la gamme de pression et au potentiel hydraulique disponible dans un réseau urbain de distribution d'eau ;
- Vérifier l'intégration de la solution dans le réseau et la capacité de réglage de la turbine ;
- Valider sa robustesse en cas de régime dégradé (par ex. avec des casses / arrêt, situation incendie) ;
- Vérifier la stabilité du réglage ;
- Établir un calendrier compatible avec le programme de travaux de la ville ;

En plus, l'objectif de développer des fonctionnalités de pilotage pour améliorer les conditions dans le réseau est aussi identifié.



2 Description des installations

Le site de démonstration pour tester cette technologie se trouve sur le réseau d'eau potable de la commune de Pully (VD) en cours de rénovation. Une pré-étude d'opportunité a déjà été réalisée sur ce réseau présentant aujourd'hui trois étages de pression et qui en possèdera cinq une fois les travaux terminés.

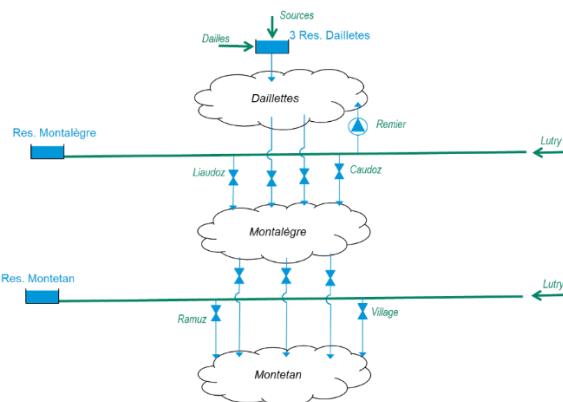


Figure 1 Schéma des étages de pression, prises et brise-charges du réseau actuel de Pully.

Le site se trouve à l'étage de pression inférieur, secteur de Montétan au niveau de la chambre de Verney qui doit être construite prochainement, voir Figure 2. Le secteur de Montétan inférieur sera ainsi alimenté par deux chambres, Verney et Davel, avec la micro-turbine installée dans la chambre Verney. La turbine sera ainsi entre deux étages de pression, sans influence directe par des conduites d'adduction ou des réservoirs.

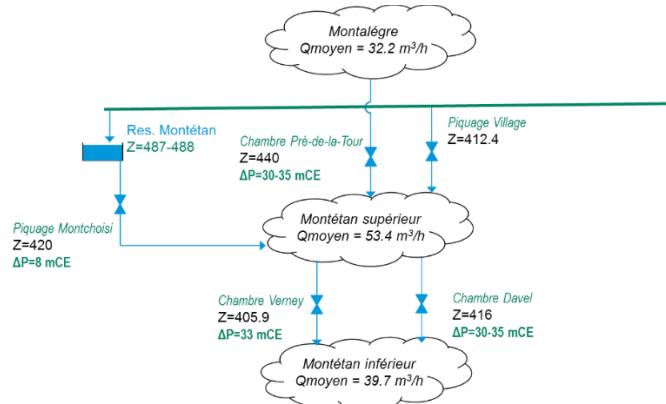


Figure 2 Synoptique du réseau futur de Montétan. Étages supérieurs du réseau futur de Pully pas représentés.

Une première estimation du potentiel sur ce site a déjà été réalisée dans le cadre d'une étude d'opportunité. Cette étude a considéré de façon simplifiée des rendements et chutes constants et des débits turbinables à partir de $20 \text{ m}^3/\text{h}$.



Tableau 1 Estimation du potentiel hydroélectrique du site de la chambre de Verney à Pully (VD)

| Secteur | Montetan inférieur |
|--|--------------------|
| Chambre | Verney |
| Débit turbiné moyen (m³/h) | 39 |
| Chute (m) | 30 |
| Puissance installée (kW) | 4.5 |
| Énergie annuelle (MWh/an) | 15 |

Avec un potentiel de 15 MWh, ce site présente des caractéristiques hydrauliques de chute et débit tout à fait adaptées pour l'installation d'une turbine Duo Turbo.

La commune de Pully a ainsi prévu d'intégrer au niveau de la nouvelle chambre de Verney cette turbine avec un montage en by-pass. Deux vannes de régulation Cla-Val seront aussi installées, l'une en série et l'autre en parallèle avec un pilotage dynamique avec la micro-turbine.



3 Procédure et méthode

Démarche proposée

La démarche proposée se base sur les compétences de l'équipe de projet, l'expérience acquise durant le développement de la turbine Duo Turbo et la mise en place de premiers sites pilotes sur des réseaux d'adduction. Les étapes suivantes ont été définies :

- Identification du cahier des charges de la turbine associée aux vannes de régulation
- Développement et validation sur banc de test
- Mise en place du site pilote
- Validation et Synthèse

Plan de travail

Les activités prévues sont organisées selon les différents WP décrits ci-dessous :

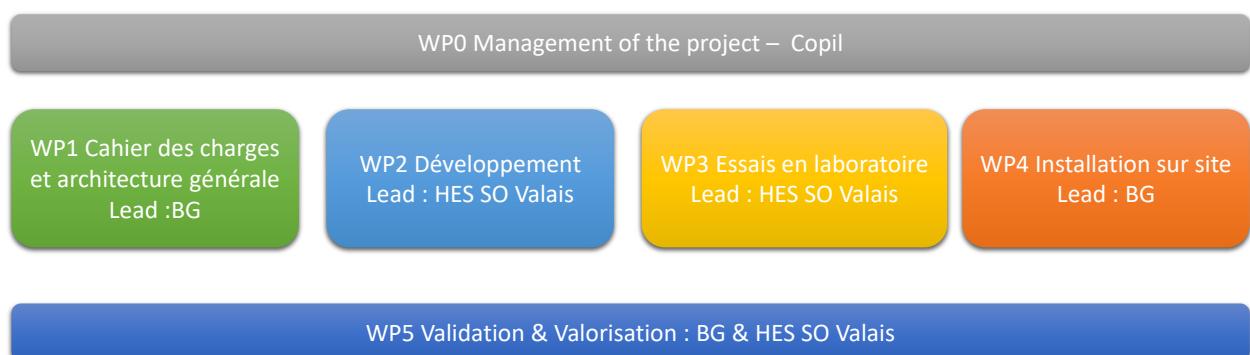


Figure 3 Organisation des activités du projet

WP1. Cahier des charges de l'installation

Responsable : BG, Partenaires : BG, Commune de Pully, Cla-Val, HES-SO Valais-Wallis

Le cahier des charges des différents éléments, qui seront installés sur le site pilote, sera défini par l'ensemble des partenaires du projet grâce à leurs compétences complémentaires couvrant tous les domaines nécessaires à la réussite du projet.

WP2 Développement

Responsable : HES-SO Valais-Wallis, Partenaires : HES-SO Valais-Wallis, BG, Cla-Val,

Afin d'adapter la turbine et les différents éléments qui seront installés sur le site pilote différents, développement sont prévus.

WP3 Essais en laboratoire

Responsable : HES-SO Valais-Wallis, Partenaires : HES-SO Valais-Wallis, BG, Cla-Val,

Afin de valider le système qui sera installé sur le site pilote, des essais seront menés au laboratoire d'hydraulique de la HES-SO Valais-Wallis à Sion.

WP4 Installation sur le site pilote

Responsable : BG, Partenaires : BG, Cla-Val, HES-SO Valais-Wallis, Commune de Pully

Installation, mise en service de la machine et mesures de performance sur site et surveillance.



WP5 Validation et dissémination

Responsables : HES-SO Valais-Wallis & BG, Partenaires : HES-SO Valais-Wallis, BG, Cla-Val, Commune de Pully

Validation des différents modèles numériques et essais réalisés en laboratoire en comparant avec les mesures sur site et rédaction des articles scientifiques et rapport sur les développements réalisés dans ce projet et les essais réalisés sur site pilote pour qualifier cette nouvelle technologie.

Planning du projet

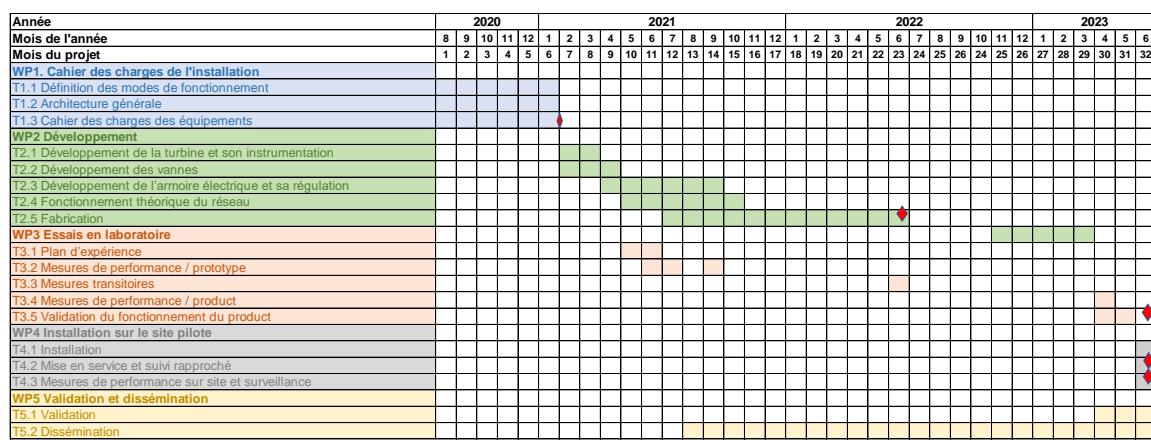


Figure 4 Planning du projet

Contrôle des résultats

Afin de garantir la réussite de ce projet qui s'étalera sur 32 mois, différentes mesures seront mises en place :

- Organisation d'un Kick Off avec tous les partenaires au début du projet ;
- Mise en place d'un comité de pilotage avec une personne représentante par partenaire ;
- Organisation de 4 séances du Copil, voir planning ci-dessus (ronds bleus) :
 - Copil 1 : validation des principes de conception, déclenchement de la fabrication.
 - Copil 2 : validation des essais en labo, déclenchement de l'installation sur site.
 - Copil 3 : validation des résultats de la mise en service, début de l'exploitation.
 - Copil 4 : validation de la communication, clôture du projet ;
- Séances d'avancement régulière du comité de direction du projet ;
- Rédaction de 6 livrables en plus du rapport final de l'OFEN :

Tableau 2 Liste des délivrables.

| Livrable sous forme de rapport ou de présentation | Resp. |
|---|------------|
| D1 - Cahier des charges des équipements | BG |
| D2 - Dossier de fabrication | HES |
| D3 - Présentation des mesures en laboratoire | HES |
| D4 - Rapport de mise en service | BG |
| D5 - Présentation des mesures sur site | HES |
| D6 - Publications soumises | HES |



4 Résultats et commentaire

4.1 WP1. Cahier des charges de l'installation

Responsable : BG, Partenaires :BG, Commune de Pully, Cla-Val, HES-SO Valais-Wallis.

Le projet a démarré avec un workshop le 24.08.2020 auquel les quatre partenaires ont participé. L'objectif de ce workshop a été de faire un démarrage du projet avec toute l'équipe, rappelant les objectifs principaux du projet et le planning.

Le workshop a également été une opportunité pour échanger sur des idées de mise en œuvre, des risques et d'opportunités. Un atelier "speed boat" a été mené pour cette échange. L'atelier speed boat est un moyen pour identifier en concertation les objectifs, les atouts et opportunités, les difficultés attendues et les faiblesses.

Comme conclusion de ce workshop, la priorité du projet est indubitablement la qualité du service de distribution d'eau potable. Cette distribution doit être fiable et sécurisé même en mode dégradé.

Dans ce contexte, le projet cherchera à progresser en deux thématiques sœurs :

- Produire de l'énergie en maximisant le turbinage. Pour ceci il sera impératif de comprendre la dynamique entre la turbine et les vannes de brise-charge dans un réseau maillé.
- Le pilotage intelligent du réseau, qui nous permettra de progresser vers la smart city. Ceci par la définition de fonctions intelligentes pour non seulement le turbinage mais aussi réduire la pression dynamiquement : moins de ruptures, moins de fuites, détection d'anomalies, suivie des débits nocturnes

Pour la sécurité, il est aussi important d'automatiser en gardant la possibilité de contrôler manuellement l'installation. Finalement, le projet a un objectif de pilote, i.e. de démonstration des possibilités de la technologie et diffusion pour son développement. Le conservatisme de l'exploitation est une faiblesse des systèmes actuels qu'il faudra vaincre par des solutions solides et avec des valeurs ajoutées clairs.

Le projet a l'avantage d'être développé dans le cadre d'une opportunité créée par la sectorisation du réseau de Pully, avec une chambre qui pourra être construite en prenant en compte les besoins pour le micro-turbinage. Le système de télégestion est aussi en cours de changement, avec également l'installation de débitmètres dans toutes les chambres.

4.1.1 T1.1 Définition des modes de fonctionnement

Workshop « Fonctionnalités »

Le 03.09.2020 un atelier du projet a été réalisé avec les quatre partenaires et le bureau Pilet, responsable pour le système de pilotage du réseau de Pully, avec pour objectif de définir les fonctions à considérer dans le cadre du projet pour le pilotage intelligent et les ordonner en fonction de leur utilité et faisabilité. La conclusion de ce workshop est résumée sur la Figure 5.



| Nécessaire | Utile | Peu utile |
|---|---|--|
| Fonctionnement du nœud en blackout / panne Objectif: maintenir la consigne aval en cas de blackout ou panne. | Maximiser l'énergie produite Objectif : étude de comment maximiser l'énergie produite, par pilotage et/ou par reprise du design de la machine | |
| Adaptation de la pression de service Objectif : consigne de pression aval inférieure pendant la nuit | Sécurité incendie Objectif : Consigne de pression aval spécifique incendie, supérieure aux consignes normales Difficulté : Acceptabilité ECA | Communication avec d'autres capteurs Objectif: profiter de l'information des autres capteurs épargnés dans le réseau |
| Modification du sens de circulation Objectif : prioriser la turbine pendant des heures de haute consommation. Prioriser la chambre Davel pendant le reste du temps. | Détection de Mode sans Davel Objectif : Détection automatique de que Davel est hors opération | |
| | Détection d'anomalies Objectif : Détection automatique d'un comportement hors normal | |

Figure 5 Fonctions considérées pour le projet lors du workshop « Fonctionnalités »

L'objectif du projet ne sera pas de développer toutes les fonctions identifiées mais d'implémenter celles qui permettront une première installation pilote à Pully dans le cadre du calendrier du projet.

Contraintes du réseau

La chambre Verney se trouve entre les secteurs de Montétan supérieur et inférieur et en parallèle à la chambre Davel (Figure 2). Les deux chambres alimentent le réseau en aval. Le réseau a ainsi été conçu pour avoir un chemin de redondance d'alimentation. Avec une telle configuration, l'installation avec turbine dans la chambre de Verney doit impérativement avoir un by-pass à la machine, pour assurer cette redondance quand les débits sortent du domaine turbinable.

La chute disponible, estimée autour de 30 m, sera dépendante de la pression dans le réseau en amont, Montétan supérieur, et de la consigne de pression en aval. Cette consigne pourra être modifiable par le système de gestion mais sera en général stable. La pression en amont dépendra des consignes des vannes aux entrées de Montétan supérieur (Village, Pré-de-la-Tour et Montchoisi – voir Figure 2). La chute de pression qui n'est pas prise par la turbine sera complétée par une vanne Cla-Val en aval.

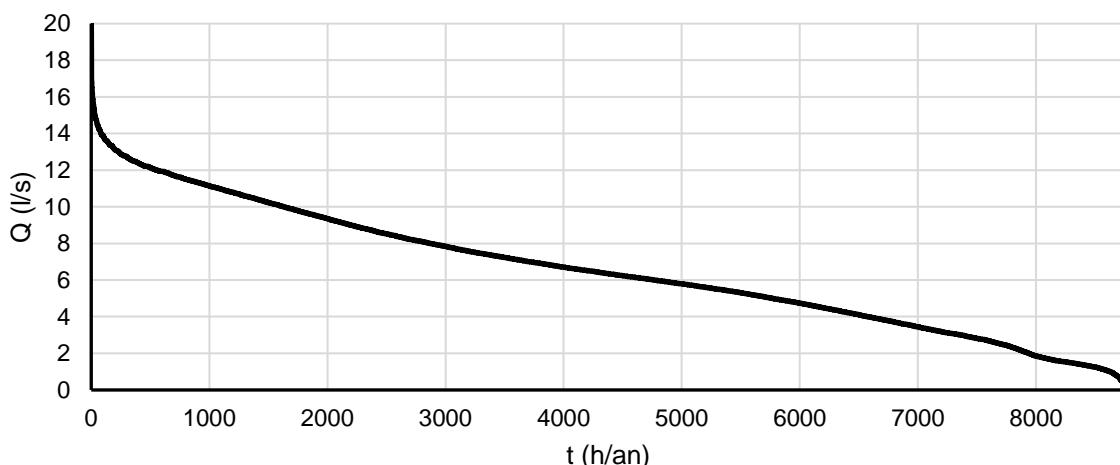


Figure 6 Courbe des débits classées



Lors de l'étude d'opportunité, les consommations annuelles du secteur de Montétan inférieur ont été estimées selon des mesures de débits aux prises lausannoises par temps de 15 min en 2018 et des volumes de consommation hebdomadaire entre 2017 et 2018. Le résultat est la courbe de débits classés de la Figure 6.

Finalement, la contrainte de la qualité de l'eau doit être considérée. Le réseau de Montétan inférieur a une forme très "unidirectionnelle" Est-Ouest. Si le réseau avait une seule alimentation possible, par exemple par Verney, les conduites de distribution dans l'extrême Est auraient très souvent le même sens d'écoulement et, en fin de réseau, auraient tendance à avoir des périodes de stagnation d'eau. Pour avoir une bonne qualité d'eau dans tout le réseau, il est ainsi important d'avoir des périodes d'alimentation depuis les deux entrées.

Limites de fonctionnement

Dans le cadre du projet, seule la chambre de Verney sera automatisée. Aucune autre chambre du réseau de la Ville de Pully aura des vannes pilotées et connectées aux automates de la chambre Verney. Le système devra ainsi fonctionner de façon indépendante.

Dans la chambre Verney, les deux vannes Cla-Val pourront être motorisées et pilotées.

Modes de fonctionnement

Mode turbinage

Lors d'un fonctionnement normal, le contrôle de pression dans une chambre de brise charge est réglé par un maintien de la pression aval une vanne type Clayton : elle s'ouvre quand la pression aval est trop basse et se ferme quand la pression aval est trop haute.

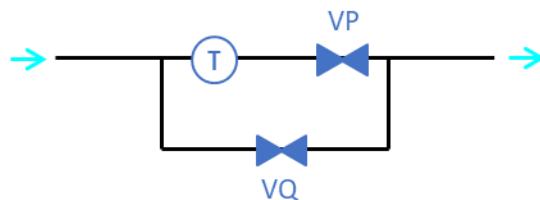


Figure 7 Conceptualisation de la chambre de turbinage

Le fonctionnement en mode de turbinage doit remplacer ce système pour toutes les gammes de débits, indépendamment de la plage de fonctionnement de la turbine (Figure 7). Ainsi, en plus de la turbine, une Clayton en aval et une Clayton en bypass sont nécessaires :

- Contrôle hydraulique : la vanne en aval de la branche turbine (VP) maintient la pression aval et la vanne de bypass (VQ) compense le débit non couvert par la turbine.
- En mode production (vanne VP ouverte), la turbine cherchera le point de fonctionnement qui optimise la production d'énergie en fonction du débit en adaptant les vitesses de rotation des deux roues. L'excès de pression aval de la turbine est dissipé dans la VP.
- En tout temps, la vanne VQ a une consigne en pression légèrement plus basse que la vanne VP. Quand le débit est supérieur au débit maximal turbinable, la vanne VP est complètement ouverte et la pression aval descend, activant la vanne en bypass VQ.
- Quand le débit est trop petit pour être turbiné, le pilote maintient la vanne VP fermée et le réglage est maintenu par VQ.
- Au minimum, la vanne VP doit être pilotée, car elle a la consigne qui permet l'ouverture de la ligne de turbinage.
- L'intérêt de piloter la vanne VQ sera analysé lors du descriptif fonctionnel des pilotes.



Mode priorisation automatique

Pour optimiser la production d'énergie, des fonctions de priorisation seront développées. L'objectif de base sera que, quand il est possible de turbiner, i.e. quand la consommation est supérieure au débit minimal turbinable, toute l'alimentation du secteur passera par la turbine. Quand le débit n'est pas suffisant, le passage par la chambre sœur, Davel, sera favorisé pour diminuer les périodes de stagnation d'eau.

Mode nocturne

Un mode de priorisation nocturne sera implémenté, indépendamment du débit de consommation, pour assurer une période conséquente à bas débits où le passage se fait par Davel, avec l'objectif d'éviter des stagnations d'eau.

Mode blackout

Un mode de réaction à un blackout, en particulier de vitesse de fermeture des vannes, sera défini pour gérer de façon la plus transparente possible pour le réseau les effets de perte de la turbine accidentelle.

Avec ces modes de fonctionnement, nous nous proposons d'assurer toutes les fonctions nécessaires identifiées lors du workshop fonctions et nous chercherons à maximiser l'énergie produite (Figure 8).

| Nécessaire | Utile | Peu utile |
|---|---|--|
| Fonctionnement du nœud en blackout / panne Objectif: maintenir la consigne aval en cas de blackout ou panne. | Maximiser l'énergie produite Objectif : étude de comment maximiser l'énergie produite, par pilotage et/ou par reprise du design de la machine | |
| Adaptation de la pression de service Objectif : consigne de pression aval inférieure pendant la nuit | Sécurité incendie Objectif : Consigne de pression aval spécifique incendie, supérieure aux consignes normales Difficulté : Acceptabilité ECA | Communication avec d'autres capteurs Objectif: profiter de l'information des autres capteurs éparpillés dans le réseau |
| Modification du sens de circulation Objectif : prioriser la turbine pendant des heures de haute consommation. Prioriser la chambre Davel pendant le reste du temps. | Détection de Mode sans Davel Objectif : Détection automatique de que Davel est hors opération | |
| | Détection d'anomalies Objectif : Détection automatique d'un comportement hors normal | |

Figure 8 Fonctions choisies pour le développement lors du projet TUNE en rouge.

La fonction sécurité incendie, viserait à, en cas d'activation du mode par les pompiers, gérer les consignes de pression en aval permettant une pression dans le secteur supérieure aux consignes normales. Dans ce cas, la pression de service normale pourrait être réduite, ce qui permettrait d'un côté avoir un réseau avec moins de charge, réduisant des sollicitations sur les conduites, et d'un autre côté avoir des diamètres plus faibles. Cette fonction, bien que très prometteuse, aura besoin d'un encadrement politique, en particulier avec les entités d'assurance (dans le canton de Vaud, l'ECA), ce qui sort à présent de l'emprise du projet.

Les fonctions de détection d'anomalies et communication avec autres capteurs ont comme base un monitoring du réseau pour optimiser le pilotage. La remontée d'information des capteurs dans la chambre Verney sera de toute façon un gain intrinsèque du projet. L'utilisation de la chambre pour comprendre l'état du réseau exige une étude approfondie de comment utiliser l'intelligence artificielle pour interpréter les réponses du réseau aux changements de consignes.



Situations extrêmes de sécurité

Dans le projet d'implémentation de la micro-turbine dans la chambre Verney, il sera nécessaire de considérer les situations extrêmes de sécurité suivantes :

- Début d'incendie en aval : Ceci implique l'ouverture d'une borne hydrante en aval, ce qui engendra une augmentation brusque de la demande. Le système devra pouvoir fournir le débit nécessaire sans perte de pression en aval.
- Fin d'incendie en aval : La fermeture brusque d'une borne hydrante peut générer un coup de bâlier fort. La machine doit pouvoir supporter les pressions générées ou être protégée par des systèmes anti-bâlier.
- Casse aval : Ceci implique une augmentation très brusque de la demande, comme dans le cadre de l'incendie mais encore plus importante.
- Le comportement lors des situations extrêmes identifiées doit être vérifié également dans le cadre de Davel hors service.

4.1.2 T1.2 Architecture générale

Le schéma hydraulique global du futur site de turbinage de Verney, équipé avec une microturbine contrarotative DuoTurbo, est décrit sur la Figure 9. Cette architecture est basée sur un montage dit « parallèle » dans lequel la branche de la turbine se trouve en parallèle de celle du réducteur de by-pass.

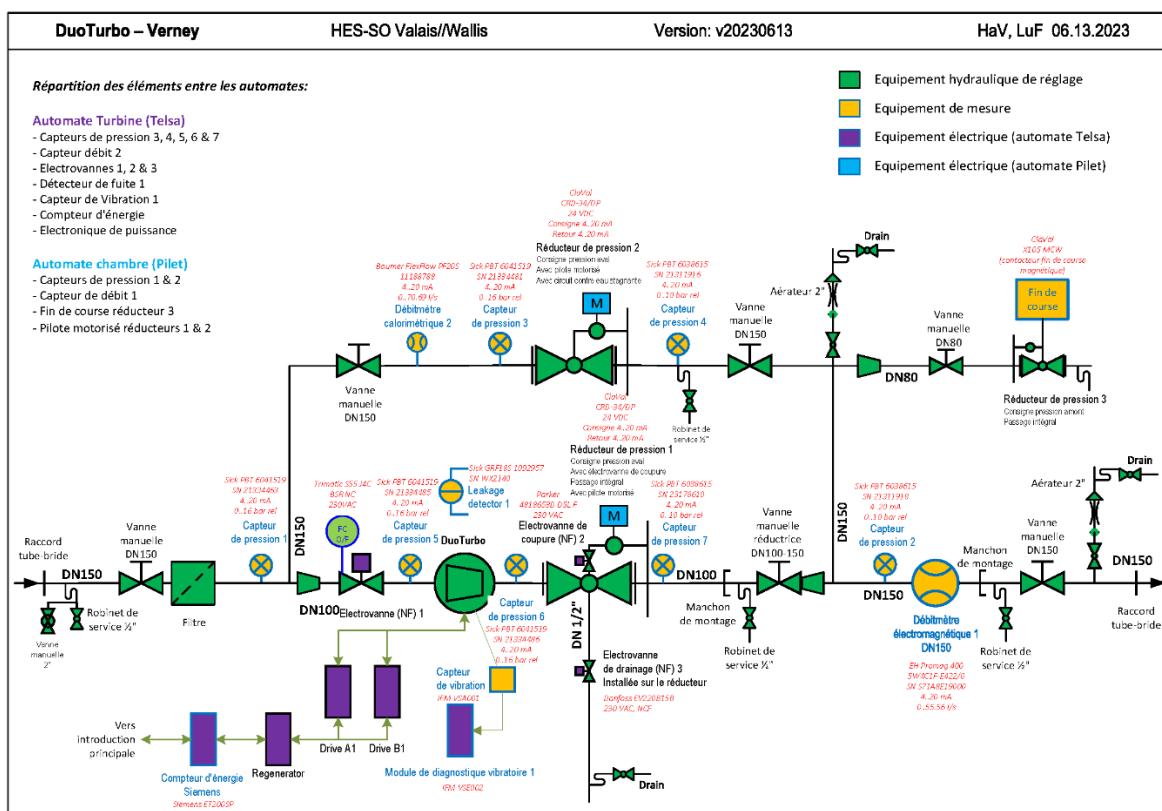


Figure 9 Schéma hydraulique final du site de Verney équipé avec une DuoTurbo.



L'ensemble des équipements prévus pour le bon fonctionnement et le réglage de l'installation (figurés en vert) comporte les éléments suivants :

- Plusieurs vannes d'arrêt manuelles ou automatisées, dédiées à l'isolement d'une partie ou de la totalité de l'installation en cas de maintenance, à l'isolement des capteurs ou encore pour le prélèvement de l'eau ;
- Un filtre garantissant la qualité de l'eau qui sera turbinée pour éviter tout endommagement de la machine ;
- Des cônes de réduction et d'élargissement pour le passage entre les sections de différents diamètres ;
- Une microturbine contrarotative DuoTurbo dédiée à la récupération de l'énergie disponible dans le réseau ;
- Deux réducteurs de pression ClaVal, le premier sur la branche de la turbine à son aval, un deuxième sur la branche de by-pass, dédiés au réglage de la pression aval du site en toute circonstance.
- Un réducteur de pression avec consigne de réglage de pression amont, faisant office de soupape de sécurité pour le réseau en cas d'une onde de surpression due aux phénomènes transitoires.
- Des purgeurs/aérateurs pour évacuer l'air emprisonné dans le circuit ou empêcher une forte dépression en cas de phénomène transitoire dans le réseau.

Les éléments de monitoring, en jaune sur la Figure 9 prévus pour la sécurité de l'installation et pour l'évaluation du bon fonctionnement du système et en particulier de la turbine, sont les suivants :

- Sept capteurs de pression relative installés en amont et en aval de la bifurcation des deux branches parallèles de l'installation et encore en amont et en aval de la turbine et des deux réducteurs de pression principaux ;
- Un débitmètre électromagnétique pour la mesure de débit total de l'installation, installé en aval de la bifurcation ;
- Un débitmètre calorimétrique installé sur la branche de by-pass, pour déterminer le débit de by-pass et indirectement celui turbiné ;
- Un capteur de position installé sur le réducteur de sécurité contre la surpression ;
- Un capteur optique de détection de fuite pour l'identification d'une éventuelle rupture de la chemise d'étanchéité de la turbine et encore un capteur de monitoring des vibrations de la turbine ;
- Un capteur de mesure pour la puissance électrique injectée dans le réseau.

Finalement, en violet, sont représentés les éléments actifs de contrôle de l'installation :

- Deux pilotes motorisés, installés sur les réducteurs principaux ClaVal, dédiés à la modification de la consigne de réglage de la pression aval, afin d'assurer l'ouverture de la branche de by-pass en cas d'un débit trop important du site, supérieur à celui maximal de la turbine, et encore pour favoriser ou défavoriser l'utilisation de ce nœud par rapport à celui parallèle de Davel pour alimenter en eau le secteur aval du réseau d'eau potable ;
- Trois convertisseurs de fréquence, deux dédiés au pilotage de la vitesse de rotation des deux roues de la turbine, et un troisième pour l'injection de l'énergie produite dans le réseau électrique ;
- Les moteurs électroaimants des électrovannes pour l'isolement de la branche de la turbine et pour la purge de l'eau stagnante de la branche de la turbine après un arrêt prolongé.



Ces équipements ont été choisis, conjointement avec l'ensemble des acteurs impliqués dans le projet, pour garantir l'approvisionnement permanent en eau du secteur desservi tout en maximisant dans un premier temps la production de l'énergie. En cas d'une coupure d'électricité ou toute autre défaillance du système de turbinage, l'architecture actuelle permet d'assurer intrinsèquement (par le fonctionnement purement mécanique des réducteurs de pression) l'approvisionnement en eau du réseau tout en garantissant la sécurité du réseau et de l'installation. L'ensemble des capteurs prévus permettra de fournir les informations nécessaires au développement ultérieur de fonctionnalité « smart » pour desservir le réseau.

4.1.3 T1.3 Cahier des charges des équipements

Les avancements du WP1 ont abouti à des spécifications pour les différents éléments de la chambre.

Turbine

Selon les plages de pression et de débits disponibles, la turbine doit pouvoir fonctionner dans les conditions suivantes :

- sur une plage de chutes entre 30m et 35 m, la chute devrait varier faiblement.
- sur la plus grande plage de débits possible compte tenue de la courbe de débits classées (Figure 6), présentant un débit moyen de 6.6 l/s.

La turbine doit être régulée pour produire la puissance maximale possible avec le débit disponible.

Éléments de régulation

Deux vannes Clayton sont installées dans la chambre, une en ligne avec la turbine et une en bypass. Il est possible de changer depuis un automate les consignes de chaque une de ces deux vannes. Il est également possible de régler la vitesse de fermeture et ouverture des vannes, pour limiter les régimes transitoires lors des changements de mode de fonctionnement et lors des accidents.

Les éléments de régulation assurent que la pression à l'aval est dans la plage nécessaire pour le bon fonctionnement du réseau aval : pression minimale de 4 bar pour un fonctionnement en débit de pointe journalier.

Équipements électriques et de commandes

La chambre a été équipée avec une armoire électrique et de contrôle nécessaire pour le bon fonctionnement du nœud-turbine. Deux automates séparés, un de pilotage du nœud ainsi que de communication avec la supervision générale du réseau et un de pilotage la turbine, ont été installés dans l'armoire.

Les armoires (pour les convertisseurs et pour l'automate) ont été introduites dans la chambre par un trou d'homme avec un diamètre de 800mm.

Deux niveaux de fonctions sont ainsi considérés avec deux automates de pilotage :

Le **niveau de supervision de la turbine**, qui compte toutes les fonctions nécessaires pour le contrôle et protection de la turbine, en particulier :

- Séquences de démarrage ;
- Opération de turbinage normale pour optimisation de la production d'énergie ;
- Arrêt normal ;
- Arrêt d'urgence ;
- Pilotage de la vanne d'isolement ;
- Acquisition des informations de pression, débit, température, puissance, alarmes de la turbine et de la vanne d'isolement.



Le **niveau de supervision du nœud** compte toutes les fonctions pour piloter le nœud dans son ensemble, en particulier :

- Gestion des consignes des deux vannes Clayton ;
- Gestion des modes d'opération (ex : mode nuit, mode automatique, mode manuel) ;
- Pilotage de la vanne Clayton en ligne ;
- Communication avec le contrôle de gestion du réseau.



4.2 WP2 Développement

Responsable : HES-SO Valais-Wallis, Partenaires : HES-SO Valais-Wallis, BG, Cla-Val,

4.2.1 T2.1 Développement de la turbine et son instrumentation

La mise à jour du potentiel hydraulique présente les caractéristiques suivantes :

- Chute disponible : 30m
- Pression d'entrée estimée : 8 bar
- Pression de sortie estimée : 5 bar
- Débit moyen : 6.6 l/s

Grâce au logiciel développé dans le cadre du projet Duo Turbo, une estimation de l'énergie hydraulique récupérable et de l'énergie électrique produite peut être réalisée pour les designs de roues disponibles. A ce jour, deux designs de roues sont disponibles ; celui de la turbine installée à Savièse et celui de la turbine installée à Médières. Nous avons aussi effectué l'analyse avec une caractéristique de pompe inversée testée au laboratoire d'hydraulique de la HES SO Valais. Sur les figures suivantes, Figure 10 à Figure 12, une estimation de l'énergie hydraulique récupérable sur le site ainsi que l'énergie électrique produite par trois différentes turbines sont présentées.

Design Savièse

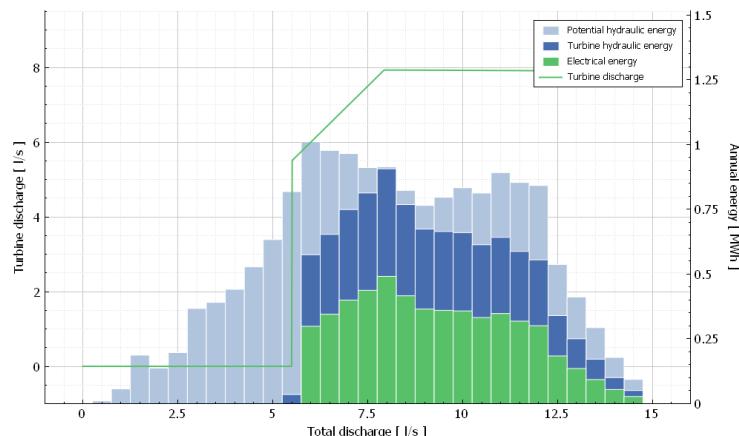


Figure 10 Estimation du l'énergie hydraulique récupérable et de l'énergie électrique produite par la turbine Duo Turbo avec le design des roues du site de Savièse.



Design Médières

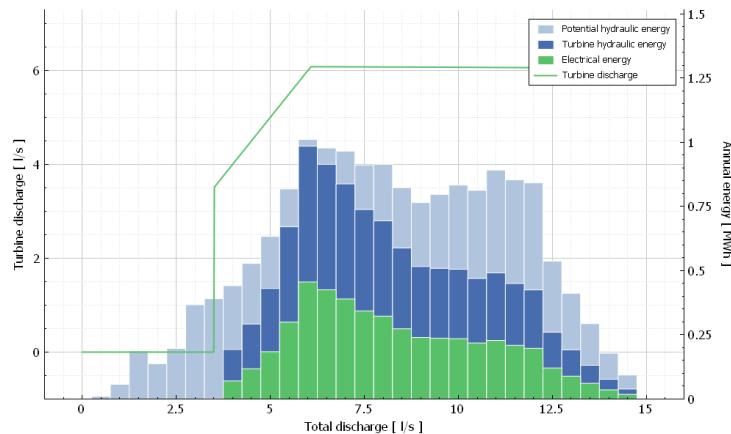


Figure 11 Estimation du l'énergie hydraulique récupérable et de l'énergie électrique produite par la turbine Duo Turbo avec le design des roues du site de Médières.

Design PAT

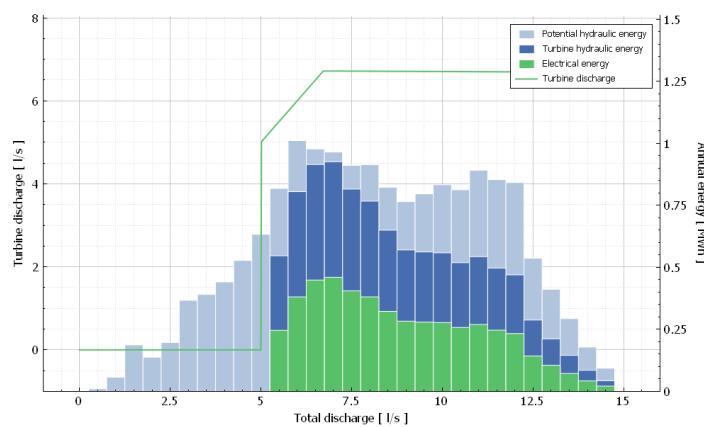


Figure 12 Estimation du l'énergie hydraulique récupérable et de l'énergie électrique produite par une pompe inversée testée au laboratoire de la HES SO Valais.

Les performances de ces trois solutions sur le site de Verney sont ensuite comparées sur la Figure 13. C'est le design des roues de Savièse qui est le plus adapté pour ce site avec une estimation de la production d'énergie électrique de 5.3 MWh et un rendement global de 53%. La décision a donc été prise de sélectionner cette solution pour le projet.

| Design Savièse | Design Médières | Design PAT |
|--|--|--|
| • Potentiel hydraulique du site : 16.7 MWh | • Potentiel hydraulique du site : 16.7 MWh | • Potentiel hydraulique du site : 16.7 MWh |
| • Energie hydraulique récupérée : 9.8 MWh | • Energie hydraulique récupérée : 10.4 MWh | • Energie hydraulique récupérée : 9.9 MWh |
| • Energie électrique produite : 5.3 MWh | • Energie électrique produite : 4.8 MWh | • Energie électrique produite : 4.9 MWh |
| • Chute récupérée : 30m | • Chute récupérée : 30m | • Chute récupérée : 30m |
| • Plage de débit turbiné : 5.5 l/s – 8 l/s | • Plage de débit turbiné : 3.5 l/s – 6.1 l/s | • Plage de débit turbiné : 5 l/s – 6.7 l/s |
| • Plage de puissance : 0.5kW à 1.2 kW | • Plage de puissance : 0.1kW à 0.9 kW | • Plage de puissance : 0.4kW à 1 kW |
| • Rendement global : 54 % | • Rendement global : 47 % | • Rendement global : 50 % |

Figure 13 Comparaison des performances des deux designs de roue de la turbine Duo Turbo et d'une pompe inversée.



Concernant l'instrumentation, comme décrit précédemment dans le paragraphe décrivant l'architecture générale hydraulique du site, plusieurs capteurs seront installés pour le contrôle/commande de l'installation en toute sécurité ainsi que pour le monitoring complet de l'ensemble des paramètres hydrauliques (pression, débit, niveau d'eau du réservoir de fuite), mécaniques (vibrations) et électriques (courant, tension, puissance électrique) des différents composants.

Le tableau suivant indique les principaux capteurs analogiques prévus :

Tableau 3 Liste des principaux capteurs analogiques de l'installation.

| Quantité directement mesurée | Variable(s) indirectement calculée(s) | Capteur | Fabricant / type | Plage de mesure |
|------------------------------|--|------------------------------|-------------------------|-----------------|
| 4x Pression statique | Chute, débit (via Bernoulli), Puissance hydraulique, Rendement | Pression statique relative | Sick PBT | 0..16 bars |
| 3x Pression statique | Chute, débit (via Bernoulli), Puissance hydraulique, Rendement | Pression statique relative | Sick PBT | 0..10 bars |
| 1x Débit total | Débit turbiné, Puissance hydraulique, Rendement | Débitmètre électromagnétique | EH Promag 400 | configurable |
| 1x Débit by-pass | Débit turbiné, Puissance hydraulique, Rendement | Débitmètre calorimétrique | Baumer PF20S | configurable |
| 1x Vibration | - | Accéléromètre | IFM VSA001 + IFM VSE002 | configurable |
| 1x Multimètre | Puissance électrique, rendement, Production | Multimètre électrique | Sineax DME 440 | configurable |

Ainsi, la chute de pression sur la turbine et sur les deux réducteurs de pression de la branche de la turbine et de by-pass est mesurée à l'aide des capteurs de pression relative. Deux gammes de pression (respectivement 0-16 bars et 0-10 bars) ont été choisies en fonction de la position (amont ou aval) sur le circuit. De plus, la pression statique en amont et en aval de la bifurcation entre les deux branches est également monitorée avec le même type de capteurs.

Le débit total transitant sur le site est mesuré à l'aide d'un débitmètre électromagnétique, alors que celui de la branche de by-pass est mesuré avec un débitmètre calorimétrique. Le débit turbiné est calculé comme la différence entre les valeurs du débit total et de by-pass. De plus, avec le débit et la chute de la turbine connus, la puissance hydraulique peut aussi être déduite.

La vibration de la machine est monitorée en permanence à l'aide d'un module de surveillance vibratoire pour identifier tout anomalie ainsi que le vieillissement de la machine et prévoir la maintenance.

Un multimètre électrique est installé entre le convertisseur d'injection et le réseau électrique pour mesurer principalement la puissance électrique injectée. De plus, avec les puissances électrique et hydraulique connues, le rendement de fonctionnement de la turbine peut être aussi calculé.

Enfin, la puissance électrique et la vitesse de rotation de chaque roue de la machine sont fournies directement par les convertisseurs de fréquence qui les pilotent.

Le reste des capteurs sert principalement à la sécurité du pilotage et de l'installation.



4.2.2 T2.2 Sélection des vannes

L'installation est dotée de trois vannes Clayton, chacune avec des fonctionnalités spécifiques pour répondre à différents objectifs. Voici leurs caractéristiques principales :

Tableau 4 Caractéristiques des vannes Clayton du site de Verney à Pully.

| Elément | Fonctions | Caractéristiques / Équipement |
|---|--|--|
| Réducteur de pression de la branche turbine | - Régulation de la pression aval du site. - Fermeture de la branche turbine. - Isolation de la branche turbine en cas de défaillance de la machine. | - DN100, PN 16 - Avec passage intégral pour réduire les pertes de charge et augmenter la chute disponible de la turbine - Équipé d'un pilot motorisé pour varier la pression aval de consigne - Muni d'une électrovanne installée sur le pilot, lui permettant une fermeture totale en cas d'une défaillance sur la turbine |
| Réducteur de pression de la branche de by-pass | - Régulation de la pression aval du site - Reprise automatique du surplus de débit non-turbiné ou de la totalité du débit en cas d'arrêt de la branche turbine - Isolation de la branche turbine en cas de défaillance de la machine | - DN150, PN 16 - Équipé d'un pilot motorisé pour varier la pression aval de consigne |
| Réducteur de pression de sécurité pour la surpression | - Vanne de décharge en cas de surpression dans le réseau - Réglé avec une ouverture rapide et une fermeture lente pour ne pas induire à son tour des ondes de surpression dans le réseau - Pilotage en pression amont | - DN 80, PN 16 - Passage intégral pour permettre l'évacuation d'un maximum de débit en cas de surpression - Équipé d'un capteur de fin de course magnétique pour indiquer son ouverture |

Le fonctionnement en parallèle des réducteurs principaux de l'installation se fait avec un réglage de la pression de consigne aval légèrement différent entre les deux. En effet, en imposant une consigne de pression supérieure d'environ 0.5 bars au réducteur de la branche turbine par rapport à celui de by-pass, la totalité du débit est ainsi forcée dans la branche turbine, jusqu'à ce que le débit maximal de la turbine soit atteint. Pour tout débit supérieur, la chute de pression sur la branche turbine étant plus importante, la pression avale diminue et le réducteur de by-pass commence à s'ouvrir et reprendre le surplus. En cas d'arrêt de la branche turbine, (p. ex. pour un débit trop faible ou en cas de défaillance de la turbine) l'intégralité du débit transitera par le réducteur de by-pass. Le choix d'un diamètre de 150 mm pour ce réducteur a été fait pour assurer le passage de tout débit nécessaire selon les exigences d'exploitation en cas d'incendie, même avec la branche turbine fermée.

Un autre point important consiste à permettre le pilotage de la pression de consigne des réducteurs de Verney, de telle sorte que l'on puisse favoriser l'alimentation du réseau desservi principalement par ce



point, pour maximiser la production pendant la journée, et de favoriser plutôt le point Davel pendant la nuit, quand le débit de consommation n'est plus suffisant pour produire de l'électricité. Ainsi, une circulation quotidienne de l'eau dans l'ensemble du réseau est assurée (impérieusement nécessaire de point de vue sanitaire). L'influence du passage du débit par Verney ou Davel se fait de la même manière qu'entre les deux réducteurs de la branche turbine et de by-pass.

La vanne de décharge est un élément courant et indispensable dans les différents points du réseau, faisant partie de l'équipement de base, indépendant de l'installation d'un système de turbinage. Le réglage des temps d'ouverture et de fermeture des réducteurs sera effectué par ClaVal qui détient l'expertise nécessaire. En parallèle, une caractérisation des temps de réaction des vannes Clayton sera effectuée en laboratoire sur le banc d'essai afin de nourrir le modèle numérique de simulation du réseau avec et sans turbine.

4.2.3 T2.3 Développement de l'armoire électrique et de sa régulation

Pour assurer le pilotage de la chambre ainsi que la communication entre le système de gestion du réseau et la chambre, deux automates ont été installés par des fournisseurs distincts :

- L'automate de pilotage de la turbine (niveau de supervision de la turbine) a été commandé à Telsa SA, entreprise qui a fabriqué les armoires de contrôle de la DuoTurbo pour les sites déjà existants. La commande chez le même fabricant représente une économie du temps nécessaire à la programmation.
- L'automate de pilotage du noeud (niveau de supervision du noeud) et de communication avec le système de télégestion a été commandé à A. Pilet SA, qui est également chargé du nouveau système de supervision du réseau d'eau potable de la Ville de Pully. Cet automate est implanté dans l'armoire de commande du système lié à la turbine. Un rail DIN est installé dans l'armoire de commande, par le fabricant de cette armoire, afin d'accueillir l'automate du SGE, mais également un équipement de communication et son alimentation de secours, chargés de la transmission des données.

Il a été proposé à la Ville de Pully d'avoir une visualisation simple dans son système de télégestion, avec des informations considérées "minimales" pour la gestion du réseau. Des consignes simples peuvent également être transmises à l'automate de pilotage du noeud. Il est également proposé que, depuis le système de gestion, une interface soit intégrée pour l'accès à des informations plus détaillées de l'automate de pilotage, avec toutes les consignes (Figure 14).

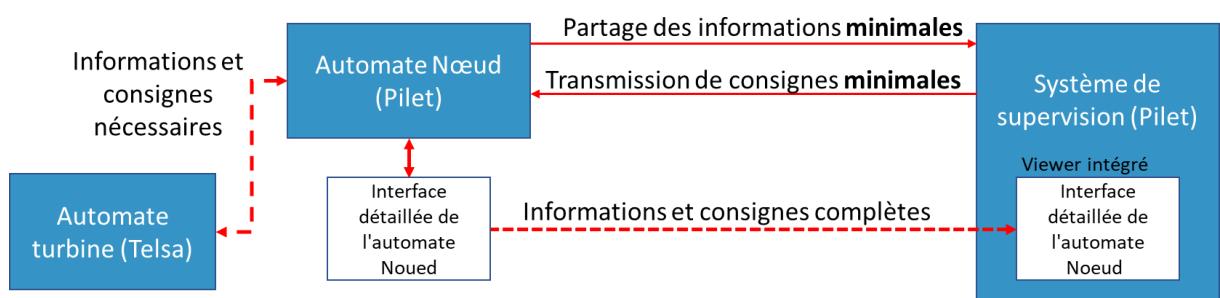


Figure 14 Principe de visualisation dans le système de gestion.

Pour l'installation de la turbine DuoTurbo dans la chambre des vannes de Verney, l'automate de pilotage de la turbine a été programmé spécifiquement pour le site. La base du pilotage est le programme de contrôle-commande, déjà existant, développé pour la DuoTurbo.

Les vannes de réduction de pression du site de Verney ainsi que la vanne d'alimentation du secteur installée dans la chambre Davel sont pilotées par les automates des nœuds programmés par Pilet SA.



Dans la première période de mise en service, la vanne de Davel sera cependant uniquement monitorée par l'automate du site afin de suivre son fonctionnement.

Consignes des vannes Cla-Val

Dans le modèle *Epanet* développé par G2C ingénierie pour le projet de sectorisation de la Ville de Pully, la consigne de la vanne de Davel était à la cote 446.6 msm (30 mCE de pression, niveau de la conduite 416.6 msm). Lors des mesures sur site (voir chapitre 4.4.3), il a été estimé que cette valeur correspond plutôt à 445.4 msm (33.3 mCE de pression, niveau de la conduite 412.1 msm).

Pour la vanne de la chambre Verney, la consigne était à la cote 445.9 msm dans le modèle *Epanet*, (40 mCE de pression, niveau de la conduite 405.9 msm). Lors des mesures sur site (voir chapitre 4.4.3), il a été déterminé que le niveau de la conduite de by-pass est plutôt de 402.1 msm).

Ces différences se justifient par la considération dans le modèle *Epanet* du niveau du terrain pour le réseau, en négligeant la profondeur des conduites.

Pour un démarrage de la DuoTurbo, la consigne de la vanne *Cla-Val* en ligne doit être d'environ 0.5 bar supérieure à celle de la vanne *Cla-Val* en bypass. Pour prioriser la chambre Verney par rapport à celle de Davel, il faut que les consignes de pression (en absolu) de Verney soient supérieures à celle de Davel :

- Vanne Davel : 445.4 msm (constante, car pas pilotée)
- Vanne Verney en bypass : $445.4 + 5 = 450.4$ msm
- Vanne Verney en ligne : $450.4 + 5 = 455.4$ msm

À l'inverse, pour que la chambre Davel soit priorisée (turbine à l'arrêt en sécurité), la différence de consignes doit être inversée :

- Vanne Davel : 445.4 msm (constante, car pas pilotée)
- Vanne Verney en bypass : $445.4 - 5 = 440.4$ msm
- Vanne Verney en ligne : $440.4 - 5 = 435.4$ msm

Pilotage du nœud et de la turbine

Pour définir la logique de commande de la turbine, la réflexion s'est initialement appuyée sur des modes de fonctionnement identifiés durant la phase de réflexion sur les fonctions à développer. Par la suite, le besoin de distinguer des modes sans et avec pilotage du nœud a été identifié. Le mode de turbinage sans pilotage du nœud, correspond à un mode « manuel » de démarrage de la séquence de turbinage de la turbine : une fois le mode actionné, la turbine peut fonctionner si les conditions physiques (débit minimum, absence d'alarmes) le permettent. Le mode avec pilotage, correspond au mode automatique souhaité, où des consignes qui concernent le réseau sont données : modification des consignes des vannes Clayton pour priorisation du nœud et programmation d'un mode de nuit.

Ainsi, l'automate de pilotage du nœud de Davel comprend 3 modes :

- 0 – Standby : la turbine est à l'arrêt ;
- 1 – Sans pilotage : la turbine peut démarrer si les conditions physiques de permettent ;
- 2 – Avec pilotage : la logique de pilotage du nœud est superposée aux conditions de démarrage de la turbine.



Mode 0 - Standby

Ce mode correspond à un arrêt. La turbine ne peut pas être démarrée et les consignes des vannes ClaVal restent à leur valeur standard. Le mode d'opération peut être changé en 0 (standby) à tout moment à travers l'interface de la télégestion ou à l'aide de l'écran tactile disponible sur le site. Tout changement de mode d'opération doit passer par ce mode 0 – Standby. Ce mode est aussi activé en cas de déclenchement d'alarme sur la turbine, sur les vannes Clayton de la chambre Verney ou sur l'un des automates.

Les alarmes principales de fonctionnement de la machine, développées dans des projets précédents de la DuoTurbo, ont été intégrées dans l'automate de la turbine. Dans le projet TUNE, les alarmes de communication avec l'automate de la turbine, avec la télégestion, avec les vannes Clayton et avec l'automate de la chambre de Davel² ont été incluses dans l'automate du nœud.

Mode 1 – Sans pilotage

Ce mode représente le fonctionnement classique de la turbine DuoTurbo. Une fois actionné, il est assuré que la consigne de la vanne Cla-Val en bypass est à la valeur standard du site et que la consigne de la vanne en ligne avec la turbine est supérieure de 0.5 bar à celle de bypass. Si le débit est suffisant, la turbine démarre et opère pour optimiser l'énergie produite.

Ce mode reste actif tant que :

- aucune alarme n'est présente;
- aucune défaillance ou perte du réseau électrique n'est détectée;
- pas de demande d'arrêt par un opérateur.

Si une seule des conditions programmées pour rester en mode turbinage, n'est plus remplie, l'automate revient au mode 0-Standy. Ainsi, la turbine ne peut être mise en route que si le mode est réactivé.

Mode 2 – Avec pilotage

L'objectif de la programmation de ce mode de fonctionnement est la priorisation des nœuds de Verney ou de Davel selon la période de consommation. Puisque la turbine a un débit minimal pour laquelle elle peut produire de l'énergie, le nœud doit pouvoir fonctionner et être mis en priorité dès que ce débit est dépassé. Si le débit est inférieur à ce seuil minimal au niveau de Verney, il y a un intérêt à ce que l'alimentation en eau du secteur desservi se fasse plutôt par Davel, pour dynamiser la distribution et préserver la qualité de l'eau.

Pour assurer des périodes suffisamment longues de priorisation de Davel et ainsi éviter des zones du réseau de stagnation d'eau, il a été proposé de forcer une période nocturne où le nœud Verney n'est pas priorisé et la turbine reste à l'arrêt.

Ainsi, une fois l'heure dans l'intervalle considéré journalier, les actions suivantes sont réalisées :

- Modification des consignes des Clayton de Verney à :
 - en ligne: +1 bar par rapport à la chambre Davel,
 - en bypass: +0.5 bar par rapport à la chambre Davel;

Lancement de la procédure de mise en marche de la turbine.

En cas d'arrêt de la turbine suite à une alarme ou un horaire nocturne, l'action suivante est réalisée :

- Modification des consignes des Clayton de Verney à :
 - en ligne: -1 bar par rapport à la chambre Davel,
 - en bypass: - 0.5 bar par rapport à la chambre Davel.

²La chambre Davel a été équipée avec des capteurs de pression et débit pour le suivi. Néanmoins, les alarmes en relation avec Davel (y compris communication) envoient uniquement un message et n'envoient pas le système vers le mode standby.



Si l'arrêt est induit par une alarme, l'automate revient au mode 0-Standy. Sinon, l'automate revient à la position d'attente d'un intervalle journalier. Si les conditions le permettent, la turbine est redémarrée automatiquement.

Diagramme de flux

Un algorithme pour la programmation de l'automate de pilotage de la chambre de Verney a été esquissé selon la logique d'automation décrite. Le diagramme de flux de fonctionnement est fourni en Annexe B.

Communication avec le système de gestion

Selon le principe de partage d'informations et de consignes proposé sur la Figure 14, les échanges sont séparés en deux niveaux :

- Minimum : nécessaire pour l'exploitation, pour les statistiques et les tableaux de bord ;
- Utile : détail du fonctionnement et des alarmes.

Les informations et consignes proposées pour chaque niveau sont les suivantes :

- Minimum :
 - Demande d'arrêt (dans une phase ultérieure, demande de coupure d'urgence) ;
 - Affichage d'état : en service, à l'arrêt, en séquence d'arrêt, en séquence de démarrage ;
 - Alarmes agrégées (exemple : défaut turbine), quittance si possible ;
 - Informations : pressions amont et aval, puissances électrique et hydraulique, débit mesuré (Q), pression de consigne, etc. ;
 - La possibilité de planifier un horaire fixe d'arrêt de nuit.
- Utile :
 - Affichage de l'état des deux brise-charges (fermée, consigne) ;
 - Le paramétrage des consignes des brise-charges (consignes protégées par clé Admin) ;
 - Alarmes détaillées ou défauts internes (exemple : défaut vibration turbine, etc.) pour l'ensemble du système (turbine, deux vannes Clayton, vanne de garde) ;
 - Affichage de l'état de la vanne de garde (ouverte, fermée) ;
 - Toutes les informations et consignes "minimum" ;
 - Historique des mesures, alarmes et opérations réalisées ;
 - Historique de fonctionnement et de la production d'énergie du système.

Ainsi, le système de gestion reproduit un schéma simplifié de la turbine, sur la base de la Figure 15. Les informations type « minimum » remontées par la commande locale de la turbine sont visibles sur ou à côté de ce schéma.

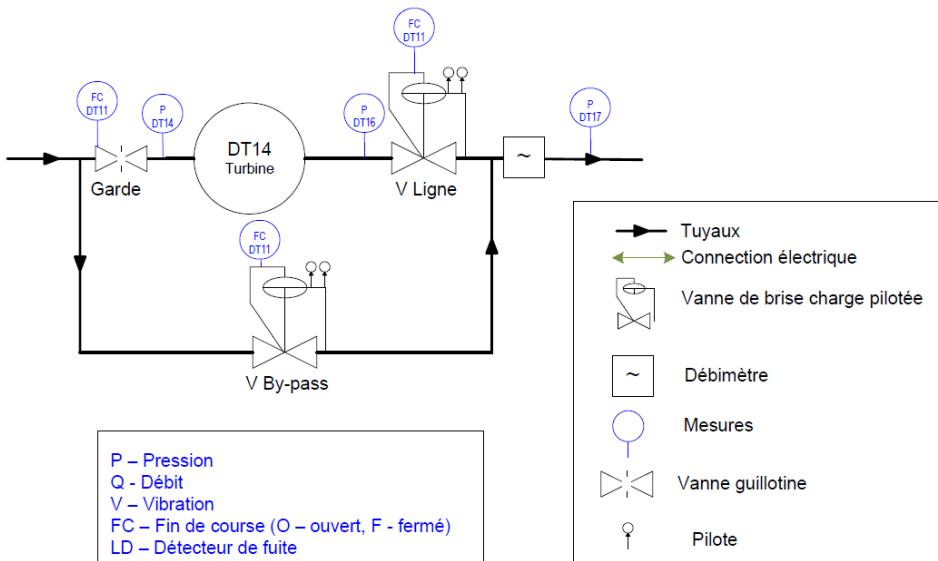


Figure 15 : Interface IHM basée sur le schéma simplifié du système de turbinage de Verney à Pully.

En plus des données échangées directement entre le système de commande local de la turbine et le système de gestion des eaux de la commune, l'interface IHM du système de gestion supérieur met à disposition un lien pour ouvrir en "pop-up" à distance l'interface IHM locale de la turbine (interface web de la commande locale) et s'y connecter, permettant aux utilisateurs d'accéder aux informations complètes, niveau « utile ».

Deux types d'utilisateurs peuvent se connecter à la commande locale, avec des droits différents sur la visualisation et l'édition des paramètres locaux du système :

- utilisateur "Expert" : c'est l'utilisateur par défaut du système de gestion supérieur. Il permet une visualisation complète des données et la modification de valeurs de consignes, dans la limite des plages définies par l'utilisateur "Administrateur" ;
- utilisateur "Administrateur" : en plus de l'utilisateur Expert, modification de tous les paramètres du système, des valeurs seuils de débits et paramètres liés à la sécurité du système turbine (débits min et max, conditions de d'alarme et d'arrêt d'urgence, etc.).



4.2.4 T2.4 Fonctionnement théorique du réseau

Un modèle du réseau d'eau potable de Pully a été réalisé dans le logiciel Hammer, de la suite WaterGEMS de Bentley, sur la base du modèle Epanet développé par G2C ingénierie pour le projet de sectorisation de la Ville de Pully. Il s'agit d'un modèle du réseau complet de la commune (Figure 16).

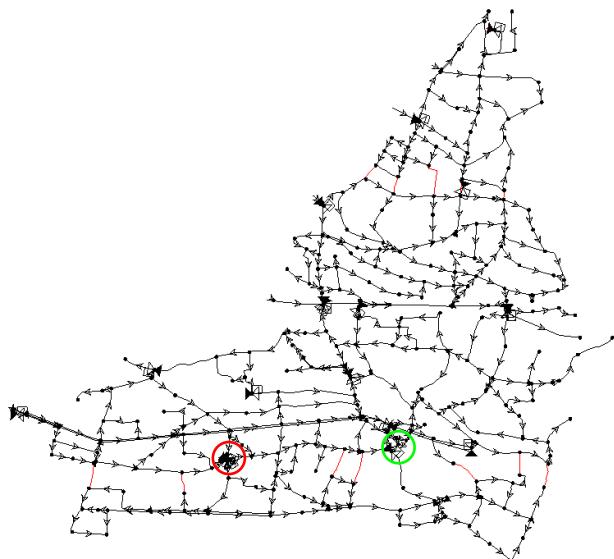


Figure 16 : Image du modèle du réseau de la Ville de Pully sur le logiciel Hammer (les lignes rouges représentent des conduites fermées). La chambre Verney est indiquée par le cercle rouge et la chambre Davel par le cercle vert.

Les simulations numériques prévues dans le cadre du projet sont les suivantes :

- Emballement – L'emballement sans fermeture de vannes (conception théorique) ;
- Arrêt :
 - Arrêt normal de la turbine – Fermeture de l'électrovanne de coupure
 - Arrêt de l'électrovanne de coupure suite à une coupure du réseau – Fermeture suite à l'emballement de la turbine
 - Coupure du réseau et faille de l'électrovanne de coupure – Fermeture avec la vanne motorisée ;
- Fermeture d'un hydrant.

Les scénarios de démarrage de la turbine n'ont pas été développés car les transitoires attendus sont moins contraignants que les scénarios d'arrêt. Les modélisations sur le modèle se concentrent sur le réseau de Montétan. Les consignes du projet de sectorisation sont admises pour tous les brises charges en amont. Pour Verney et Davel, les consignes pour le fonctionnement avec priorisation de Verney sont considérées. Deux cas de charge du point de vue de la consommation ont été considérés pour les simulations : une consommation élevée et la consommation équivalente au débit maximal turbinable, voir Tableau 5.

Tableau 5 : Débits initiaux pour les deux cas de charge des scénarios d'arrêt

| Cas 1 : Consommation élevée | Cas 2 : Maximum turbinable |
|-------------------------------------|----------------------------------|
| Turbine : 8 l/s (chute de 3 bar) | Turbine : 8 l/s (chute de 3 bar) |
| By-pass: 14 l/s (chute de 2.75 bar) | By-pass: 0 l/s |
| Davel: 0 l/s | Davel: 0 l/s |



Modélisation des vannes Cla-Val

Les vannes Cla-Val ont un rôle important pendant les régimes transitoires car elles réagissent aux changements selon l'écart à la consigne. Pour modéliser correctement ces vannes, les deux de la chambre de Verney et celle de la chambre de Davel, le modèle prend deux éléments en compte :

- Le coefficient d'écoulement en fonction de l'ouverture de la vanne : voir chapitre 4.3.3 (T3.3. Mesures transitoires, Caractérisation des réducteurs de pression) ;
- Les taux d'ouverture et de fermeture de la vanne.

Les taux d'ouverture et fermeture sont exprimés dans le modèle numérique en taux de % d'ouverture par seconde par écart en m de colonne d'eau par rapport à la consigne.

Pour confirmer ces paramètres, les mesures transitoires réalisées en 2017 dans le laboratoire de la HES-SO dans le cadre du projet DuoTurbo ont été utilisées. Dans cette étude, la réaction d'un réducteur de pression Cla-Val à des sauts de pression a été mesurée.

Modélisation de l'emballage (conception théorique)

L'objectif de cette modélisation est de vérifier que le modèle reproduit le comportement à l'emballage de la turbine. Ceci est une conception théorique, car en réalité la branche turbine serait arrêtée, avec la fermeture de l'électrovanne de coupure.

L'emballage de la turbine a été modélisé comme une diminution brusque de la perte de charge induite. Pour ceci, la turbine est initialement représentée uniquement par un coefficient de perte de charge qui amène à la chute de la DuoTurbo pour le débit de simulation. Au moment de la perte du réseau électrique, une vanne dans un by-pass fictif s'ouvre, voir Figure 17. La modélisation de l'emballage est réalisée avec un coefficient de perte de charge tel que la perte de charge globale correspond à la valeur de la courbe d'emballage de la Duo profil Savièse.

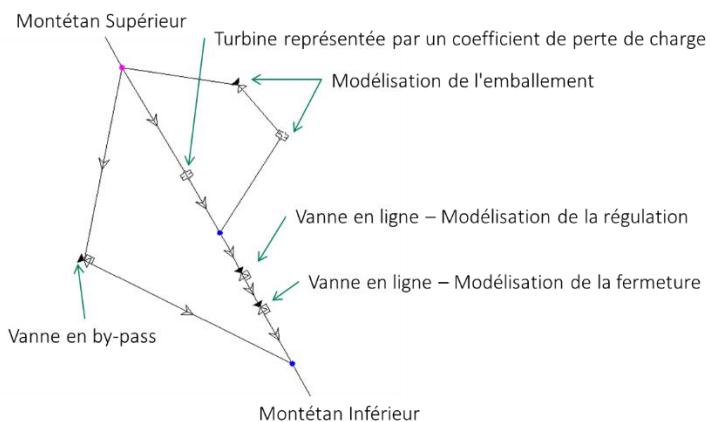


Figure 17 : Schéma de modélisation de l'emballage.

À l'état initial, les consignes des vannes du secteur de Montétan inférieur sont les suivantes :

- Davel : 445.4 msm
- Verney by-pass : 450.4 msm
- Verney en ligne : 455.4 msm



Du point de vue de la consommation, les cas de charges tel que présenté dans le Tableau 5 sont considérés.

Pour le débit maximum turbinable à Pully de 8 l/s, l'emballlement de la turbine DuoTurbo amènera de 30 m de chute initiale à 19 m de perte de charge. La vanne à l'aval devra ainsi réagir à une surpression rapide de 11 m. La vitesse d'emballlement, représentée dans le modèle par l'ouverture de la vanne fictive, a été fixée à ce stade à 2 s. Ceci correspond à la modélisation type cas de charge 2. Pour le type cas de charge 1, il est assumé que la réaction de la turbine (la perte de charge générée) est équivalente. Cependant, le by-pass est actif et une redistribution différente du débit aura lieu.

La Figure 18 présente une visualisation des enveloppes maximales de pression autour de la chambre Verney, pour les deux cas de charge. Le cas de charge le plus contraignant est celui à débit maximale turbinable, quand le by-pass est sur la limite de s'ouvrir (cas 2).

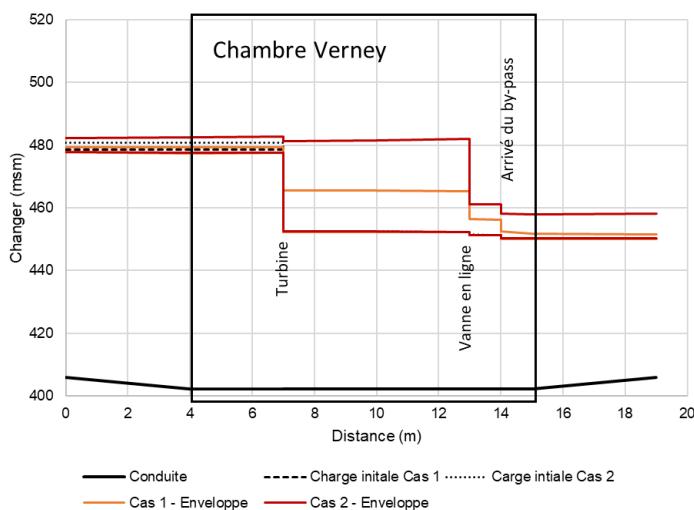


Figure 18 : Résultats du scénario Emballement théorique : Enveloppes de pression.

Les enveloppes de pression sont de faible amplitude en l'amont, le maximum étant de 1.6 m de plus que la pression de service pour le cas de charge 2. Vers l'aval, les enveloppes sont plus importantes, le maximum étant de l'ordre de 0.7 bar de plus que la pression de service, pour le même cas plus contraignant. Cette valeur est induite par la première décharge de pression vers l'aval, retenue par la régulation de la vanne Cla-Val en ligne.

Les figures à l'annexe A-1 présentent les charges hydrauliques et les débits en amont et en aval de la chambre Verney le long des simulations réalisées.

Pour le cas 2, le débit à l'aval de la chambre Verney est nettement réduit une fois la vague de surpression passée suite à l'emballlement. Il y a ainsi une nette prise en charge par la chambre Davel à ce moment, ce qui est visible sur la Figure 19.

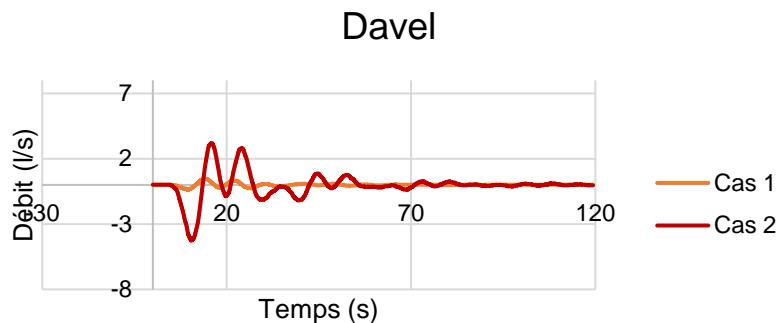


Figure 19 : Résultats du scénario Emballement théorique : Débit hydraulique immédiatement aval la chambre Davel.

Arrêt normal de la turbine – Fermeture de l'électrovanne de coupure

Le premier scénario d'arrêt simulé est la fermeture de l'électrovanne d'arrêt de la turbine. L'objectif de la simulation est de vérifier l'impact de la vitesse de fermeture normale de la vanne en ligne de la turbine. Ceci est une manœuvre qui arrivera très fréquemment et ainsi nous devons nous assurer que des transitoires dangereux ne sont pas générés.

Des fermetures en **2s, 5s, 10s et 20s** du brise-charge en ligne ont été modélisés.

À l'état initial, les consignes des vannes du secteur de Montétan inférieur sont les suivantes :

- Davel : 445.4 msm
- Verney by-pass : 450.4 msm
- Verney en ligne : 455.4 msm

La Figure 20 présente une visualisation des enveloppes maximales de pression autour de la chambre Verney, pour les deux cas de charge et pour les trois vitesses de fermeture. Le cas de charge le plus contraignant est celui à débit maximal turbinable, quand le by-pass est sur la limite de s'ouvrir (cas 2). Naturellement, plus la vanne se ferme rapidement, plus les phénomènes transitoires seront importants.

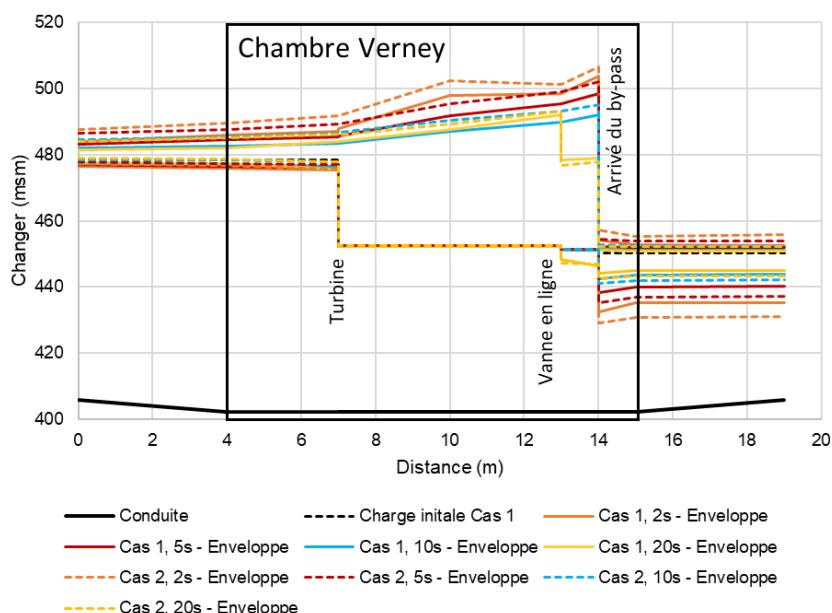


Figure 20 : Résultats du scénario Arrêt normal de la turbine : Cas 1 - Enveloppes de pression.



Les enveloppes de pression sont faibles vers l'amont, le maximum étant de moins de 0.7 bar de plus que la pression de service pour la fermeture la plus rapide et pour le cas de charge 2. Vers l'aval, les enveloppes sont plus conséquentes, le minimum étant de l'ordre de -1.9 bar que la pression de service pour le même cas plus contraignant.

La vitesse de fermeture de la vanne joue un rôle non négligeable, surtout pour les sous-pressions. Pour le cas de charge 2, une fermeture en 5s résulte en une vague de sous-pression vers l'aval de -1.3 bar que la pression de service et pour 10s et 20s elle se réduit encore à -0.8 bar et -0.7 bar respectivement.

Les figures dans l'annexe A-2 présentent les charges hydrauliques et les débits en amont et en aval de la chambre Verney le long des simulations réalisées.

Pour évaluer l'impact de l'onde de sous-pression vers l'aval de Verney, nous pouvons observer, dans la simulation, les pressions minimales aux nœuds de Montétan Inférieur. La Figure 21 présente en haut une image de l'état initial, où les charges hydrauliques étaient entre 449 m.s.m. et 451 m.s.m. Après la fermeture normale en 5 s, nous vérifions une descente de l'ordre de 10 m aux deux nœuds plus proches de Verney. Au fur et à mesure que nous éloignons de Verney, la différence entre la charge initiale et la charge minimale diminue, en particulier vers l'Est qui est plus influencé par Davel.

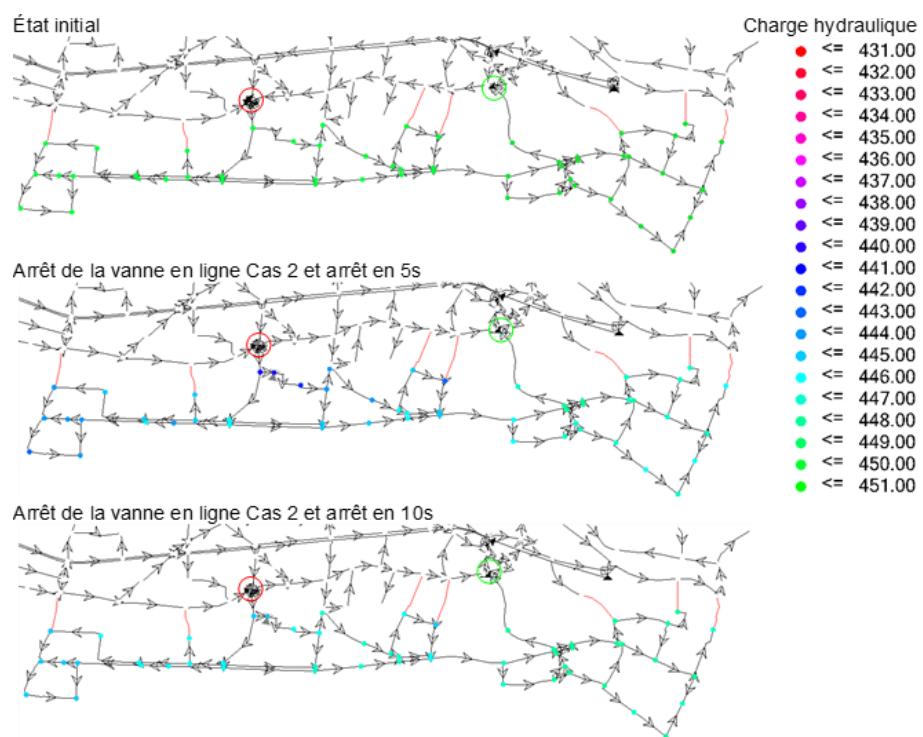


Figure 21 : Résultats du scénario Arrêt de la vanne en ligne Cas 2: Haut : charge initiale ; Milieu : Niveaux de charges minimaux pendant le transitoire fermeture en 5s; Bas: Niveaux de charges minimaux pendant le transitoire fermeture en 10s (les lignes rouges représentent des conduites fermées). La chambre Verney est indiquée par le cercle rouge et la chambre Davel par le cercle vert.

Par la suite, nous assumerons qu'un arrêt normal de la vanne en ligne est de l'ordre de 10 à 20s. Un arrêt d'urgence ne devra pas être plus rapide que 5s.



Arrêt de l'électrovanne de coupure suite à une coupure du réseau

Comme spécifié pour le cas de l'emballement théorique, suite à une coupure du réseau, la turbine sera mise en arrêt. L'électrovanne en aval sera ainsi fermée en urgence. Des fermetures en ligne de 5s ou 10s ont été simulées. Il est aussi admis un intervalle de temps de 5s entre la détection de la coupure de courant et l'action sur la vanne.

Les mêmes cas de charges que pour l'arrêt normal et pour l'emballement ont été considérés. La Figure 22 présente une visualisation des enveloppes maximales de pression autour de la chambre Verney, pour les deux cas de charge et pour les deux vitesses de fermeture.

Le cas à débit maximal turbinable (cas 2) génère des surpressions et des sous-pressions significatives à l'intérieur de la chambre. Comme attendu, plus la fermeture de la vanne est rapide, plus les phénomènes transitoires sont importants, mais la différence est très légère. Une pression négative de -0.5 bar est atteinte pour la fermeture en 5 s et de -0.1 bar pour la fermeture en 10 s.

Le pic à lieu plus de 20 secondes après la perte de réseau, au moment de la fermeture totale de la vanne. Le by-pass s'ouvre également à ce moment.

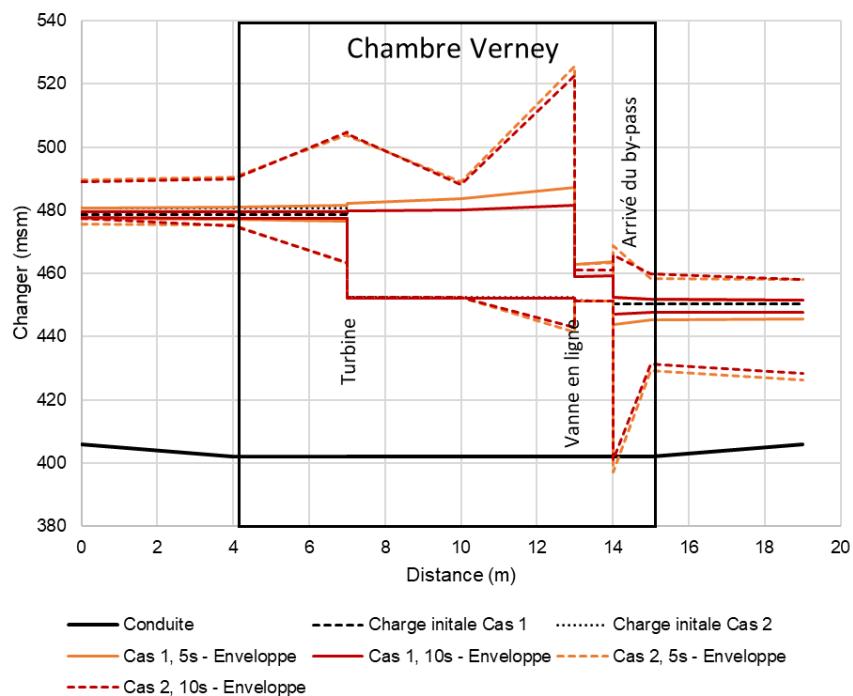


Figure 22 : Résultats du scénario Arrêt de l'électrovanne de coupure suite à une coupure du réseau : Enveloppes de pression.

Les enveloppes de surpression sont plus grandes avec l'emballement, en comparaison avec les simulations de l'arrêt normal pour les mêmes vitesses de fermeture. Vu que la surpression en cas d'emballement vers l'extérieur de la chambre reste limitée, il est recommandé de fermer l'électrovanne aval en plus que 10s pour éviter des pressions négatives.

Les figures à l'Annexe A-3 présentent les charges hydrauliques et les débits en amont et en aval de la chambre Verney le long des simulations réalisées.



Coupure du réseau et faille de l'électrovanne de coupure

Si l'électrovanne de coupure est chômée pendant en arrêt et ne répond pas à la consigne de fermeture, c'est la vanne motorisée en aval qui mettra la chambre en sécurité. Cette vanne a cependant une fermeture beaucoup plus lente, de l'ordre de 20 min. Avec un temps de fermeture aussi grand, les transitoires générés par la vanne seront peu conséquents. En cas de coupure du réseau et un emballement de la turbine, les transitoires les plus contraignants seront équivalents à ceux présentés pour l'emballement seul.

Arrêt de la turbine – Impact sur le réseau

Les scénarios d'arrêt de la turbine par fermeture de l'électrovanne de coupure montrent que l'impact des manœuvres vers l'extérieur de la chambre Verney est limité. Pour le réseau en amont, l'emballement génère les charges plus élevées vers l'amont, mais cet effet est très peu significatif – Tableau 6.

Tableau 6 : Résultats des scénarios de fermeture de l'électrovanne de coupure : Enveloppes de pression immédiatement amont la chambre Verney

| Sans emballement | | | | | | |
|------------------|-----------------|----------------------|----------------------|-----------------|----------------------|----------------------|
| | Cas 1 | | | Cas 2 | | |
| | Charge initiale | Charge max | Charge min | Charge initiale | Charge max | Charge min |
| 5s | 478.62 | 483.22 (+0.5 bar) | 476.88 (-0.2 bar) | 480.70 | 486.33 (+0.5 bar) | 477.89 (-0.3 bar) |
| 10s | 478.62 | 481.91 (+0.3 bar) | 477.30 (-0.1 bar) | 480.70 | 484.61 (+0.3 bar) | 478.46 (-0.2 bar) |
| Avec emballement | | | | | | |
| 5s | 478.62 | 480.74 (+0.2 bar) | 477.45 (-0.1 bar) | 480.70 | 489.54 (+0.9 bar) | 475.69 (-0.5 bar) |
| 10s | 478.62 | 479.36 (+0.1 bar) | 477.73 (-0.1 bar) | 480.70 | 488.94 (+0.8 bar) | 477.45 (-0.3 bar) |

Pour le réseau en aval, l'emballement généré n'influence pas non plus significativement les enveloppes de pression – Tableau 7. Il est aussi vérifié que la différence entre la fermeture du brise-charge en 5s ou en 10s est négligeable et la fermeture plus lente peut même être péjorant.

Tableau 7 : Résultats du scénario Fermeture d'urgence de l'électrovanne : Enveloppes de pression immédiatement aval la chambre Verney.

| Sans emballement | | | | | | |
|------------------|-----------------|----------------------|----------------------|-----------------|----------------------|----------------------|
| | Cas 1 | | | Cas 2 | | |
| | Charge initiale | Charge max | Charge min | Charge initiale | Charge max | Charge min |
| 5s | 450.24 | 451.85 (+0.1 bar) | 440.25 (-1 bar) | 450.38 | 453.94 (+0.4 bar) | 437.29 (-1.3 bar) |
| 10s | 450.24 | 451.12 (+0.1 bar) | 443.86 (-0.6 bar) | 450.38 | 452.57 (+0.2 bar) | 442.3 (-0.8 bar) |
| Avec emballement | | | | | | |
| 5s | 450.24 | 451.57 (+0.1 bar) | 445.53 (-0.5 bar) | 450.38 | 458.11 (+0.8 bar) | 426.36 (-2.4 bar) |
| 10s | 450.24 | 451.57 (+0.1 bar) | 447.74 (-0.2 bar) | 450.38 | 458.11 (+0.8 bar) | 428.33 (-2.2 bar) |



Fermeture d'un hydrant

Le cas de la fermeture d'une borne hydrante est une vérification de sécurité pour la turbine. L'objectif est de vérifier si une fermeture violente d'un hydrant suite à un débit important d'incendie engendre des surpressions au-delà de ce que la DuoTurbo supporte actuellement.

L'hydrant le plus proche de la chambre Verney est environ 90 m vers l'aval, sur le chemin des Vosges, après un branchement de la conduite qui descend le chemin de Verney.

Il est considéré le scénario, plutôt pessimiste, suivant :

- Un débit incendie de 60 m³/h.
- Une fermeture brusque du poteau incendie en 2s.
- Une situation d'incendie pendant une consommation importante (équivalente au cas de charge 1 du Tableau 5)

La Figure 24 présente une visualisation des enveloppes maximales de pression autour de la chambre Verney, pour les deux cas de charge. La Figure 24 présente les charges hydrauliques amont et aval la chambre, ainsi que sur la turbine. La Figure 25 présente pour les mêmes points de calcul les débits.

La fermeture de l'hydrant se traduit par un à-coup de surpression qui atteint la chambre avec une pression de 3.6 bar supérieure à la pression normale. Cette surpression implique une pression totale de 8 bars sur la conduite. La fermeture des brise-charges, pour contrôler la pression, n'arrive pas à limiter le passage de cette pression vers l'amont et la pression sur la turbine est du même ordre de grandeur.

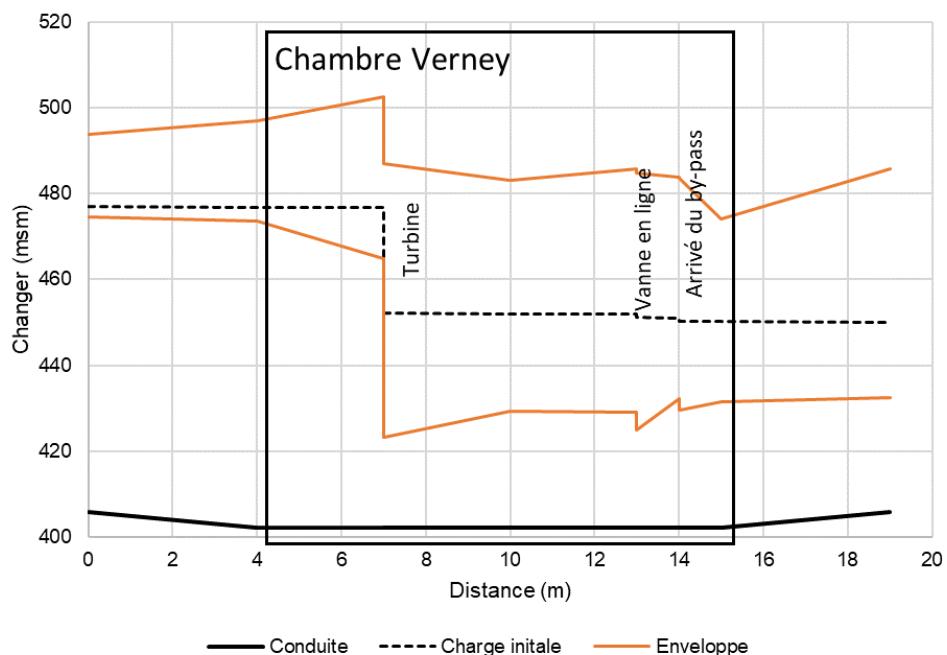


Figure 23 : Résultats du scénario Fermeture d'un hydrant : Enveloppes de pression.

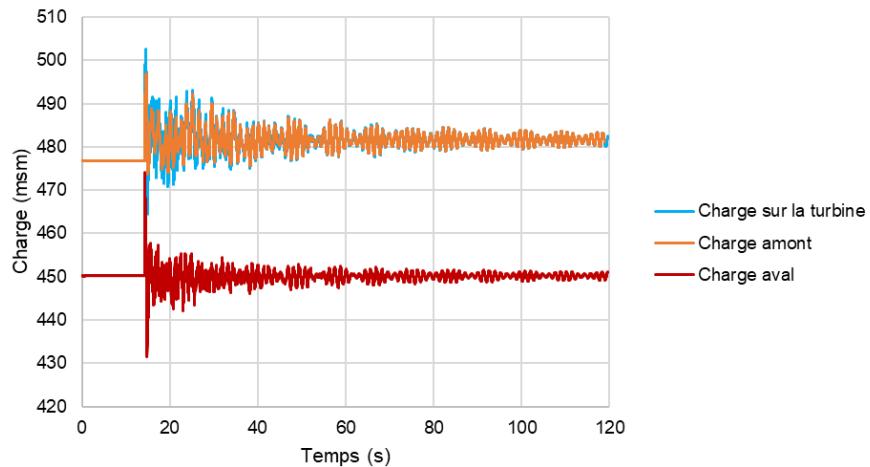


Figure 24 : Résultats du scénario Fermeture d'un hydrant : Charges hydrauliques dans la chambre Verney.

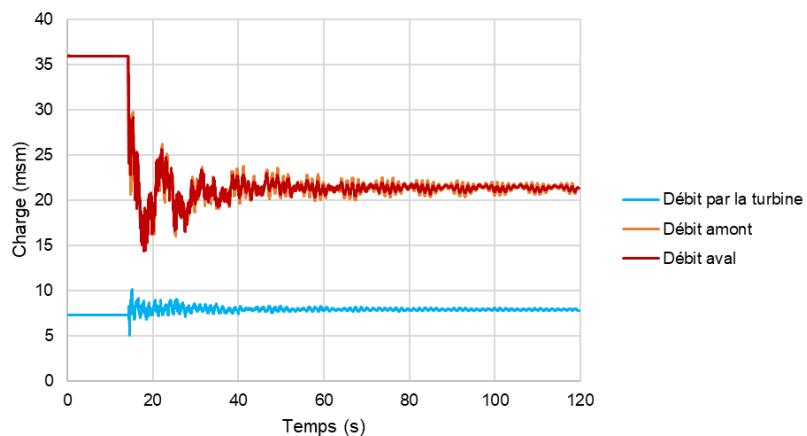


Figure 25 : Résultats du scénario Fermeture d'un hydrant : Débits dans la chambre Verney.

Conclusions

Les simulations développées dans cette première phase de modélisation ont permis d'explorer l'influence de différents éléments de régulation sur les enveloppes de pression. Il ressort que le cas de consommation 2, avec la branche de la turbine avec son débit maximal mais avec le by-pass à la limite d'ouverture, est plus contraignant qu'un cas avec des grandes demandes où le by-pass est déjà actif. La fermeture de l'électrovanne de coupure doit être suffisamment rapide pour éviter des transitoires vers l'extérieur de la chambre en cas de disfonctionnement de la turbine. Il est recommandé des fermetures de plus de 10s pour éviter des sous-pressions à l'intérieur de la chambre.

4.2.5 T2.5 Fabrication

Afin de lancer la fabrication d'une turbine DuoTurbo avec son armoire de pilotage, un cahier de charges a été rédigé et transmis à Telsa SA et Jacquier & Luisier SA pour la fourniture, l'installation et la mise en service dans la chambre de Verney. Un deuxième cahier de charges a été rédigé et transmis à Pilet SA pour le pilotage de l'installation depuis la supervision de la Ville de Pully.



Le périmètre hydraulique a été défini de la manière suivante (voir la Figure 26) :

- La turbine Duo Turbo équipée de génératrices bobinées sur la moitié de la circonférence, a été livrée par Jacquier&Luisier, avec les raccords d'entrée et de sortie, munis de collecteurs de pression sur les brides pour la mesure de pression ;
- Les réducteurs de pression munis de pilotes motorisés ont été fournis par ClaVal ;
- Les autres des composants du circuit hydraulique du site ont été fournis par Hawle sous mandat avec la Ville de Pully, dans le cadre de l'équipement général de la chambre, y compris la vanne motorisée amont et le manchon de montage/démontage avec compensation axiale de la branche turbine.

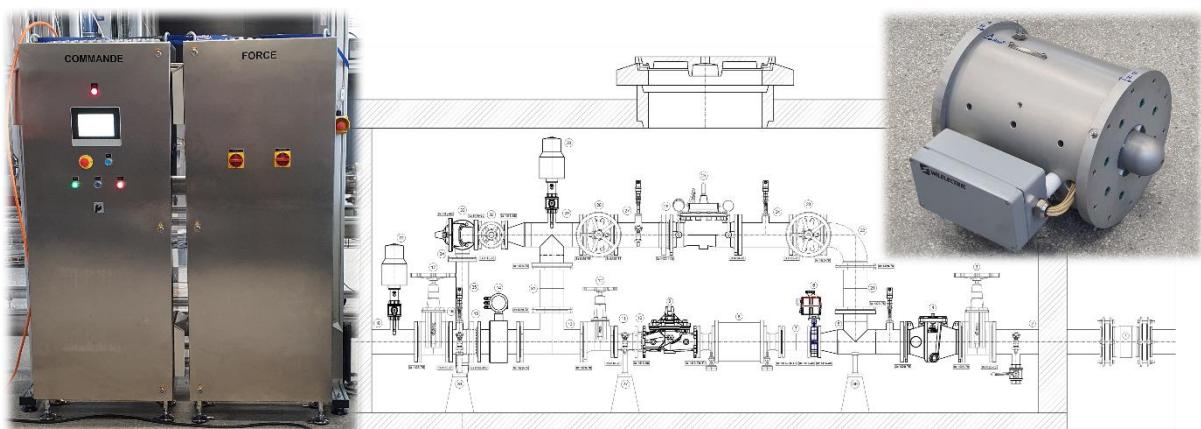


Figure 26 : Schématisation des équipements installés dans la chambre (fourni par Hawle) ; corps de la turbine DuoTurbo fabriquée par Jacquier&Luisier et armoires électriques de puissance et de commande fournies par Telsa.

Le périmètre électrique a été défini quant à lui de la manière suivante :

- L'armoire de puissance, contenant principalement les convertisseurs de fréquence avec leurs accessoires habituels nécessaires à l'injection de l'énergie produite dans le réseau, a été fournie par Telsa.
- L'armoire de commande, contenant l'ensemble des éléments de contrôle-commande pour le pilotage de la turbine (automate, modules de communication, modules de mesure, batterie de secours, etc.), a été mise à disposition par Telsa, tandis que l'ensemble des éléments de contrôle-commande de la chambre et la communication avec la télégestion de la Ville de Pully ont été fournis par Pilet SA.
- L'installation électrique des armoires et des éléments de contrôle-commande (électrovannes, capteurs, etc.) a été réalisée par l'entreprise Bonnet électricité SA, sous le mandat de la Ville de Pully.



4.3 WP3 Essais en laboratoire

Responsable : HES-SO Valais-Wallis, Partenaires : HES-SO Valais-Wallis, BG, Cla-Val,



Figure 27 : Dispositif de test en laboratoire avec la turbine, ses génératrices, son armoire de commande, et les deux vannes de régulation installées sur le banc d'essai de la HES-SO Valais.

4.3.1 T3.0 Dispositif de test et instrumentation expérimentale

Banc de test



Figure 28: Banc d'essai « DN100 » de la HES-SO Valais avec ses caractéristiques principales.

Les essais en laboratoire ont été effectués sur le banc d'essai DN100 développé par la HES-SO Valais et installé dans le Laboratoire d'hydraulique d'Energypolis à Sion. Le banc d'essai hydraulique employé



est représenté (en gris) sur la Figure 28. La Figure 27 montre le montage de la turbine en mode « parallèle », identique à l'installation réalisée sur le site de Verney à Pully.

Turbine

Dans un premier temps, des essais ont été réalisés sur la version de la turbine de laboratoire « DuoTurbo V0p6 ». Le design hydraulique des roues de cette version est similaire à celui prévu pour le site de Verney. Les génératrices sont dans leur version compacte à 360° et les rotors sont aimantés avec une géométrie modifiée. Les arbres, paliers et garnitures mécaniques sont identiques au prototype final.

Dans un second temps, une fois la fabrication de la turbine terminée, le prototype de Verney, équipé avec des roues avec le profil hydraulique « Savièse » et des génératrices bobinées sur la moitié de la circonférence (identique avec celles installées sur les sites précédents) a été monté sur le banc d'essai et testé avec à la fois une armoire de puissance dédiée du laboratoire et avec celles du site.

Réducteurs

Les réducteurs de pression du type « PCM 43E/D-51/KX », fournis par Cla-Val, employés présentent les caractéristiques suivantes :

- Réducteur de by-pass DN100 avec consigne de pression aval standard.
- Vis de réglage mécanique manuel de position de la membrane du réducteur.
- Réducteur aval DN100 de la branche turbine, équipé d'un pilote motorisé et d'une électrovanne de coupure.
- Le pilote motorisé peut être configuré pour travailler en régulation de la pression différentielle, de la pression amont, de la pression aval ou du débit.

Instrumentation

Les valeurs suivantes ont été mesurées :

- Pression statique en amont et en aval de la turbine ainsi qu'en certains points intermédiaires (capteurs de pression absolue) ;
- Débit total (débitmètre électromagnétique) et débit de bypass (débitmètre à vortex) ;
- Vitesse de rotation des roues et puissance électrique des génératrices (multimètre de précision) ;
- Vibration de la machine (capteur de vibrations) ;
- Diverses valeurs de régulation du banc d'essai.

Deux méthodes d'acquisition des signaux sont possibles : « classique » donc en point par point pour les régimes stationnaires et « dynamique » pour les régimes transitoires.

Possibilités de réglage

Le banc de test et les composants du système de test spécifiques à la turbine peuvent être réglés des deux manières suivantes :

- Circuit hydraulique
 - Variation point par point ou transitoire du débit et/ou de la chute de pression de la turbine à l'aide des pompes à vitesse variable ;
 - Variation de la pression statique globale dans le circuit à l'aide du réservoir pressurisable aval (permettant d'influencer principalement le niveau de cavitation de la machine) ;
 - Variation de la pression de sortie des réducteurs à l'aide d'une vanne manuelle.



- Composants du système
 - Variation de l'ouverture des réducteurs à l'aide de la vis de réglage et du pilote motorisé ;
 - Variation des temps de fermeture et d'ouverture des réducteurs ;
 - Fermeture du réducteur de la turbine à l'aide de l'électrovanne de coupure et basculement du débit entre les branches ;
 - Pilotage de la DuoTurbo en vitesse de rotation avec gestion des rampes d'accélération/de décélération.

4.3.2 T3.1 Plan d'expérience

Un plan complet des essais en laboratoire a été élaboré dans le but de tester la performance de la machine, de valider le fonctionnement du système machine-armoire de commande, et de tester des cas spécifiques à ce projet.

En raison du retard de fabrication et de livraison de la turbine de Pully, une partie des tests ont été effectués dans un premier temps avec la machine du laboratoire de la HES-SO VS de Sion (prototype « DuoTurbo V0p6 »). Dans un deuxième temps, les essais de performance ont été répétés avec la machine finale, car les caractéristiques hydromécaniques ne sont pas toutes identiques entre les machines. De plus, plusieurs essais du système global (armoires du site, turbine et deux réducteurs de pression) ont été menés afin de valider le fonctionnement des nouvelles armoires de commande et de l'automate de la turbine dans un milieu contrôlé, avant de les installer sur le site.

Le Tableau 8 résume les principaux tests effectués en laboratoire dans le cadre du projet Tune.

Tests de caractérisation de la turbine

Ces tests ont été effectués en régime stationnaire, donc en imposant la chute et la vitesse de rotation des roues. Le but est de connaître les performances de rendement et de puissance de la machine, mais aussi de vérifier le développement de la cavitation et le niveau de vibration pour différents points de fonctionnement. Ces deux derniers facteurs sont importants car ils permettent de déterminer le seuil de cavitation de la machine et les régimes de résonnance mécanique, limitantes pour la plage de fonctionnement de la turbine.

Tests de caractérisation des réducteurs

Ces tests, corroborés avec des mesures effectuées auparavant, ont permis de confirmer, comprendre et maîtriser la caractéristique hydraulique des réducteurs de pression sur toute la plage d'ouverture possible. De plus, quelques tests transitoires ont été menés en variant les temps d'ouverture/fermeture du réducteur, importants pour le comportement dynamique du système de turbinage dans le réseau d'alimentation de la ville. Des inputs ont été fournis pour l'étude numérique effectuée dans la tâche 2.4 du projet.

Tests de validation du fonctionnement du système complet

Des essais de validation du fonctionnement correct du système global de turbinage ont été menés sur le banc d'essai en laboratoire avec l'ensemble des armoires ainsi que la turbine qui sera installée sur site. Ceux-ci ont permis d'implémenter et de tester le programme complet de pilotage de la turbine dans un milieu contrôlé avant le déploiement sur le site. De plus, la majorité des alarmes implémentées pour garantir la sécurité de l'installation et du réseau a pu être testée en simulant/provoquant divers incidents. La régulation de la vitesse de rotation des roues pour assurer une production maximale sur toute la plage de débit prévue sur site, les démarriages et les arrêts en régime normale et d'urgence ainsi que le comportement de l'ensemble des éléments lors d'un basculement du débit entre les branches ont aussi été testés. Enfin, le fonctionnement du système en cas d'un débit inférieur au débit minimum ou supérieur au débit maximum turbinable, ainsi que pendant les changements rapides du débit a été également validé.



Tableau 8: Plan d'expérience des tests effectués en laboratoire.

| Tests effectués | Prototype DuoTurbo utilisé | |
|---|----------------------------|---------------------|
| | Laboratoire v0p6 | Prototype de Verney |
| Caractérisation de la turbine <ul style="list-style-type: none">▪ Colline de performance hydro-électrique complète▪ Courbe d'emballlement▪ Courbe de puissance électrique maximale▪ Niveau de vibration▪ Colline de cavitation | + | + |
| Caractérisation des réducteurs <ul style="list-style-type: none">▪ Caractéristique hydraulique▪ Temps de réponse d'ouverture/fermeture | + | - |
| Fonctionnement du système complet (armoires, turbine et réducteurs) <ul style="list-style-type: none">▪ Validation du programme complet de pilotage de la turbine▪ Tests de l'ensemble des alarmes implémentées▪ Régulation MPPT sur toute la plage de débit de la turbine▪ Démarrage/arrêt normal et d'urgence▪ Basculement entre les branches de la turbine et de by-pass▪ Fonctionnement en régime inférieur à Qmin et supérieur à Qmax▪ Changement rapide du débit de Qmin à Qmax et viceversa | - | + |

4.3.3 T3.2 Mesures de performance du prototype de Verney

Des mesures stationnaires ont été effectuées selon un plan d'expérience de mesures en 17+1 points (Hasmatuchi, 2016 et 2018). La plage de chute balayée est de respectivement 0.5 à 5.5 bars pour la version prototype «DuoTurbo V0p6 » et de 0.5 à 7.5 bars pour la version finale de la turbine appelée « prototype de Verney ».

Cette plage de pression correspond à celle disponible sur le site de Verney. La pression de sortie de la turbine a été fixée à 2 bars pour l'ensemble des tests de performance et d'emballlement de la machine, excepté pour le test spécifique de détection des régimes cavitants. Une plage de variation entre 600 min⁻¹ et 3'500 min⁻¹ a été explorée pour les vitesses de rotation des roues dans la limite de capacité de la machine. En effet, pour les valeurs de chute élevées, la vitesse de rotation inférieure des roues est limitée par la valeur maximale de couple et donc de courant que peuvent accepter les bobines des génératrices.

Ces mesures individuelles à chute constante ont été par la suite assemblées dans des graphiques à trois dimensions qui permettent de comparer plusieurs valeurs entre elles.



Rendement

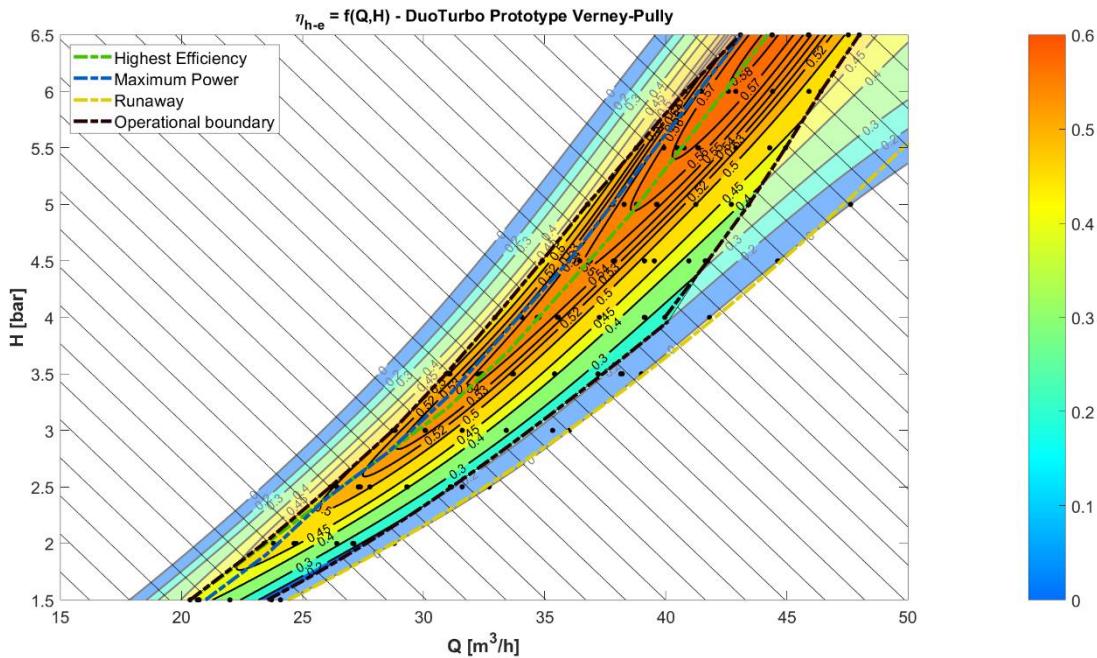


Figure 29: Colline de rendement hydro-électrique obtenue pour le prototype de Verney.

Le rendement hydro-électrique, mesuré sur toute la plage de fonctionnement, est représenté sur la Figure 29. Les valeurs correspondantes aux chutes comprises entre 0.5 à 1.5 bars et entre 6.5 à 7.5 bars ne sont pas affichées soit car le rendement est trop faible soit la plage de mesure n'est pas accessible.

Le rendement hydro-électrique maximum mesuré pour le prototype de Verney est de 59%, pour un débit de 48 m³/h et une chute de 7.5 bars.

Superposées à la colline, les courbes suivantes ont également tracées :

- le rendement maximum (en vert,) qui suit la crête de la surface ;
- la puissance électrique maximale (en bleu) ;
- la courbe d'emballement (en jaune) qui correspond au rendement nul ; les limites opérationnelles de la turbine (en noir).

Ces frontières sont définies par des limitations physiques comme la vitesse de rotation des roues, qui comme déjà précisé, est limitée entre 600 min⁻¹ et 3'500 min⁻¹, le couple maximum que voit une des roues ou encore un rendement minimal de 20%, en dessous duquel la turbine et son armoire de contrôle sont énergétiquement moins efficientes qu'un brise-charge classique. La turbine ne peut donc pas fonctionner efficacement dans la zone hachurée.



Puissance

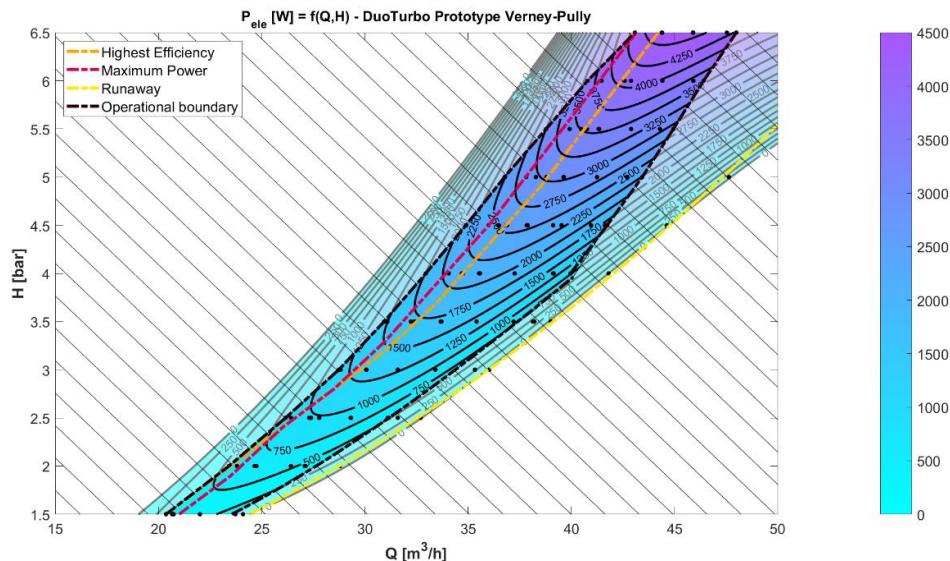


Figure 30: Colline de puissance électrique obtenue pour le prototype de Verney.

Sur la Figure 30 est représentée la colline de puissance électrique disponible à la sortie des génératrices, la plage de fonctionnement considérée étant identique à celle du rendement. Les courbes de rendement maximal, de puissance électrique maximale, d'emballement ainsi que les limites de fonctionnement, citées précédemment, sont également représentées. La puissance maximale mesurées est de 5'920 W pour un débit de 48 m³/h et une chute de 7.5 bars.

Emballage

La turbine a été testée en condition d'emballement (sans freinage électrique) avec pour but de déterminer la dépendance linéaire entre la vitesse de rotation des roues et le débit ainsi que la perte de charge engendrée par la turbine lorsque la machine est déconnectée du réseau. Ceci est illustré sur les graphiques de la Figure 31. Ces tests sont indispensables afin d'identifier la caractéristique hydraulique de la machine en cas d'une défaillance du pilotage électrique des génératrices par les convertisseurs (et implicitement de la vitesse de rotation des roues). Cela permet de déterminer les points de fonctionnement résultants sur toute la plage de débit de la machine. De plus, le développement du niveau de cavitation et des vibrations est également surveillé pour s'assurer que la structure mécanique de la machine n'est pas impactée pendant que l'automate met en sécurité la branche de turbinage.

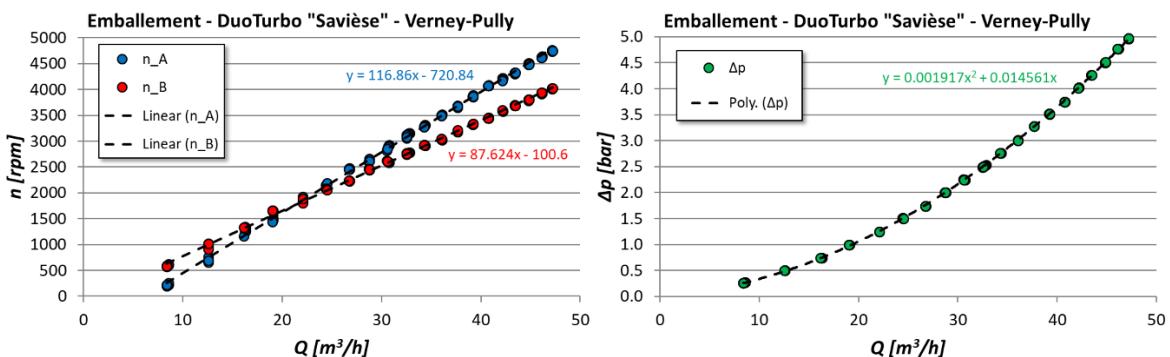


Figure 31: Vitesse de rotation selon débit (gauche) et perte de pression selon débit (droite) du prototype DuoTurbo de Verney en conditions d'emballement.



Cavitation

La cavitation, changement de phase, de la phase liquide à la phase vapeur lorsque la pression atteint celle de vaporisation, étant un phénomène physique qui n'épargne généralement aucune machine hydraulique, une caractérisation a donc été effectuée pour le prototype de Verney. Le but principal a été d'identifier la valeur de σ_{\min} (Nombre de Thoma) à partir de laquelle l'écoulement commence à caviter en traversant les roues de la turbine.

Pour rappel, σ dépend du $NPSE$ et de l'énergie spécifique E , qui sont calculés selon la norme IEC 60193 comme suit :

$$NPSE = \frac{\Delta p_s + p_{amb} - p_{vap}}{\rho} + \left(\frac{Q}{A}\right)^2 \cdot \frac{1}{2} \quad (1)$$

$$E = g \cdot H \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{NPSE}{E}, \quad (3)$$

avec Δp_s [Pa] la différence de pression due à la différence de niveau entre la sortie de la turbine et la surface libre du réservoir aval, p_{amb} [Pa] correspondant à la pression atmosphérique, p_{vap} [Pa] la pression de vaporisation de l'eau, ρ [$\frac{kg}{m^3}$] la densité de l'eau, Q [$\frac{m^3}{s}$] le débit traversant la turbine, A [m^2] la section de passage hydraulique à la sortie des roues de la turbine, g [$\frac{m}{s^2}$] l'accélération de gravité terrestre et H [mCE] la chute entre l'entrée et la sortie de la machine.

Sur le banc d'essai de laboratoire, la valeur du terme Δp_s est donc dépendante de la position de la turbine par rapport au niveau du liquide dans le réservoir aval et donc de la valeur de pression relative imposée au réservoir (à l'aide d'un compresseur ou une d'une pompe à vide). En effet, cette méthode de régulation permet de simuler artificiellement différents niveaux d'implantation de la turbine sans avoir à déplacer la machine ou à varier le niveau de l'eau dans le réservoir aval.

Un test spécifique a été effectué à une chute constante de 3 bars et une pression de sortie (sans pressurisation ou dépressurisation du réservoir aval) de $\Delta p_s = 0.122$ bars. Ces valeurs ont été choisies car, sur toutes les combinaisons de vitesse de rotation des roues, il devrait y avoir une partie en régime cavitant et une autre en régime normal.

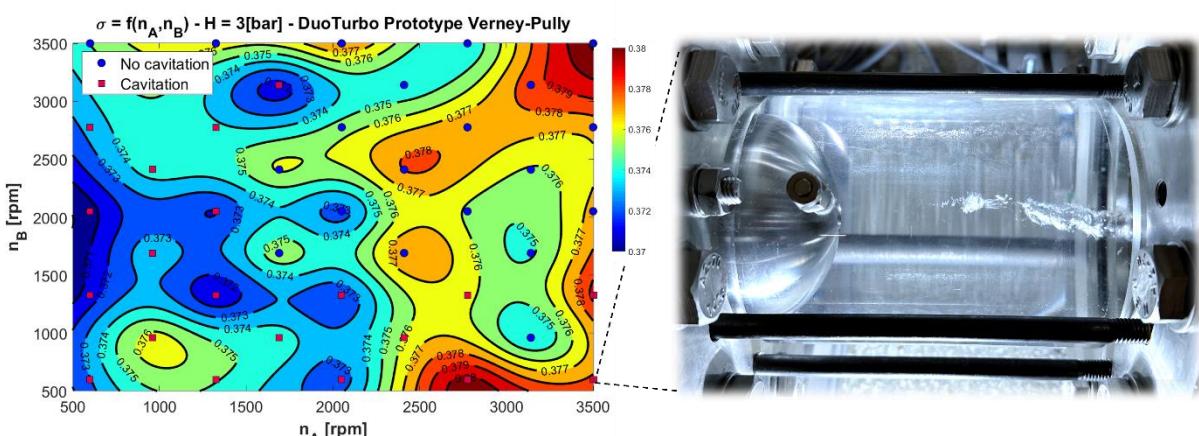


Figure 32: Etat de développement de la cavitation en fonction des vitesses de rotation des roues identifié pour une chute de 3 bars et une pression de sortie de $\Delta p_s=0.122$ bars sur le prototype de Verney.



Les résultats pour le prototype de Verney sont fournis sur la Figure 32. La cavitation a été déterminée pour chaque point de fonctionnement au bruit et parfois à l'aide de la section transparente à la sortie de la turbine (voir la photo avec un tourbillon cavitant à la sortie de la turbine pour un régime de rotation de respectivement 3500 min^{-1} pour la première roue et de 600 min^{-1} pour la deuxième roue). Cette information est indiquée avec des carrés rouges pour un régime cavitant, et avec des cercles bleus pour un régime normal. Selon ces résultats, on peut identifier une limite d'apparition de la cavitation à approximativement $\sigma_{lim} = 0.375$. Ce chiffre donne une idée de l'ordre de grandeur (et non pas une limite rigide) à partir duquel la cavitation peut se développer dans la turbine.

Les graphiques suivants comparent les valeurs de σ mesurées sur toute la plage de fonctionnement du prototype de Verney lors des tests stationnaires en laboratoire, avec celles attendues sur le site de Verney pour une pression à la sortie de la machine de 4 bars. La différence entre chaque graphique est la valeur de $\Delta p_s [\text{bar}]$ qui vaut :

- 0 bar (Figure 33 gauche) - permettant de confirmer les valeurs de σ_{lim} identifiées auparavant ;
- 2 bars (Figure 33 droite) - condition dans laquelle toutes les mesures stationnaires ont été effectuées (en pressurisant le réservoir aval) ;
- 4 bars (Figure 34) - permettant de montrer que pour les conditions de pression de sortie de Verney la machine ne présentera pas de cavitation.

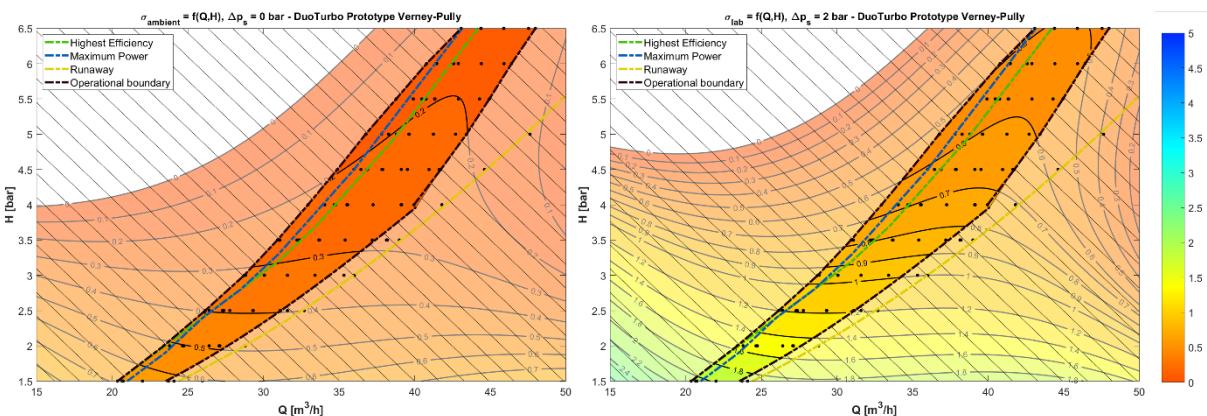


Figure 33 : σ en fonction de Q et H , avec un Δp_s de 0 bar (gauche) et de 2 bars - conditions de test en laboratoire (droite) obtenues pour le prototype de Verney.

La Figure 33 gauche montre que la valeur de $\sigma_{lim} = 0.375$ avec une chute 3 bars est bien plausible. En prenant un compte une marge de sécurité, il peut être affirmé que tant que σ ne passe pas en dessous de 0.5, la machine ne présente pas de cavitation. Cela est reflété dans les résultats affichés sur la Figure 33 à droite, situation pour laquelle la cavitation n'a pas vraiment été décelée. La pression de sortie de la turbine étant encore plus haute sur le site de Verney, on peut conclure qu'il n'y a pas de risque de cavitation dans les limites de fonctionnement opérationnel de la machine.

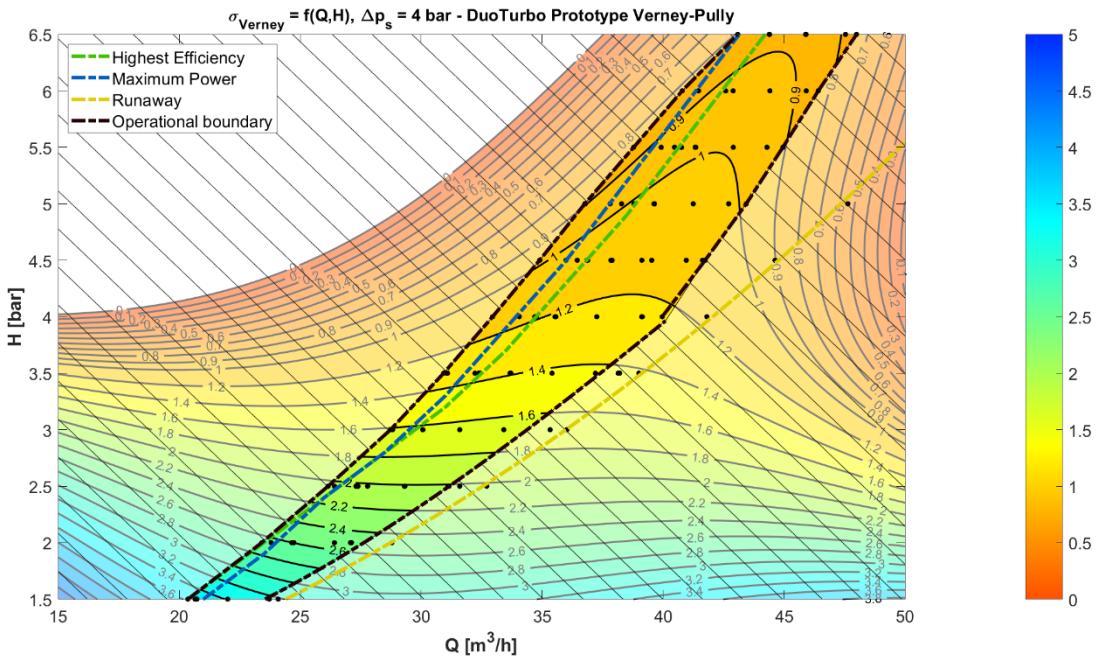


Figure 34 : σ en fonction de Q et H , avec un Δp_s de 4 bars (équivalent au site de Verney) obtenue pour le prototype Verney

4.3.4 T3.3 Mesures transitoires

Caractérisation et comportement dynamique des réducteurs de pression

La caractéristique hydraulique d'un réducteur de pression du type ClaVal 90-G1E DN100, installé au laboratoire de la HES-SO Valais a été mesurée dans le but de pouvoir l'intégrer ultérieurement dans les simulations numériques du réseau d'eau potable de Pully. Le banc d'essai a été configuré avec la branche inférieure comprenant la turbine DuoTurbo et le réducteur, fermée tandis que la branche supérieure équipée du réducteur testé est ouverte (voir Figure 27). Les tests ont été effectués avec la chambre de commande du réducteur à pression atmosphérique.

Les résultats de chute de pression sur le réducteur en fonction de débit pour différentes positions constantes d'ouverture sont illustrés sur la Figure 35 à gauche. A noter qu'à partir d'un degré d'ouverture de 50%, ces mesures sont à considérer avec prudence car les pertes de charge sont minimales (de l'ordre de grandeur de l'erreur relative des capteurs employés). Les points mesurés pour chaque ouverture constante correspondent à la loi physique de perte de charge attendue :

$$\Delta p = k \cdot Q^2 \quad (4)$$

avec k le coefficient de pertes de charges hydrauliques.

Selon les spécifications techniques des réducteurs de pression, un coefficient d'écoulement C_v (indiquant le débit qui traverse le réducteur à 1 bar de perte de charge) est défini comme suit :

$$C_v = \frac{Q \left[\frac{m}{s} \right]}{\sqrt{\Delta p [bar]}} \quad (5)$$



Ce coefficient, sans dimension et normalisé par la valeur obtenue à 100% d'ouverture, permet de calculer le coefficient %Cv100 et d'obtenir la variation de la Figure 35 à droite. Cette manière de représentation fourni en effet la relation ouverture-débit-chute de pression du réducteur sur toute la plage de fonctionnement. Les valeurs des coefficients Cv et %Cv100 obtenues par ouverture sont listées dans le tableau ci-dessous. Pour ce réducteur, un coefficient Cv de 47.9 est obtenu à ouverture maximale, ce qui est bien proche de 48, annoncé dans sa fiche technique.

Tableau 9: Degré d'ouverture du réducteur de pression ClaVal 90-G1E DN100.

| Q [l/s] | 0 | 3.6 | 8.2 | 21.5 | 53.1 | 100.6 | 107 | 109.4 | 110.4 | 111.1 | 111.3 | 111.4 |
|---------------|-----|-----|------|------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| H [bar] | 2.9 | 2.9 | 2.8 | 3.8 | 2.8 | 2.9 | 1.4 | 0.9 | 0.6 | 0.5 | 0.4 | 0.4 |
| Ouverture [%] | 0 | 7.7 | 12.8 | 17.9 | 28.2 | 38.5 | 48.7 | 59 | 69.2 | 79.5 | 89.7 | 100 |
| Cv | 0 | 0.6 | 1.3 | 3.1 | 8.9 | 16.6 | 24.8 | 32.9 | 39.9 | 44.6 | 47.1 | 47.9 |
| % Cv100 | 0 | 1.2 | 2.8 | 6.4 | 18.5 | 34.6 | 51.8 | 68.7 | 83.4 | 93.3 | 98.4 | 100 |

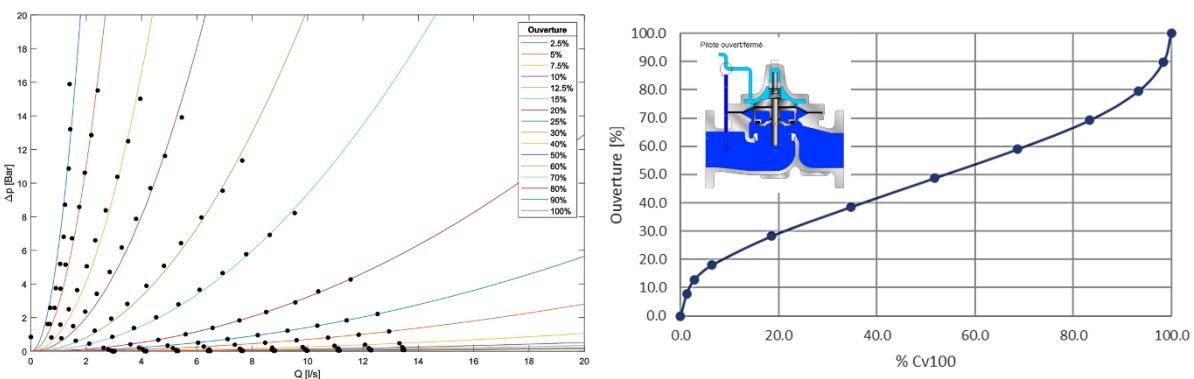


Figure 35: Pertes de charge à ouverture constante selon le débit (gauche) mesurées sur le réducteur de pression ClaVal 90-G1E DN100 ; caractéristique du réducteur en ouverture en fonction du coefficient d'écoulement adimensionnel %Cv100 (droite).

Pour déterminer le temps de réaction d'ouverture/fermeture d'un réducteur de pression de ce type, plusieurs mesures dynamiques, effectuées lors d'une campagne de mesures antérieure au projet Tune, ont été analysées. La Figure 36 montre l'historique du débit, de la pression statique en aval du réducteur ainsi que de la chute de pression pendant un cycle de changement rapide de pression amont de 8 bars à 12 bars et ensuite à 8 bars (gauche) et vice versa (droite). Les points de fonctionnement en régime stabilisé sont représentés avec des croix. Ces variations de pression ont été effectuées deux fois.

Une vanne guillotine, installée en aval du réducteur de pression, a été utilisée pour créer une résistance d'environ 2 bars. A cela, s'ajoute encore 3 bars supplémentaires, imposés avec l'air comprimé, pour l'ensemble de la boucle de test, via le réservoir pressurisable, ce qui induit une pression de 5 bars en aval du réducteur.

Pour cette configuration des éléments, une vitesse de rotation constante a été imposée aux trois pompes de recirculation du banc d'essai, avec comme résultat un débit de 36 m³/h. Avec le piston libre, le réducteur de pression adapte, par sa conception mécanique, son ouverture en fonction de la pression aval afin de ne pas dépasser celle de consigne de 5 bars.

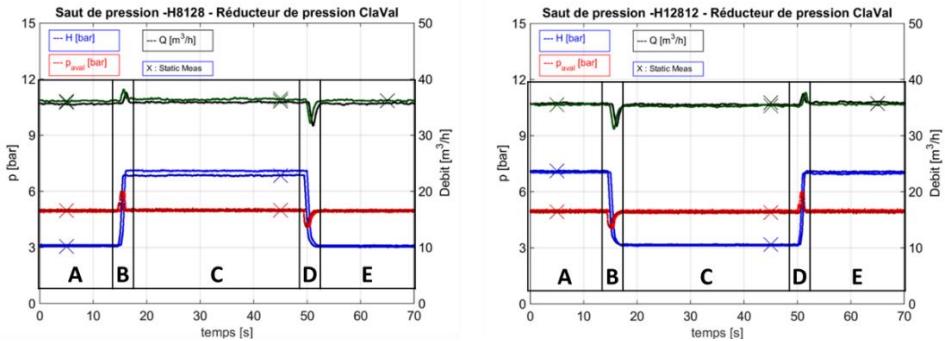


Figure 36: Historique de l'évolution du débit, de la chute de pression et de la pression aval du réducteur de pression ClaVal 90-G1E DN100 pendant un saut de pression de 8 bars à 12 bars et retour à 8 bars (gauche) et vice versa (droite).

Dans l'ordre des événements, la vitesse de rotation de l'une des trois pompes a été modifiée au temps $t=15$ s dans un sens (augmentation pour un saut positif, ou diminution pour un saut négatif), et au temps $t=50$ s dans le sens inverse. Les changements rapides de vitesse de rotation de la pompe (accélération/décélération de 1000 rpm/s) induisent un changement de la pression aval de la vanne Clayton et implicitement un déplacement du piston jusqu'à ce que la valeur de consigne soit à nouveau atteinte. La position de la vanne guillotine a été gardée intacte pendant ces variations.

Tableau 10: Valeurs des gradients de chute de pression et de pression aval identifiés sur le réducteur de pression ClaVal 90-G1E DN100 pendant un saut de pression de 8 bars à 12 bars et retour à 8 bars et vice versa.

| Phase | Q [l/s] | ΔQ [l/s] | H [bar] | ΔH [bar] | Gradient ΔH [bar/s] | P_{aval} [bar] | ΔP_{aval} [bar] | Gradient ΔP_{aval} [bar/s] | O [%] | ΔO [%] |
|--|------------|---------------------|------------|---------------------|--------------------------------|---------------------|----------------------------|---------------------------------------|----------|-------------------|
| Saut de pression 8 – 12 – 8 bars | | | | | | | | | | |
| A - stationnaire | 9.92 | | 3.13 | | | 4.95 | | | 21.49 | |
| B - dynamique | | 0.52 | | 3.97 | 4.895 | | 1.03 | 1.096 | | -4.73 |
| C - stationnaire | 9.92 | | 7.10 | | | 4.95 | | | 16.76 | |
| D - dynamique | | -1.11 | | -3.99 | -2.847 | | -0.86 | -0.509 | | 4.80 |
| E - stationnaire | 9.92 | | 3.11 | | | 4.95 | | | 21.56 | |
| Saut de pression 12 – 8 – 12 bars | | | | | | | | | | |
| A - stationnaire | 9.90 | | 7.03 | | | 4.95 | | | 16.78 | |
| B - dynamique | | -1.09 | | -3.91 | -2.132 | | -0.92 | -0.541 | | 4.96 |
| C - stationnaire | 9.90 | | 3.12 | | | 4.95 | | | 21.47 | |
| D - dynamique | | 0.52 | | 3.85 | 4.08 | | 1.03 | 1.119 | | -4.58 |
| E - stationnaire | 9.90 | | 6.97 | | | 4.95 | | | 16.89 | |

Les valeurs du débit pendant tous ces changements sont une conséquence du comportement intrinsèque de la vanne Clayton, qui change son ouverture et donc sa géométrie interne. Ce comportement de régulateur indirect de débit est connu, étant parfois utilisé pour fixer le transit d'une branche dans les réseaux de distribution d'eau. L'évolution du changement de la position du piston pendant ces tests n'a pas pu être monitoré. Cependant, les valeurs d'ouverture du réducteur ont pu être calculées à l'aide de sa caractéristique déterminée précédemment.



Les valeurs de débit (Q), de chute (H), de pression aval (P_{aval}) et d'ouverture du réducteur pour les régimes stationnaires (phases A, C et E) de ces tests sont fournies dans le Tableau 10. Pour les phases transitoires (B et D), le tableau fourni l'amplitude Δ des changements de ces variables ainsi que le gradient de changement de la chute et de la pression aval du réducteur.

En conclusion, pour un réglage du temps de réponse fixe du réducteur, un saut de pression amont de 4 bars effectué en moins d'une seconde peut induire une variation de 1 bar de la pression aval (dans le même sens). De plus, les gradients de pression aval identifiés indiquent un temps de réaction deux fois supérieur à la fermeture par rapport à l'ouverture du réducteur. Ces valeurs donnent un ordre de grandeur de la réactivité des réducteurs de pression et servent de valeur d'entrée pour les simulations numériques. Le temps de réaction peut différer selon les sites, étant réglé au cas par cas lors de la mise en service en fonction des caractéristiques spécifiques de chaque réseau.

Comportement dynamique de la turbine

Le comportement dynamique de la turbine est crucial pour la stabilité de la pression et du débit du réseau d'eau sur lequel elle est installée. En dehors des éventuels phénomènes hydrodynamiques très rapides et indésirables (fluctuations de pression induites par l'interaction rotor-stator entre les parties tournantes et fixes de la machine, pulsations de pression induites par des poches cavitation, etc.), c'est principalement l'effet du changement de vitesse de rotation des roues qui a été analysé. Sur la Figure 37 à gauche sont représentées les caractéristiques en chute-débit à puissance électrique maximale, autour de laquelle la turbine opère, ainsi que l'emballage du prototype DuoTurbo de Verney. Sur la figure de droite, la caractéristique chute-vitesse de rotation de la première roue est représentée pour la même trajectoire de puissance électrique maximale.

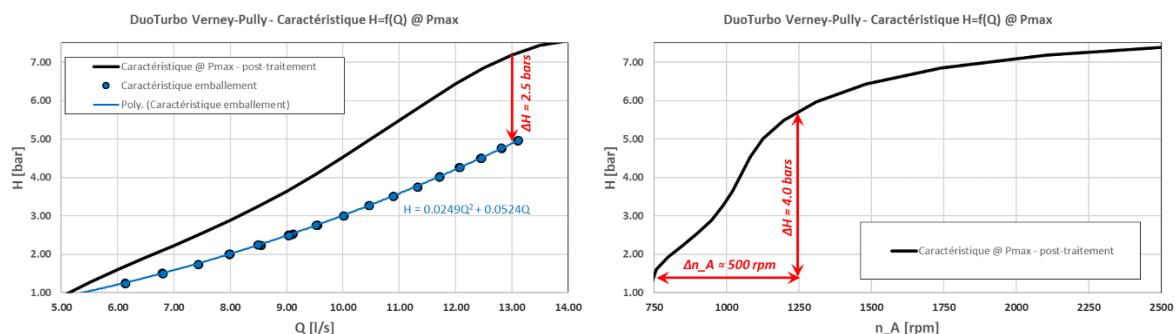


Figure 37: Caractéristiques hydrauliques du prototype de Verney avec indication de l'amplitude maximale de chute lors d'un départ à l'emballage (gauche) ou lors d'un changement de vitesse de rotation de la première roue (droite).

En fonctionnement normal, l'algorithme d'identification du point d'opération de puissance maximale (MPPT) intégré dans l'automate effectue des variations de la vitesse de rotation des roues de ± 50 rpm toutes les 2 secondes. Les rampes d'accélération/décélération sont de 5 s/1000 rpm. Ces variations de vitesse de rotation induisent des infimes variations de chute, considérées négligeables. Le fonctionnement de la machine est jugé très calme du point de vue des bruits et des vibrations observées pendant les tests en laboratoire et sur site. Cependant, en cas d'un changement brusque du débit (par exemple de 6 à 11 l/s) la vitesse de rotation de la première roue sera augmentée de 750 rpm à 1250 rpm, ce qui représente un saut de 500 rpm en 2.5 secondes selon la rampe d'accélération utilisée. Ceci induit un saut de chute négative de 4 bars sur le réducteur aval de la turbine pendant le même intervalle de temps, soit un gradient de 1.6 bar/s, qui doit être absorbé avec un impact minimal sur la pression en aval de l'installation. Selon le Tableau 10, ceci pourrait induire une diminution de pression en aval de l'installation inférieure à 1 bar avec un gradient de 0.5 bar/s. Pour un changement rapide du débit en sens inverse, on obtient une augmentation de pression en aval de l'installation de l'ordre de 1 bar avec un gradient de 1 bar/s, avant que le réducteur compense tout cela. Le comportement exact du système



est encore plus complexe car en cas d'une diminution de pression aval inférieure à 0.5 bars, l'ouverture du réducteur de pression de by-pass viendrait compenser les effets. Dans le cas d'une augmentation trop importante de la pression aval pendant ces phases transitoires, c'est la vanne de décharge de l'installation (avec une ouverture très rapide et une fermeture lente) qui vient limiter l'amplitude de surpression ressentie par le réseau.

Le deuxième scenario potentiellement problématique pour la stabilité de la pression en aval du site est représenté par le départ à l'emballement des roues de la turbine en cas d'une défaillance du pilotage par les convertisseurs de fréquence. Pour un débit maximal de 13 l/s, le départ à l'emballement induit une diminution de chute de la turbine de 2.5 bars en très peu de temps. Cela est ressenti par le réducteur aval de la turbine comme un saut de pression rapide avec la même amplitude, qu'il absorbera en partie par sa réaction. Le restant de la surpression en aval de l'installation sera repris par la vanne de décharge.

Comportement dynamique du réseau d'eau potable de Pully

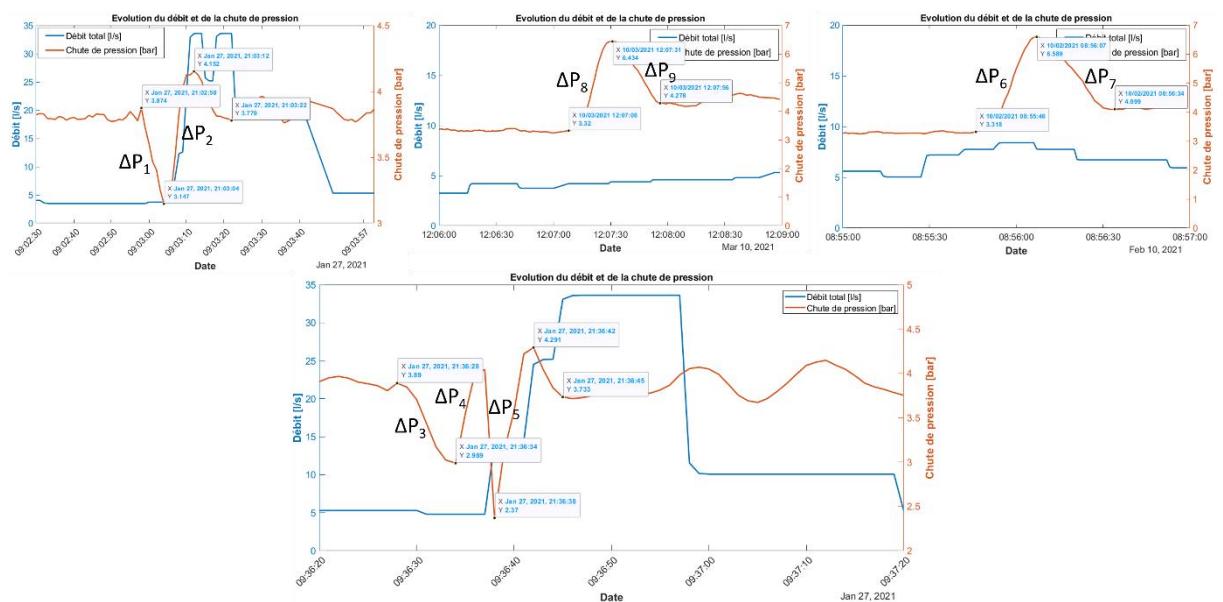


Figure 38: Historique des variations de la chute de pression et du débit sur le réducteur de pression de la chambre coup-pression de Davel du réseau d'eau potable de Pully à différents instants aléatoires sur la période janvier-mars 2021.

Une analyse des signaux récoltés sur le réducteur de pression de la chambre coup-pression de Davel (voir le setup des mesures dans le chapitre 4.4.3) du réseau d'eau potable de Pully, parallèle avec celle de turbinage de Verney, à différents instants aléatoires sur la période janvier-mars 2021 a été effectuée pour déterminer l'amplitude et la vitesse des fluctuations de pression vues par le réseau d'eau potable en temps normal. Les valeurs des gradients de chute de pression, identifiés sur le réducteur de pression pour 9 instances, sont fournies dans le Tableau 11. A noter que le déphasage entre les fluctuations du débit et de la chute de pression n'est pas forcément réaliste, les mesures n'étant pas effectuées de manière purement synchrone. Un saut de plus de 3 bars est observé pour le point P₆ et un gradient maximal de 0.48 bar/s est observé pour le point P₄, ce qui est bien inférieur aux valeurs testées sur le réducteur en laboratoire. Ces valeurs donnent une idée de l'ordre de grandeur des fluctuations de pression existantes habituellement dans le réseau.



Tableau 11: Valeurs des gradients de chute de pression identifiés sur le réducteur de pression de la chambre coup-pression de Davel du réseau d'eau potable de Pully pour 9 instances aléatoires sur la période janvier-mars 2021.

| | ΔP_1 | ΔP_2 | ΔP_3 | ΔP_4 | ΔP_5 | ΔP_6 | ΔP_7 | ΔP_8 | ΔP_9 |
|--------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| $\Delta t [s]$ | 6 | 8 | 6 | 4 | 3 | 21 | 27 | 23 | 25 |
| ΔP initial [bar] | 3.874 | 3.147 | 3.89 | 2.37 | 4.291 | 3.318 | 6.589 | 3.32 | 6.434 |
| ΔP final [bar] | 3.147 | 4.152 | 2.989 | 4.291 | 3.733 | 6.589 | 4.099 | 6.434 | 4.278 |
| ΔP total [bar] | -0.727 | 1.005 | -0.901 | 1.921 | -0.558 | 3.271 | -2.49 | 3.114 | -2.156 |
| Gradient [bar/s] | -0.121 | 0.125 | -0.15 | 0.48 | -0.186 | 0.155 | -0.092 | 0.135 | -0.086 |

4.3.5 T3.4 Mesures de fonctionnement MPPT

L'avantage d'une turbine de type DuoTurbo par rapport aux technologies équivalentes (p. ex. pompe inversée) vient principalement d'une plage de fonctionnement très large par le biais de la variation de la vitesse de rotation des deux roues (voir la plage complète de fonctionnement sur la Figure 29). Cependant, avec comme objectif de maximiser la production électrique de la turbine, la machine est opérée plutôt sur la courbe de puissance maximale, qui n'est pas totalement identique avec celle de rendement hydro-électrique maximal.

L'un des tests de validation du bon fonctionnement du programme de pilotage de la turbine, par l'automate dédié, consiste à imposer sur le banc d'essai différents débits (on simule ainsi différents états du réseau d'eau potable) et à laisser l'algorithme d'identification du point d'opération de puissance maximale (MPPT) intégré dans automate chercher le point d'opération estimé par le post-traitement des mesures stationnaires effectuées auparavant. Sur la Figure 39, on retrouve en bleu les points de fonctionnement mesurés en suivant la trajectoire de puissance électrique maximale (courbe noire) déterminée par le post-traitement. Les points en rouge représentent la trajectoire suivie par l'automate à l'aide de l'algorithme MPPT intégré. Sur la variation de la chute en fonction du débit, les points de fonctionnement obtenus par l'automate suivent bien la même trajectoire sur toute la plage de débit de la turbine. En revanche, la variation du rapport des vitesses de rotation des deux roues en fonction du débit montre une trajectoire quasi-identique jusqu'à 10 l/s et puis relativement différente pour les valeurs de débit supérieures (en phase avec le petit écart visible également sur la variation débit-chute).

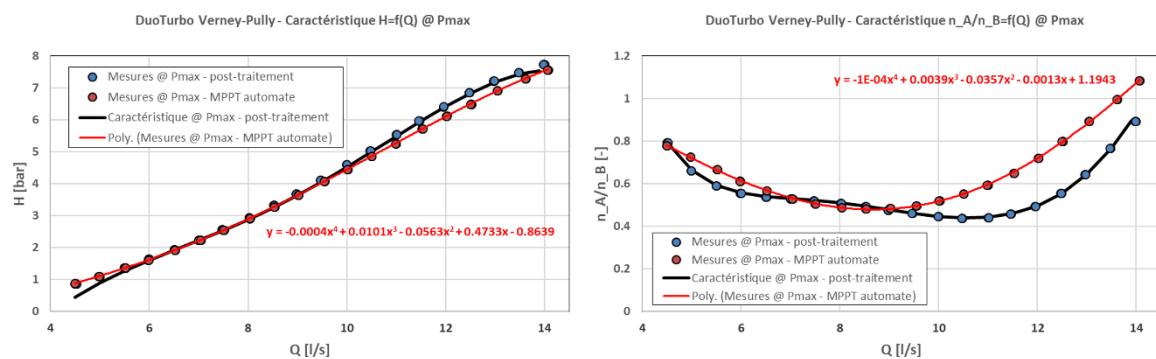


Figure 39 : Caractéristiques hydrauliques du prototype de Verney mesurées en laboratoire en condition de fonctionnement à puissance maximale sur toute la plage de débit de la machine.

La principale raison de cet écart vient du fait que l'automate ne suit plus le résultat de l'algorithme MPPT, mais plutôt celui d'une courbe théorique (voir la Figure 43) d'estimation de la vitesse de rotation des roues en fonction de la puissance électrique produite (voir Biner 2021). En temps normal, cette fonction permet une adaptation rapide de la vitesse de rotation des roues en cas d'un changement brusque du débit du site (p. ex. soutirage pour l'extinction des incendies), en évitant un départ en consommation ou une surcharge des génératrices. Dans le cas de ces tests, les coefficients de cette courbe théorique



utilisés ont été ceux de la turbine installée sur le site de Savièse équipée avec le même profil hydraulique des roues, mais avec une géométrie interne complète légèrement différente (paliers mécaniques légèrement différents, dôme aval de la turbine différent). La machine suit donc sur la première partie du débit la trajectoire prévue, car l'écart entre le résultat de l'algorithme MPPT et celui de la courbe théorique est inférieur au seuil de sélection, et plutôt celle de la courbe théorique sur la deuxième partie des débits. Ces coefficients ont été désormais mis à jour lors de la mise en service de la turbine sur le site.

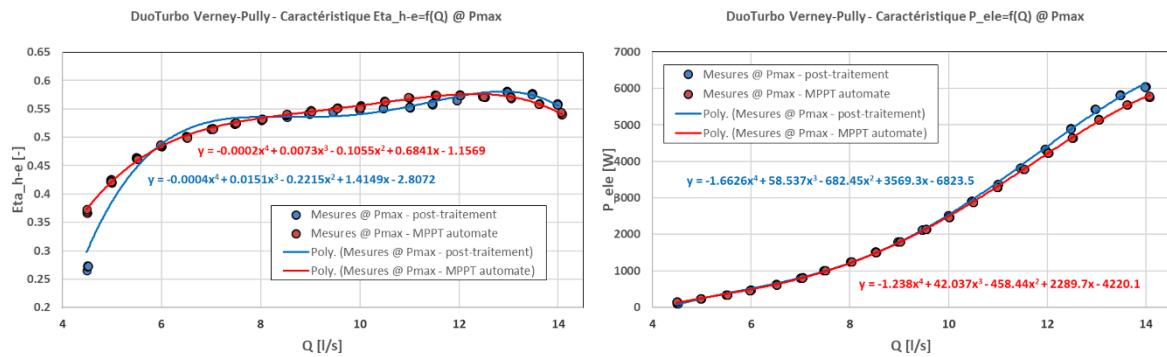


Figure 40: Résultats de rendement hydro-électrique et de puissance électrique totale du prototype de Verney mesurées en laboratoire en condition de fonctionnement à puissance maximale sur toute la plage de débit de la machine.

Sur le même principe de représentation, les valeurs obtenues pour le rendement hydro-électrique et pour la puissance électrique totale de la turbine, en condition de fonctionnement à puissance maximale sur toute la plage de débit de la machine, sont fournies sur la Figure 40. Il peut être observé que les trajectoires de rendement et de puissance sont très proches, malgré le léger décalage des points de fonctionnement noté antérieurement.

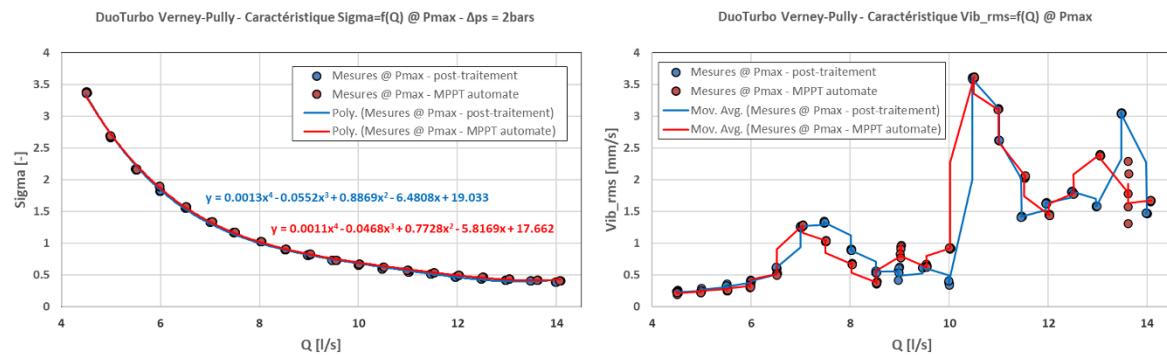


Figure 41: Résultats de sigma et des amplitudes de vibration du prototype de Verney mesurées en laboratoire en condition de fonctionnement à puissance maximale sur toute la plage de débit de la machine.

La variation du nombre adimensionnel de sigma (voir la définition dans la section 4.3.3, équation 3) pour une pression de sortie de $\Delta p_s = 2$ bars de la turbine prototype de Verney, mesurée en laboratoire, en condition de fonctionnement à puissance maximale, est fournie sur la Figure 41 à gauche. Les valeurs obtenues sont les mêmes pour les deux trajectoires suivies et supérieures à la valeur limite d'apparition de la cavitation de $\sigma_{lim} = 0.375$ sur toute la plage de débit.

Enfin, sur la Figure 41 à droite, les valeurs RMS de vitesse de vibration, obtenues sur les mêmes trajectoires de puissance maximale de la turbine, sont représentées. De manière générale, l'amplitude des vibrations augmente avec le débit et implicitement avec la puissance, ce qui est intuitif. De plus, l'amplitude des vibrations est supérieure pour trois régimes de débit (environ 7.5, 10.5 et 13.5 l/s), signe



de phénomènes de résonance de la turbine, des composants du système testé (ensemble turbine plus vannes Clayton) ou des composants du banc d'essai. Une analyse plus approfondie permettrait d'identifier précisément la source de ces pics de vibration. Cependant, étant donné que la machine même, comme d'ailleurs aussi les deux prototypes déjà installés sur les sites de Savièse et de Médières, présente un fonctionnement très doux sur toute la plage de fonctionnement testée, que l'assemblage hydromécanique provisoire effectué en laboratoire est bien moins rigide que celui du site et que le banc d'essai comporte aussi des régimes d'opération moins stables (configuration géométrique complexe du banc, pompes de recirculation avec vitesse variable, couplage des instabilités entre les pompes et la turbine) les résultats ne seraient pas concluants.

Un capteur de surveillance des vibrations est installé sur le corps de la turbine dans la chambre de Verney à Pully et les valeurs sont enregistrées en permanence. Les alarmes sont fixées à une intensité de vitesse de vibration de 2 mm/s. La machine installée ultérieurement sur site n'a pas montré de valeurs de vitesse de vibration supérieures à 2 mm/s lors de la mise en service.

4.3.6 T3.5 Mesures de comportement dynamique du débit turbiné

Avec l'objectif de valider la stabilité et de la fiabilité de la régulation des vitesses de rotation des roues de la turbine DuoTurbo de Verney par son automate dédié, plusieurs tests de transition rapide du débit, entre les valeurs minimales et maximales, Q_{\min} et Q_{\max} , ont été effectués en laboratoire. Ceci a été possible par le biais d'un changement rapide de la vitesse de rotation de l'une des pompes de recirculation du banc d'essai, qui induit un changement raide du débit de la turbine. Ceci permet de simuler changement rapide du débit sur le site. Ces cycles de variation du débit ont été répétés quatre fois. Le même programme d'acquisition utilisé pour les mesures stationnaires a été utilisé pour mesurer des points de fonctionnement pendant ces transitions, mais avec une période d'acquisition de respectivement 1s et 0.2 s et une fréquence d'acquisition de 50 Hz (pour les paramètres spécifiques au réseau d'eau) et de 1'000 Hz (pour ceux spécifiques à la turbine).

L'augmentation du débit entre $Q_{\min} = 5 \text{ l/s}$ et $Q_{\max} = 13 \text{ l/s}$ a été effectuée en 20 s. En revanche, la diminution du débit entre $Q_{\max} = 13 \text{ l/s}$ et $Q_{\min} = 5 \text{ l/s}$ a été effectuée en 2s seulement. Ceci explique les trajectoires suivies par la turbine sur la Figure 42, avec en bleu les points mesurés durant l'augmentation du débit et en rouge la diminution rapide du débit. Une hystérèse est bien visible pour les deux trajectoires montante et descendante, avec un écart plus prononcé pour la diminution du débit, par rapport à la courbe théorique, en noir, obtenue par le post-traitement des mesures stationnaires. De manière générale, on peut observer que la trajectoire théorique est bien suivie et que pendant ces tests les convertisseurs de fréquence ne sont pas partis en défaut, condition nécessaire de flexibilité pour un fonctionnement fiable sur le site en cas d'un changement brusque du débit du réseau.

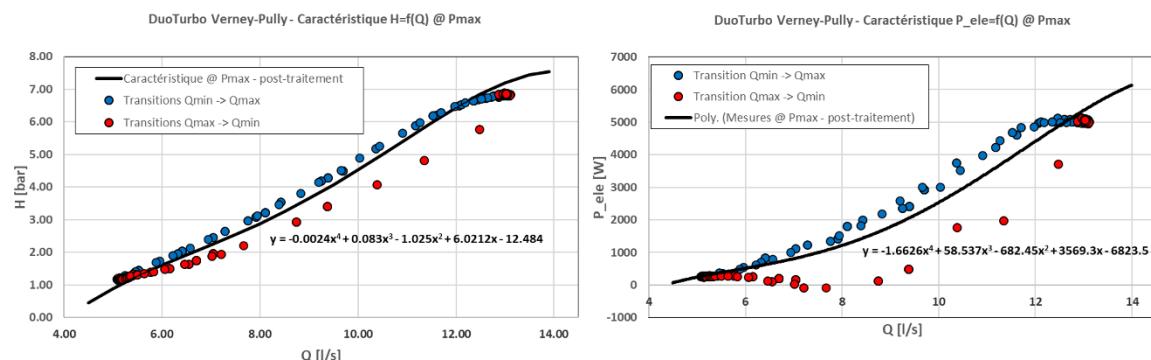


Figure 42: Résultats des trajectoires, suivies par le prototype de Verney, mesurées en laboratoire en condition de changement rapide du débit sur toute la plage la machine.

Comme décrit dans le chapitre précédent, cette adaptation rapide des vitesses de rotation des roues est possible grâce à un algorithme alternatif au MPPT programmé dans l'automate qui, à partir d'un



certain écart, force une nouvelle consigne des vitesses des roues en utilisant la loi de correspondance théorique entre les vitesses de rotation des roues et la puissance électrique correspondante (voir la Figure 43, polynôme d'ordre 3 en rouge).

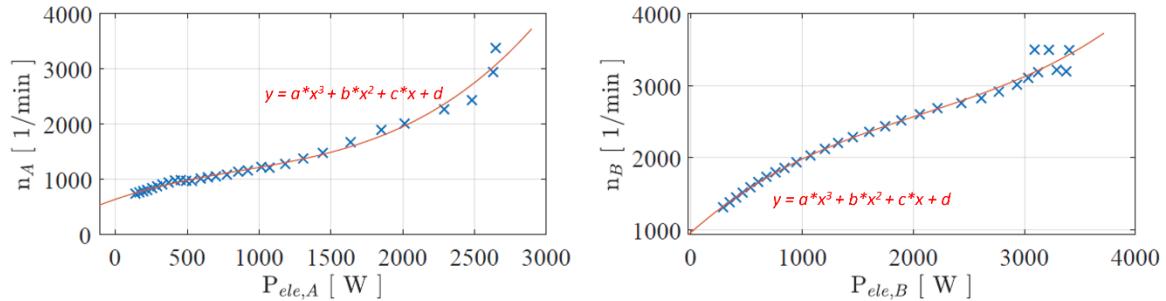


Figure 43: Lois de correspondance entre la vitesse de rotation et la puissance électrique des roues du prototype de Verney en condition de fonctionnement à puissance maximale sur toute la plage de débit de la machine.

Pour conclure, ces tests de transition rapide du débit ont permis de valider en conditions contrôlées, la flexibilité et la fiabilité de la régulation de l'automate de la turbine, qui permettent un déploiement sur le site en toute sécurité. Ces tests sont plus faciles à réaliser en laboratoire que sur site. En effet, lors de la mise en service, le débit de consommation et sa variation sont en général le résultat du comportement aléatoire du réseau.

4.4 WP4 Installation sur le site pilote

4.4.1 T4.1 Installation

La chambre Verney a été construite sous la chaussée du Chemin de Verney à Pully. Les travaux de la chambre ont démarré le 25 mai 2021 et se sont terminés le 29 octobre 2021. La mise en service **sans turbinage** a été réalisée fin 2021.



Figure 44: DuoTurbo Verney – introduction dans la chambre de Verney et installation sur la branche de turbinage.

Les dimensions intérieures retenues sont de 4.7 m x 2.2 m et 2 m de hauteur. Pour pouvoir finaliser la sectorisation du réseau de Pully, indépendamment de la fourniture de la DuoTurbo, une conduite d'attente a été installée dans un premier temps à la place de la turbine. Le 5 juin 2023, la turbine ainsi que les armoires électriques ont été installées dans la chambre, voir Figure 44. La Figure 45 présente l'état de l'installation après le raccordement électrique de l'ensemble des éléments du système, réalisé les jours suivants.



Figure 45 Chambre Verney avec l'ensemble des éléments du système de turbinage après l'installation.

La turbine a été mise en service le 20 juin 2023, la partie de communication avec le système de télégestion du réseau d'eau de la Ville de Pully a été finalisée le 5 octobre 2023.

4.4.2 T4.2 Mise en service

La turbine DuoTurbo a été commandée le 5 juillet 2021 avec un délai de livraison initial prévu de 4 mois. Un retard, lié à un problème d'approvisionnement des matières premières et des composants électroniques, ainsi qu'à une garniture mécanique défectueuse, a forcé les entreprises fabricantes à décaler la livraison de la turbine et des armoires électriques jusqu'au mois d'avril 2023.

En parallèle, la Haute Ecole d'Ingénierie a déménagé ses locaux durant l'été 2021 et son banc d'essai en décembre 2021. Le banc a été remis en fonction dans la première moitié de 2022, les essais en laboratoire du prototype de Verney ont finalement pu être réalisés en mai 2023.

L'installation sur le site de la turbine et de ses armoires électriques a été réalisée le 5 juin 2023, les tests de mise en service préliminaire de l'automate de la turbine ayant été effectués le 20 juin 2023. La liste des actions réalisées par les différents intervenants durant cette journée de mise en service est fournie dans le Tableau 12.

Une fois le point sur le planning réalisé (étape no.1), l'ensemble des raccords électriques des éléments de contrôle-commande du site ont été vérifiés/corrigés (étape no. 2). La mise sous tension et la vérification des éléments ont été effectuées en présence des entreprises Bonet, Telsa, Pilet, ClaVal et la HES. Lors de l'étape no. 3, le réglage préliminaire des vannes Clayton du site de Verney a été effectué par ClaVal, les valeurs de pression de la chambre de Davel étant identifiées en même temps en présentiel. Concernant la phase de configuration et de tests de communication avec les automates depuis l'extérieur du réseau informatique de Pully (étape no. 4), avec l'accès à distance par fibre optique indisponible lors de l'intervention, un modem GSM avec une antenne déportée, équipé d'une carte SIM fournie par la HES, a été provisoirement installé par Telsa. Cette solution temporaire permet de contrôler la turbine à distance, mais n'offre pas un accès à distance à l'automate du nœud pour Pilet. La communication à distance par fibre optique avec les automates a été mise en service en septembre 2023, de même que la communication avec l'automate de Davel (étape no. 5), indisponible initialement.



Tableau 12: Résumé des actions entreprises le 20 juin 2023 lors de la mise en service préliminaire du prototype de Verney.

| No. | Intervenants | Actions | Observations | Etat |
|-----|---|---|--|-----------------------|
| 1. | Pully, Bonnet, Telsa, Pilet, HES (& optionnel BG) | Rendez-vous sur le site de Verney, sécurisation de l'accès et point sur la planification de la journée | Signalisation routière et détecteur d'oxygène nécessaires ! | Effectué |
| 2. | Bonnet, Telsa, Pilet, HES, Pully | Vérification de l'installation électrique et mise sous tension des armoires électriques | Vérification du raccordement électrique et de l'état de l'ensemble des éléments de contrôle-commande. | Finalisé |
| 3. | Pully, ClaVal, HES, Telsa, Pilet (& optionnel BG) | Réglage des consignes des réducteurs de pression de la chambre de Verney | Réglage de la pression de travail des deux réducteurs et tests de transition entre les deux branches (en fonctionnement hydromécanique). | Finalisé |
| 4. | Pully, Telsa, Pilet | Configuration et tests de communication avec les automates depuis l'extérieur du réseau informatique de Pully | Cette étape permettra de finaliser les programmes de pilotage des automates et de surveiller l'état de l'installation à distance. | Réalisé partiellement |
| 5 | Pilet, Pully | Configuration de la communication entre les automates de Verney et de Davel | Vérification des valeurs mesurées par l'automate de Pilet sur Davel et transmission vers l'automate de Verney. | Reporté |
| 6 | Telsa, HES, Pully (& optionnel Pilet et BG) | Tests de mise en service de l'automate de la turbine | Vérification du fonctionnement de programme de pilotage (indépendamment de la communication avec l'automate du nœud de Pilet) et tests de fonctionnement et de sécurité. | Finalisé |
| 7 | Pilet, Telsa, HES, Pully (& optionnel BG) | Tests préliminaires de communication et de fonctionnement en tandem des automates du nœud et de la turbine | Dans la mesure du temps disponible et de l'état de finalisation du programme de pilotage du nœud par Pilet. | Réalisé partiellement |
| 8 | Pilet, Pully, HES (& optionnel BG) | Tests préliminaires de communication entre l'automate du nœud et l'interface du système de télégestion de Pully | Dans la mesure du temps disponible et de l'état de finalisation du programme de pilotage du nœud par Pilet. | Reporté |
| 9 | Pully, Telsa, Pilet, HES | Point de la journée et sécurisation de l'installation et du site | | Effectué |

Les tests de fonctionnalité et de sécurité prévues/possibles (étape no. 6.) ont été réalisés par la HES et Telsa dans la deuxième partie de la journée. Le protocole avec le résultat des tests est fourni dans les Tableau 13 et Tableau 14, et sera fourni à la commune de Pully avec le dossier de l'installation. La turbine a produit pendant ces tests ses premiers watts.

La communication entre les deux automates (étape no. 7) a pu être également testée, l'automate de la turbine fonctionnant temporairement avec une autorisation de turbinage simulée, en attendant la mise en service de l'automate du nœud. L'automate de la turbine récupère l'ensemble des valeurs du site de Verney, une partie étant fournie par l'automate du nœud. Les ajustements encore nécessaires, une fois la liste exhaustive des variables disponibles, seront réalisés à distance pendant la phase de marche industrielle probatoire du système.



La communication avec le réseau informatique de Pully (étape no. 8) n'étant pas disponible lors de cette journée de mise en service, la branche de la turbine a été mise à l'arrêt depuis l'interface de pilotage à distance de l'automate de la turbine (étape no. 9) et le site a été sécurisé.

Le Tableau 13 et le Tableau 14 recensent les tests de fonctionnement du système effectués en laboratoire entre 25 et 30 mai 2023 et reproduits sur site le 20 juin 2023, avec les mentions suivantes :

- Tests effectués : fonctionnalité et sécurité du programme de pilotage de l'automate de la turbine en laboratoire et sur site
- Prototype : turbine DuoTurbo de Verney – Pully.
- Pilotage de la turbine : avec les armoires du site, par l'automate de la turbine programmé par Telsa.
- Opération sur le banc d'essai de la HES-SO VS de Sion : configuration avec réducteurs de pression en parallèle.
- Pilotage du banc d'essai : par l'automate du banc de la HEI.
- Valeurs transmises par l'automate du nœud de Pilet : simulées.
- Valeurs manquantes (capteurs absents ou repris par l'automate de Pilet) : simulées.

La poursuite de la mise en service, effectuée le 5 octobre 2023 comporte principalement des tests de fonctionnement du programme de l'automate du nœud, le réglage fin de l'ensemble des réducteurs de pression des chambres adjacentes au site de Verney et la validation de la communication avec le système de télégestion de la ville de Pully (voir le Tableau 15). Cette étape est suivie par une période de mise en marche industrielle probatoire (durant une année depuis la finalisation de la mise en service) avec un suivi actif de l'ensemble des paramètres du système de turbinage et du réseau d'eau. En même temps, la remise des documents et la transmission des instructions nécessaires à l'utilisation de l'installation par la ville de Pully sont prévues.

Un protocole de test similaire avec celui de l'automate de la turbine a été préparé et rempli lors de la mise en service de l'automate du nœud. Celui-ci a permis de valider l'ensemble des fonctionnalités et des sécurités prévues dans le programme de pilotage du système de turbinage et, chose indispensable, d'assurer la traçabilité des résultats. Le Tableau 16 et le Tableau 17 recensent les tests de fonctionnement du système effectués sur site le 5 octobre 2023, avec les mentions suivantes :

- Tests effectués : fonctionnalité et sécurité du programme de pilotage de l'automate du nœud sur site.
- Prototype : turbine DuoTurbo de Verney – Pully.
- Opération sur le site de Verney.
- Pilotage de la turbine par l'automate de Telsa en tandem avec l'automate du nœud de Verney programmé par Pilet.
- Pilotage du site de Davel par l'automate de Pilet dédié en tandem avec l'automate du nœud de Verney.
- Autorisation de turbinage transmise par l'automate du nœud de Pilet et par l'interface de la télégestion de Pully.



Tableau 13: Résumé des tests de fonctionnement standard du programme de pilotage du prototype de Verney, réalisés en laboratoire et sur site.

| Tests prévus/effectués | Conclusion | Remarques |
|--|------------|---|
| Démarrage de l'installation à distance | Ok | - |
| Arrêt de l'installation à distance | Ok | - |
| Démarrage de l'installation local | Ok | - |
| Arrêt de l'installation local | Ok | - |
| Mise en standby par arrêt de l'autorisation de turbinage | Ok | Valeur transmise par l'automate du nœud simulée (à modifier lors de la mise en service de l'automate du nœud). |
| Démarrage turbine par autorisation de turbinage | Ok | Valeur transmise par l'automate du nœud simulée (à modifier lors de la mise en service de l'automate du nœud). |
| Démarrage du système après un défaut | Ok | Plusieurs tests effectués après chaque défaut testé. |
| Fonctionnement en cas d'une surcharge de débit (22 l/s) | - | Impossible en laboratoire. Débit insuffisant sur le site lors de la mise en service. |
| Arrêt en raison d'un débit trop faible | Ok | Induite en modifiant les valeurs de consigne dans le programme. |
| Arrêt en raison d'un débit trop important | Ok | Induite en laboratoire en modifiant les valeurs de consigne dans le programme. Pas possible sur le site en raison d'un débit insuffisant lors de la mise en service. |
| Tests de transition entre les deux branches | Ok | Intervention manuelle sur les pilotes des réducteurs en laboratoire. Réglage des réducteurs de pression sur site avec les valeurs nécessaires et la consigne des pilotes à 4 mA. |
| Vérification des valeurs mesurées | Ok | Uniquement partiellement - impossible en laboratoire car les capteurs n'étaient pas raccordés. Valeurs du site de Verney vérifiées en totalité. Les valeurs provenant du site de Davel seront vérifiées lors de la mise en service de l'automate du nœud. |
| Vérification du MPPT | Ok | Test de régulation du MPPT effectué sur une plage de débit de 4.5 l/s à 14 l/s. Résultat légèrement différent de la courbe Pmax attendue, probablement en raison de la courbe Pmax théorique correspondante à celle de Savièse. Fonctionnement avec les nouveaux paramètres à vérifier sur le site une fois la mise en service finalisée. |
| Fonctionnement du EV1 (électrovanne amont Trimatic) | Ok | En laboratoire, réponse du relais correspondant cohérente. Fonctionnement complet (y compris le comportement en cas d'une coupure électrique) validé. |
| Fonctionnement du EV2 (électrovanne sur le pilot du réducteur de la branche turbine) | Ok | En laboratoire, réponse du relais correspondant cohérente. Fonctionnement validé sur le site. |
| Fonctionnement du EV3 (électrovanne de purge de la branche turbine) | Ok | En laboratoire, réponse du relais correspondant cohérente. Fonctionnement validé sur le site. |
| Respect générale du schéma logique | Ok | En laboratoire selon dernière version du schéma logique du 30.05.2023, ajustée sur place en même temps avec les corrections du programme de pilotage. Revalidé sur le site. |
| Communication à distance | - | Impossible en laboratoire. Opérationnel sur le site via la carte GSM. |
| Transitions rapides du débit de l'installation | Ok | En laboratoire, tests de réponse du pilotage avec un saut rapide du débit de min au max et vice versa. Pas possible sur le site en raison d'un débit insuffisant lors de la mise en service. |
| Mise à terre de l'installation | Ok | Valable pour l'installation dans le laboratoire. Selon le contrôle de l'électricien sur site. |



Tableau 14: Résumé des tests de sécurité du programme de pilotage du prototype de Verney, réalisés en laboratoire et sur site.

| Tests prévus/effectués | Conclusion | Remarques |
|---|------------|---|
| <i>*Effectués pendant la phase de turbinage normal avec comme conséquence une fermeture immédiate des deux électrovannes EV1 & EV2 et l'arrêt de la machine</i> | | |
| Coupure moteur 1 | - | Le Drive ne détecte pas la perte d'une ou de plusieurs phases du moteurs (fonction inactive dans le soft de convertisseurs pour plus de stabilité du pilotage). Impossible sur le site. |
| Coupure moteur 2 | - | Le Drive ne détecte pas la perte d'une ou de plusieurs phases du moteurs (fonction inactive dans le soft de convertisseurs pour plus de stabilité du pilotage). Impossible sur le site. |
| Arrêt d'urgence locale | Ok | Redémarrage de la turbine uniquement après Reset + Quittance. |
| Arrêt d'urgence à distance | Ok | |
| Alarme vibration | Ok | Déclenchée en secouant le capteur de vibration pendant quelques secondes. |
| Alarme fuites | Ok | Déclenchée en immergeant le capteur de détection de fuite. |
| Alarme emballement (Regen Enable == 0 && H > 0.5 bar) | Ok ! | Capteurs pour la mesure de H simulés en laboratoire. Alarme désactivée sur le site car en conflit avec les phases de démarrage de la machine. |
| Coupure d'électricité de la chambre | Ok ! | Provoquée en laboratoire par l'arrachage de la prise principale d'alimentation des armoires électriques de commande. Impossible sur le site lors de la mise en service. |
| Alarme rotor bloqué | Ok | Temps de déclenchement modifié pour éviter de fausses erreurs pendant les phases de transition. Temps de déclenchement fixé à 2 minutes à la fin des tests sur site. |
| Alarme erreur Regen | - | Impossible (fonctionnement du programme ok). |
| Alarme erreur Drive A/B | Ok | Par coupure des thermistances des moteurs. |
| Alarme Drive A/B enable/disable timeout | Ok ! | Testée en laboratoire mais pas sur site. |
| Alarme Regen enable/disable timeout | - | Impossible (fonctionnement du programme ok). |
| Alarme Drive A/B speed not reached | Ok ! | Moteur déconnecté électriquement en laboratoire. Pas testé sur le site. |
| Alarme CNA switch Off | Ok | Rotation des interrupteurs CNA. |
| Alarme external emergency stop | Ok | |
| Alarme défaut EV1 ouverture | Ok | |
| Alarme défaut EV1 fermeture | Ok | |
| Alarme perte communication avec l'automate du noeud | Ok ! | Pas possible en laboratoire. Testé sur site en enlevant le câble de communication entre les automates. |
| Alarme perte communication avec Drive A/B | Ok | Testée en enlevant le câble de communication entre les automates et les convertisseurs de fréquence. Reset avec le bouton sur place nécessaire pour rétablir la connexion. |
| Alarme perte communication avec Regen | Ok | |
| Alarme surcharge réseau électrique | Ok ! | En laboratoire, si f_reseau > 50.5 Hz. Impossible sur site. |
| Alarme erreur alimentation secourue 24 VDC | Ok | Sur site, disjoncteur de l'alimentation secourue 24 VDC descendu. |
| Alarme maintenance nécessaire | - | Impossible (après 10'000 h de fonctionnement). |



Tableau 15: Résumé des actions entreprises le 5 octobre 2023 lors de la mise en service finale du système de turbinage de Verney.

| No. | Intervenants | Actions | Observations | Etat |
|-----|---|--|---|------------------------|
| 1. | Pully, Pilet, Claval, BG, HES | Rendez-vous sur le site de Verney, sécurisation de l'accès et point sur la planification de la journée. | Signalisation routière et détecteur d'oxygène nécessaires ! | Effectué |
| 2. | Pully, Pilet, Claval, BG, HES | Réglage de la consigne des réducteurs de pression de Verney, de Davel et des chambres adjacentes nécessaires et tests de fonctionnement. | Réglage de la pression de travail de l'ensemble des réducteurs nécessaires selon le programme complet de fonctionnement de l'installation et tests de transition entre les chambres de Verney et de Davel selon les modes prédéfinis. | Finalisé |
| 3. | Pully, Pilet, Claval, BG, HES | Réglage et tests de fonctionnement des vannes de décharge de Verney et de Davel. | Réglage des seuils d'ouverture des vannes de décharge de Verney et de Davel et tests d'ouverture et de détection par les automates. | Finalisé |
| 4. | Pully, Pilet, BG, HES | Tests de mise en service de l'automate du nœud de Verney. | Vérification du fonctionnement de programme de pilotage de l'automate du nœud de Verney et tests de fonctionnement et de sécurité. | Finalisé |
| 5 | Pully, Pilet, BG, HES, (optionnel Telsa à distance) | Validation de la communication et du fonctionnement en tandem des automates du nœud et de la turbine. | Vérification des valeurs mesurées et transmises par les automates des nœuds Verney et Davel ainsi que par l'automate de la turbine. La communication entre les automates a été validée partiellement. Pilet et Telsa finaliseront la transmission entre les automates de l'ensemble des variables selon les instructions reçues. | Finalisé partiellement |
| 6 | Pully, Pilet, BG, HES | Validation de la communication entre l'automate du nœud et l'interface du système de télégestion de Pully. | Vérification des valeurs transmises par l'automate du nœud de Verney vers l'interface de télégestion de Pully et du pilotage de l'installation à distance. La communication entre les automates des nœuds de Verney et de Davel et l'interface de télégestion de Pully a été validée partiellement. Pilet finalisera la communication entre les automates et l'interface de gestion selon les instructions reçues. | Finalisé partiellement |
| 7 | Pully, Pilet, BG, HES | Validation/tests de l'introduction électrique du site de Verney. | Présence de l'électricien de Pully nécessaire ! Les tests de coupure d'électricité de la chambre n'ont pas été effectués. Le compteur électrique a été confirmé comme étant bidirectionnel. Le dossier électrique de l'installation sera finalisé par l'électricien mandaté. | Finalisé |
| 8 | Pully, Pilet, BG, HES | Point de la journée et sécurisation de l'installation et du site | Mise au propre de l'installation et de la chambre effectuée par HES et Pilet. Système de turbinage laissé en fonctionnement permanent autonome. | Effectué |



Tableau 16: Résumé des tests de fonctionnement standard du programme de pilotage du nœud de Verney, réalisés sur site.

| Tests prévus/effectués | Conclusion | Remarques |
|--|------------|--|
| Consigne de pression de sortie du réducteur RP1 | Ok | Consignes de réglage du réducteur de la turbine (RP1) de Verney : 3.3 bars ... 4 mA, 7.3 bars ... 20 mA |
| Consigne de pression de sortie du réducteur RP2 | Ok | Consignes de réglage du réducteur de by-pass (RP2) de Verney : 2.8 bars ... 4 mA, 6.8 bars ... 20 mA |
| Démarrage de l'installation en mode sans pilotage (M=1) | Ok | |
| Arrêt du turbinage local (M=0) | Ok | |
| Arrêt du turbinage à distance (M=0) | Ok | |
| Démarrage de l'installation en mode pilotage jour/nuit (M=2) | Ok | Réglage de la plage horaire pour le mode jour de 06h00 à 22h00, ajustable si nécessaire. |
| Fonctionnement automatique en mode jour | Ok | |
| Fonctionnement automatique en mode nuit | Ok | |
| Tests de transition entre les chambres | Ok | |
| Vérification des valeurs mesurées Verney (capteurs + automate Telsa) | Ok ! | Liste complète des variables transmises entre les automates à revérifier à distance par Telsa & Pilet. |
| Vérification des valeurs mesurées Davel | Ok | |
| Respect générale du schéma logique | Ok | Schéma logique du programme de l'automate du nœud ajustée légèrement (simplification). Le schéma logique et le document descriptif des fonctionnalité et sécurité seront mis à jour. |
| Communication à distance | Ok | Via la fibre optique mise à disposition par Pully. |
| Reprise message alarme automate turbine | Ok ! | A rajouter par Pilet, à l'aide de Telsa. |
| Consigne de pression de sortie du réducteur RP2 de Davel | Ok | Consignes de réglage du réducteur RP2 de Davel : 2 bars ... 4 mA, 6 bars ... 20 mA |
| Mesure des temps de réglage des réducteurs sur toute la plage de travail | Ok | Valeur mesurée supérieure à 20s. |



Tableau 17: Résumé des tests de sécurité du programme de pilotage du nœud de Verney, réalisés sur site.

| Tests prévus/effectués | Conclusion | Remarques |
|---|------------|--|
| <i>* Effectués pendant la phase de turbinage normal avec comme conséquence un ordre d'arrêt de la turbine et mise en mode stand-by des réducteurs</i> | | |
| Alarme ouverture vanne surpression PRV3 Verney | Ok | Valeur de pression d'ouverture réglée à 6 bars à Verney. |
| Alarme ouverture vanne surpression PRV3 Davel | Ok | Pas d'arrêt nécessaire. Valeur de pression d'ouverture réglée à 5 bars à Davel. |
| Coupure d'électricité de la chambre | Ok ! | Pas possible car il manque un disjoncteur principal dans les armoires du système de turbinage. |
| Alarme perte communication avec l'automate de la turbine | Ok | |
| Alarme perte communication avec l'automate de Davel | Ok | Pas d'arrêt nécessaire. La communication se fait via l'interface de télégestion de Pully. |
| Alarme perte communication avec la télégestion | Ok | Arrêt de l'installation si plus de 1h. |
| Alarme défaut PRV1 feedback | Ok | Si perte de communication du signal 4..20 mA, retour en position stand-by. |
| Alarme défaut PRV2 feedback | Ok | Si perte de communication du signal 4..20 mA, retour en position stand-by. |
| Alarme erreur PRV1 setpoint timeout | - | |
| Alarme erreur PRV2 setpoint timeout | - | |
| Alarme erreur alimentation secourue 24 VDC | Ok | Induite par la coupure de l'alimentation 230 VAC du chargeur de la batterie. |
| Alarme DuoTurbo Not OK | Ok ! | Transmise par l'automate de la turbine. A coder par Pilet & Telsa. |
| Alarme inondation de la chambre | Ok ! | Câblage manquant dans l'armoire électrique. Telsa effectuera la correction. Détection du signal validée par Pilet. |



4.4.3 T4.3 Mesures de performance sur site et surveillance

Mesures sur la chambre Davel en 2021

En attendant de pouvoir réaliser des mesures de performance, pour valider le bon fonctionnement du prototype de Verney et de l'ensemble du système intégré dans le réseau maillé de distribution d'eau, le temps que la chambre soit construite, l'appareillage installé et la turbine mise en service, il a été jugé utile d'instrumenter et de surveiller le comportement dans un premier temps de la chambre parallèle de Davel, et par la suite de celle de Verney.

Sur la Figure 46, le réseau d'alimentation en eau potable de la commune de Pully dans le secteur des chambres coup-pression de Davel et de Verney est illustré, avec en bleu le secteur inférieur desservi. Sur l'image de gauche, on y voit l'accès dans la chambre de Davel enterrée sous la route, indiquées sur la carte avec le point bleu.



Figure 46 Illustration du secteur alimenté en eau potable par la chambre coup-pression de Davel avec la situation des vannes et image de l'accès à la chambre.

La chambre de Verney, où a été installée la turbine, est représentée au point 3, sur le même palier de pression que la chambre de Davel. Concernant le secteur de Davel sur lequel des mesures ont été

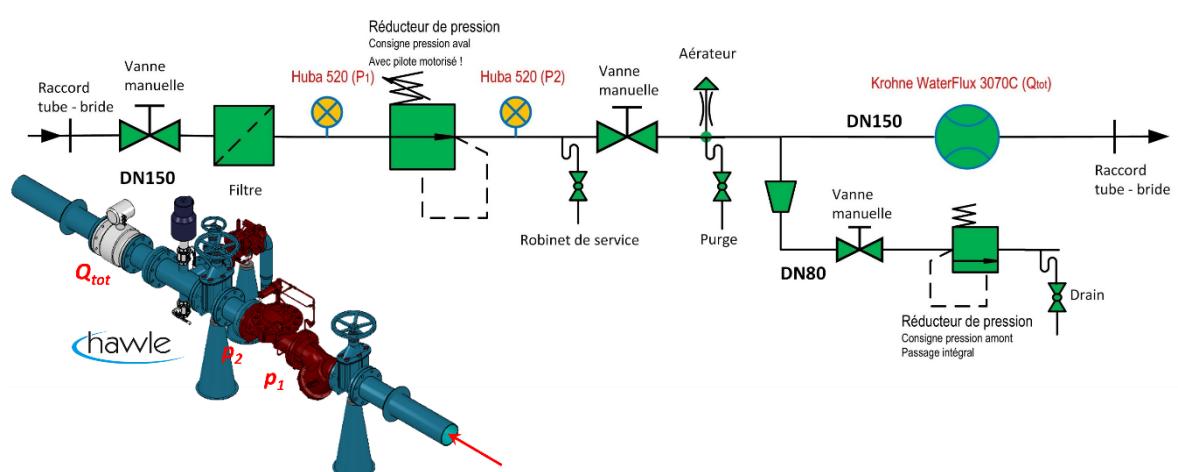


Figure 47 Schéma hydraulique de principe avec instrumentation et composants du site de Davel (vue isométrique fournie par la maison Hawle, l'appareilleur mandaté par la commune pour l'équipement du site).



effectuées par intermittence entre janvier 2021 et septembre 2022, les vannes localisées aux points 6, 6', 7, 8 et 9 ont été fermées. À noter encore qu'en terme de consommation, en plus des habitations, une STEP et une piscine publique sont desservies par ce nœud.

Sur la Figure 47, le schéma hydraulique de l'installation de la chambre de Davel ainsi qu'une vue isométrique des composants sont fournis. On peut y mentionner en suivant la direction de l'écoulement une vanne manuelle suivie par un filtre et par le réducteur de pression principal avec une consigne de régulation de pression aval. A l'aval, une deuxième vanne manuelle est installée, permettant ainsi la maintenance du réducteur sans devoir vider l'ensemble du secteur. Vient ensuite une bifurcation pour l'installation d'un deuxième réducteur de pression avec une consigne de régulation de pression amont, faisant office de soupape de sécurité contre la surpression en cas de phénomènes transitoires. Un débitmètre électromagnétique se trouve tout en aval de l'installation, avant la sortie de la chambre. La position de deux capteurs de pression statique Huba Control 520 ainsi que du débitmètre électromagnétique Krohne WaterFlux 3070C sont également indiqués. À noter ici que ces instruments ont déjà été prévus dans cette chambre dans le cadre d'une action de mise en place d'un monitoring global du fonctionnement de l'ensemble du réseau, prévu par la commune de Pully.

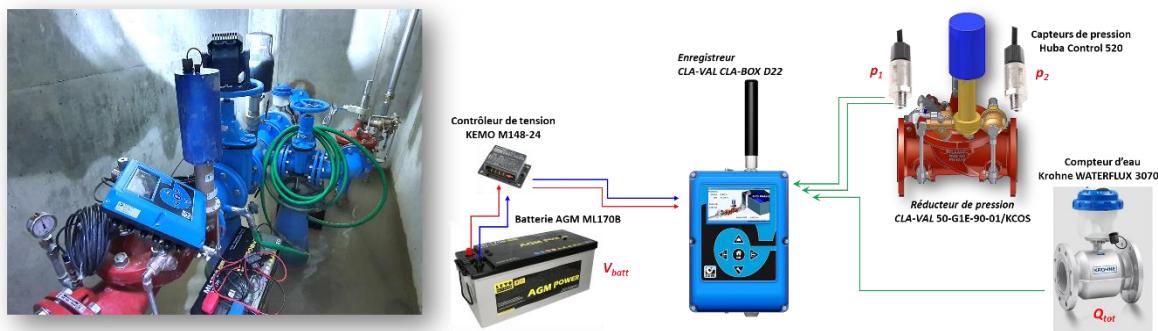


Figure 48 Architecture du système de mesure autonome déployé sur le site de Davel.

Tableau 18: Caractéristiques principales des composantes utilisées pour les mesures sur le site de Davel.

| Composante | Fabricant | Type | Caractéristiques | Configuration |
|--------------------------------|-----------------|------------------|---|---|
| Alimentation électrique | | | | |
| Batterie | LEVO Batterien | AGM Power ML170B | Tension nominale de 12 VDC Autonomie de 170 AH | - |
| Module de protection | KEMO Electronic | M148-24 | Protection pour batteries de 12 VDC ou de 24 VDC | Coupe à 10.6 VDC Réenclenchement à 11.9 VDC |
| Instrumentation | | | | |
| Débitmètre | Krohne | WaterFlux 3070 C | Compteur d'eau électromagnétique, DN 150 mm Alimenté par sa propre batterie Sortie en impulsions Câble spécial Krohne nécessaire | Durée des impulsions: 5 ms Quantité: 100 l/impulsion Limite inférieure de mesure: 10 mm/s |
| Capteurs de pression | Huba Control | 520 | Mesure de statique pressure relative Alimentation en 7..33 VDC Sortie en 4..20 mA | Plage de mesure: 0..16 bars |
| Acquisition des données | | | | |
| Enregistreur autonome | Cla-Val | CLA-BOX D22 | 6x AI 4-20 mA / 0-5 V / 0-10 V Résolution 10 bits 6x TOR (max. 5 VDC ...) 4x AO 4-20 mA - résolution 10 bits 2x Electrovannes relais statiques 24 VCC 0,5 A 2x Relais mécaniques 24 VDC - 240 VAC @ 1 A max Mémoire de 2GB avec carte SD | 2x AI 4..20 mA (pression) 1x TOR (débit) Échantillonnage: 1 Hz Enregistrement: continu |

L'architecture globale du système de mesure autonome mis en place dans la chambre de Davel est illustrée sur la Figure 48. En l'absence d'une alimentation électrique permanente pendant la période 66/87



des mesures dans la chambre, il a fallu prévoir une alimentation temporaire par batterie. Ainsi, un accumulateur de haute capacité Levo AGM Power ML170B et un module de contrôle de tension pour le protéger contre la décharge profonde, ont été utilisés. L'acquisition continue avec une cadence de 1 Hz a été effectuée avec un enregistreur autonome Cla-Box D22, mis à disposition par ClaVal. L'ensemble des caractéristiques des composants du système de mesure, mis en place, sont fournies dans le Tableau 18.

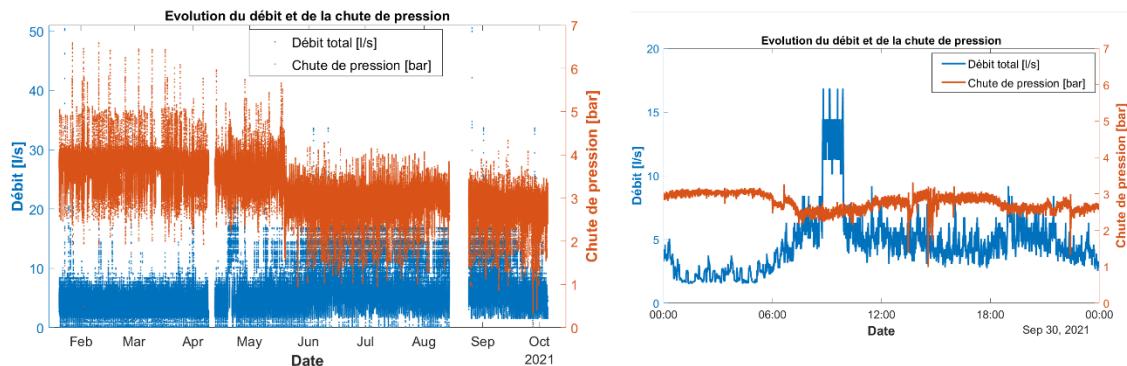


Figure 49 Historique du débit et de la chute de pression du site de Davel du 20 janvier au 5 octobre 2021 et pour une journée avec variation importante de débit.

L'historique des variations du débit et de la chute de pression statique sur le réducteur de pression de Davel, pour la période d'enregistrement janvier-octobre 2021, est présenté sur la Figure 49. On peut y observer que deux comportements différents se distinguent. De plus, le débit enregistré est supérieur à partir du mois de mai. Ensuite, la figure de droite, présentant l'historique de débit et de la chute le 30 septembre 2021, montre que pour une augmentation importante du débit, la chute ne descend pas forcément, comme il serait caractéristique dans un système alimenté par un réservoir avec surface libre. Ceci est un comportement typique d'un réseau maillé avec plusieurs paliers de pression et plusieurs points d'alimentation. La chute de pression du janvier à mai est supérieure à celle de la période suivante, en raison d'un changement de la pression de consigne de réglage par la commune. Un autre aspect, capté par ces mesures, est représenté par les pics de débit de 50 l/s enregistrés respectivement le 23 janvier & le 26 août 2021 (voir Figure 50), probablement source d'un soutirage très important avec les bornes hydrant.

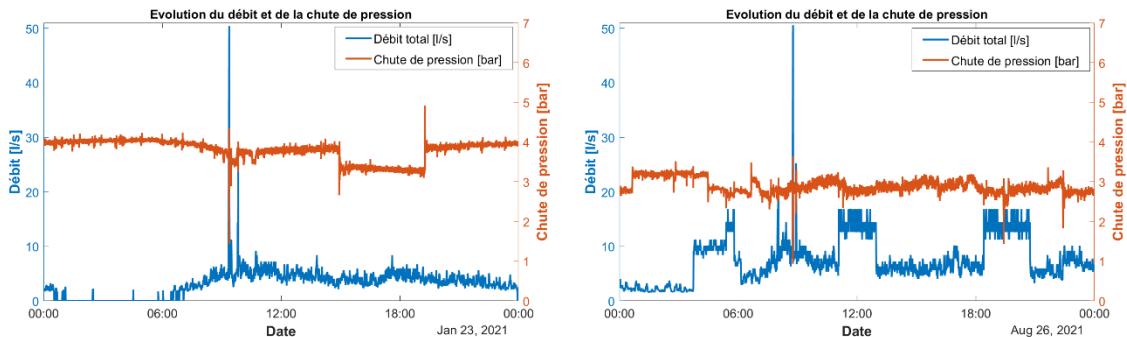


Figure 50 Historique du débit et de la chute de pression du site de Davel – 23 janvier & 26 août 2021.

Concernant les valeurs de débit enregistrées pendant la nuit, on peut y observer que le débit minimum ne descend pas plus bas que 1.5 l/s pendant les dernières deux mois d'enregistrement (raisons probables : nouvelle configuration du réseau ou d'un gros consommateur).



Enfin, la Figure 51, présentant l'historique des variations pour une journée sans évènement particulier, montre une chute moyenne de 3 bars pour un débit variant entre 1.5 l/s et 9 l/s avec deux périodes de plus grande consommation vers midi et le soir.

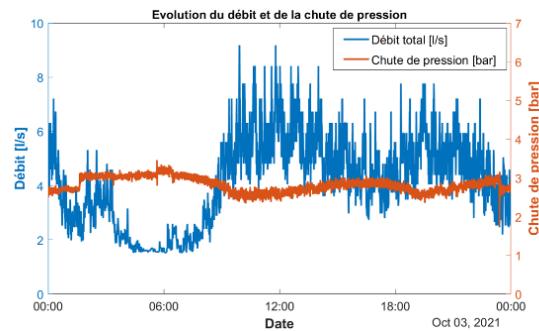


Figure 51 Historique du débit et de la chute de pression du site de Davel pour le 3 octobre 2021 – journée sans évènement particulier.

L'historique des pressions statiques en amont et en aval du réducteur, sur toute la période d'enregistrement, est fourni sur la Figure 52. La pression aval est très stable, autour de 4 bars sur toute la période. En revanche, la pression amont montre plus de variation, avec un niveau moyen plus bas depuis le 20 mai 2021, en raison d'un changement de consigne de régulation de pression au palier supérieur.

Sur la Figure 53, la relation de dépendance entre la chute et le débit sur le site de Davel est présentée à partir des données enregistrées sur toute la période janvier-octobre 2021. Le résultat est bien différent d'un cas avec un réservoir avec surface libre en amont du site, l'effet de la présence d'un réducteur amont étant bien visible.

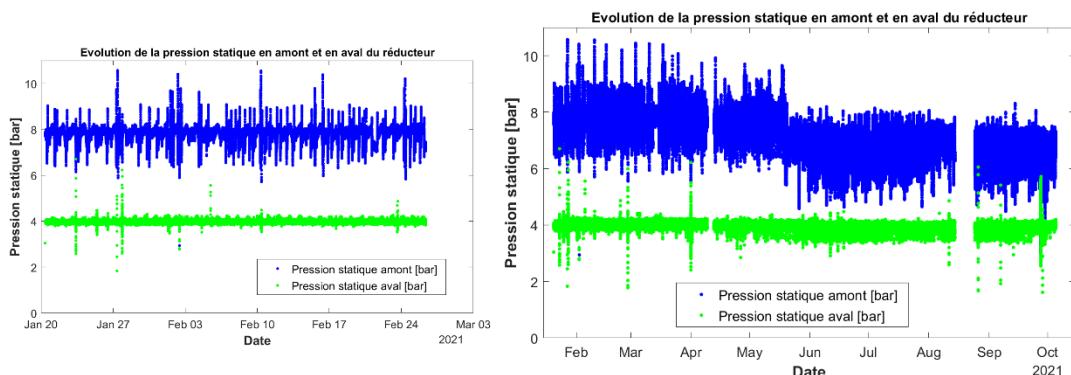


Figure 52 Historique des pressions en amont et en aval du réducteur du site de Davel du 20 janvier au 26 février et jusqu'au octobre 2021.

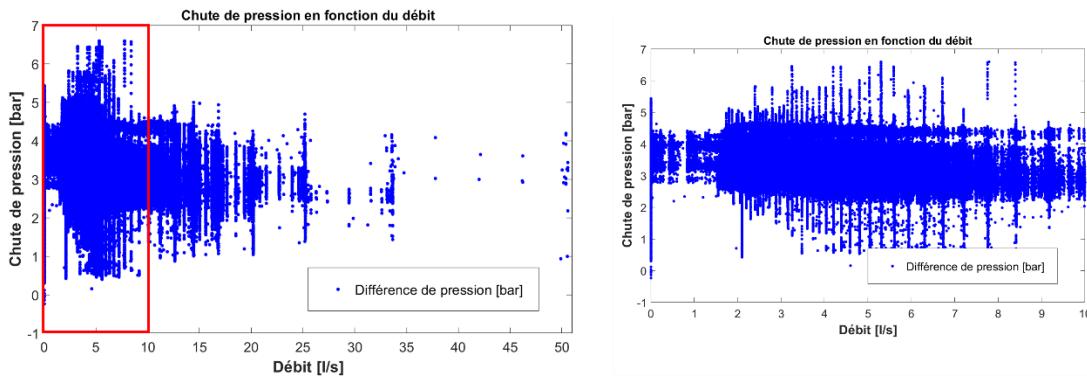


Figure 53 Relation chute-débit du site de Davel (données sur la période janvier-octobre 2021).

Sur la base des données récoltées sur deux périodes avec comportement distinct, respectivement janvier-février et encore juin-octobre, les profils journaliers de débit (Figure 54) et de puissance hydraulique (Figure 56) ont été tracés. Si la forme de la distribution générale au long de la journée semble rester semblable entre les deux périodes, le débit moyen est généralement presque deux fois plus grand entre juin-octobre par rapport à la période janvier-février. Pour la puissance hydraulique, le facteur d'augmentation est inférieur en raison de la diminution de la pression amont, impactant directement la chute disponible.

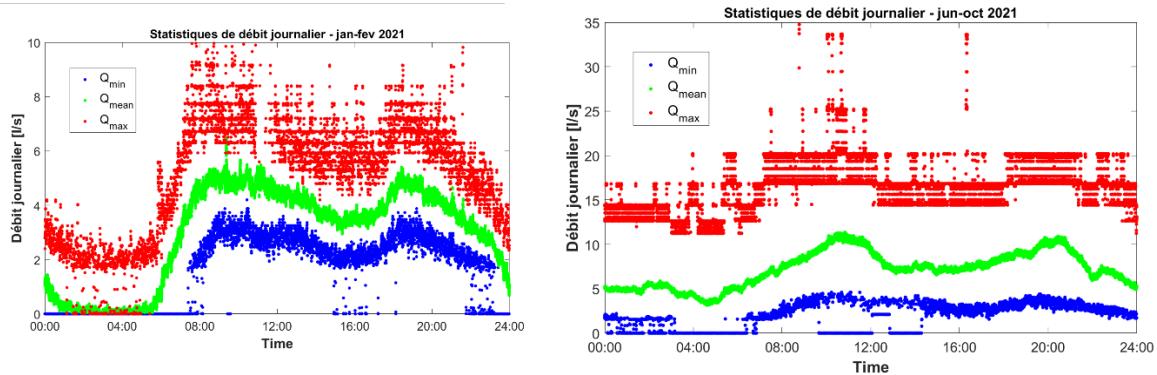


Figure 54 Profil de débit journalier du site de Davel - période janvier-février et juin-octobre 2021.

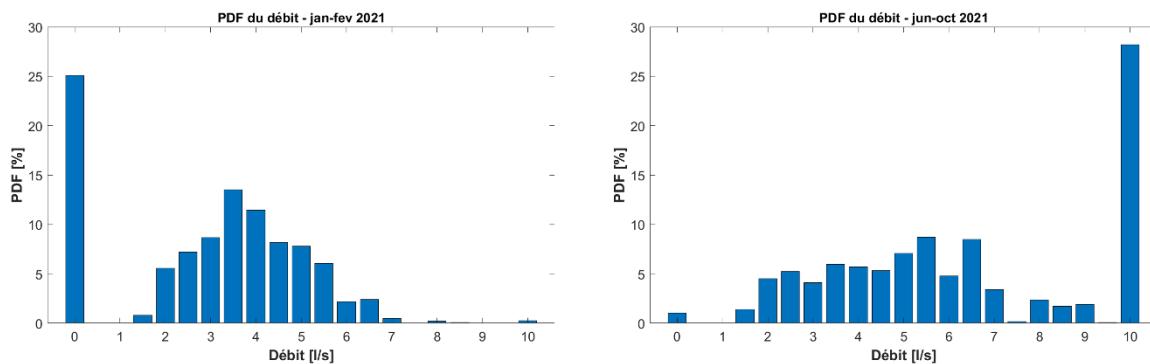


Figure 55 Profil de débit journalier du site de Davel - période janvier-février et juin-octobre 2021.

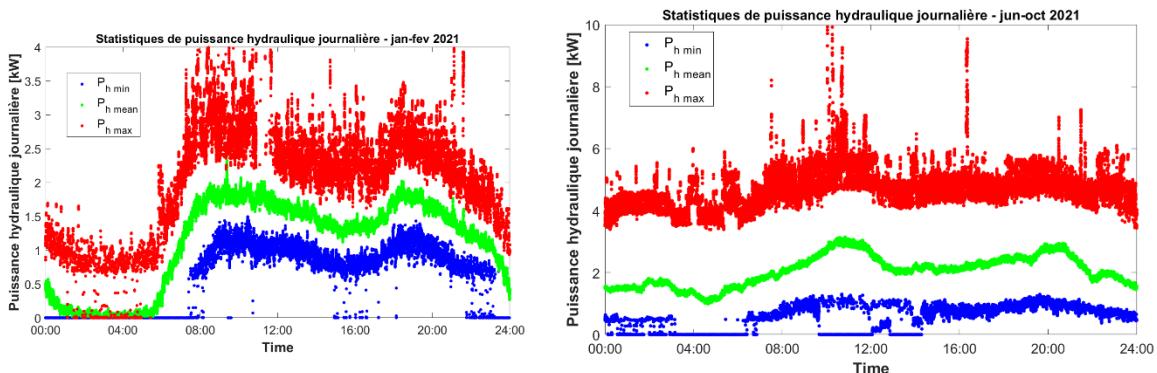


Figure 56 Profil journalier de puissance hydraulique disponible du site de Davel - période janvier-février et juin-octobre 2021.

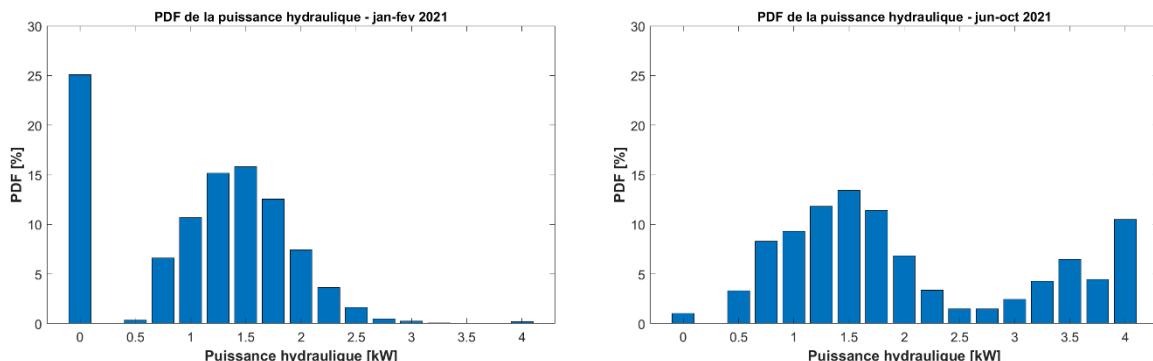


Figure 57 Profil journalier de puissance hydraulique disponible du site de Davel - période janvier-février et juin-octobre 2021.

Enfin, sur la Figure 55 et la Figure 57 sont présentées les densités de probabilité des débits et de la puissance hydraulique pour les deux mêmes périodes de janvier au février et de juin à octobre, montrant une disponibilité des débits et des puissances hydrauliques associées bien différente.

Pour extrapoler les consommations une fois les deux chambres en service, en se basant sur les mesures réalisées au niveau de la chambre de Davel, les hypothèses suivantes ont été considérées :

- Relation de surfaces des secteurs alimentés : le secteur temporaire Davel représente 44% du secteur Montétan inférieur futur.
- Selon les données reçues de la Ville de Pully, la STEP, qui est dans le secteur alimenté par Davel lors des mesures, a une consommation moyenne de $26 \text{ m}^3/\text{j}$. Il est considéré que l'opération journalière de la STEP est de l'ordre de 16h, ce qui se traduit par une consommation horaire de 0.4 l/s.

La Figure 58, à gauche, présente l'extrapolation des données mesurées entre janvier et février 2021 avec des pas de temps horaires, avec et sans l'hypothèse du fonctionnement de la STEP en tant que grand consommateur. La courbe de débits classés estimée en 2019 lors de l'étude d'opportunité est aussi représentée (en noir) sur la même figure. L'adaptation est bonne pour cette période. Cependant, si la période est étendue jusqu'à juillet, les débits augmentent considérablement et la courbe diffère significativement de la courbe estimée en 2019 – Figure 58 à droite.

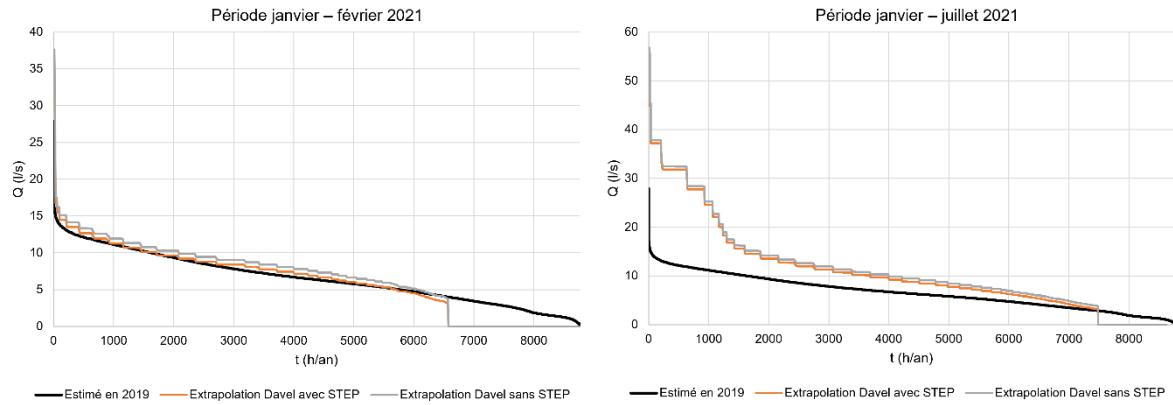


Figure 58 Courbes des débits classées sur Davel sur deux périodes différentes en 2021.

Mesures sur les chambres Verney et Davel en 2022 et 2023

En parallèle avec les mesures effectuées au niveau de la chambre de Davel depuis janvier 2021, un deuxième système d'acquisition autonome a été installé dans la chambre de Verney en août 2022. Les valeurs des capteurs de pression P_3 et P_4 situés en amont et en aval du réducteur de pression de bypass, ainsi que du débitmètre Q_1 , mesurant le débit total de la chambre, ont été enregistrées par intermittence avec une cadence de 1 Hz (état de transit de la chambre sans la turbine) jusqu'au mois de mars 2023.

La Figure 59 présente la courbe de débits classés de la somme des débits mesurés à Verney et Davel dans la période août-septembre 2022. La courbe obtenue est en moyenne 10 l/s plus élevée que la courbe estimée en 2019, démontrant de nouveau une différence importante par rapport aux débits estimés lors de l'étude d'opportunité.

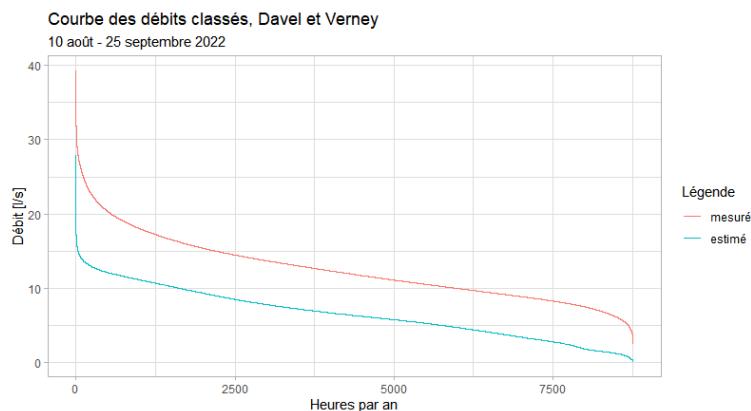


Figure 59 Courbes des débits classées aux chambres de Verney et de Davel pendant la première phase d'essais.

Nous concluons ainsi que le réseau de Montétan inférieur a plus de consommation que l'estimation de 2019. Néanmoins, les mesures à Davel en 2021 ont été uniquement réalisées lors du mois d'août, ce qui ne permet pas de vérifier si la différence est justifiée par des consommations estivales telles que des fontaines, piscines ou irrigation. Les mesures réalisées en 2021 montraient cependant déjà une augmentation des débits de consommation : les valeurs des mois de janvier et de février présentaient une bonne concordance avec l'estimation mais pas les mesures des mois suivants.



Des explications peuvent être trouvées sur des erreurs sur les hypothèses de base lors de l'étude d'opportunité : les extrapolations vers un futur secteur Montetan inférieur ont été faites en fonction des données au niveau des prises d'eau du réseau de Pully et des proportions en fonction du nombre d'abonnés identifiés dans des études précédentes. Ces estimations étaient cohérentes avec les demandes moyennes d'eau potable par habitant. La présence de grands consommateurs dans le secteur Montetan néanmoins n'avait pas été prise en compte. L'évolution de la consommation d'eau potable de manière générale peut aussi expliquer une partie des différentes observées.

Les consommations d'eau dans ce type de projet impactent le choix du point de fonctionnement de la machine. Le débit dans le réseau a un impact sur la pression disponible en amont et sur la durée possible de turbinage. Avoir des mesures fiables du débit se révèle ainsi très important pour avoir une vision de la rentabilité et de l'importance de la saisonnalité et de la présence de grands consommateurs.

Mesures de terrain le 17 août 2022

Une des questions importantes pour le projet est l'effet réel de la priorisation des chambres de Davel et de Verney. Avant l'installation des vannes sur place, le réglage des pressions disponibles a été estimé sur la base du modèle numérique (voir chapitre 4.2.4). Le modèle a cependant des limitations liées à des hypothèses simplificatrices.

Le 17 août 2022, des essais sur site ont été réalisés avec les deux chambres Davel et Verney en place et équipées avec des vannes ClaVal. Cette journée de terrain a été réalisée avant l'installation de la DuoTurbo ; dans la chambre Verney seule la vanne de by-pass a été manipulée.

L'objectif de ces essais était de réaliser des changements progressifs sur la vanne de Verney et de profiter des capteurs de pression et de débit dans les deux chambres pour vérifier son influence sur le réseau. Ces résultats ont ensuite été comparés aux estimations du modèle numérique.

Les deux chambres ne se situent pas à la même altitude, l'altitude des deux vannes a été évalué :

- à droite de la chambre de Verney, le MNT swissALTI3D est à 404.4 msm. La profondeur de l'axe de la vanne par rapport au terrain en surface est de 2.25 m. L'axe de la vanne est ainsi estimé à 402.15 msm.
- à droite de la chambre de Davel, le MNT swissALTI3D est à 412.1 msm. La profondeur de l'axe de la vanne par rapport au terrain en surface est de 4.7 m. L'axe de la vanne est ainsi estimé à 416.8 msm.

Les équipements de mesures décrits dans les chapitres précédents étaient actifs pendant ces essais.

La configuration au démarrage des essais (09h43) était de :

- Pression amont Verney : 7.1 bar
- Pression aval Verney : 4.5 bar
- Débit à Verney : 34 m³/h
- Pression amont Davel : 5.9 bar
- Pression aval Davel : 3.6 bar
- Débit à Davel : 40.4 m³/h

Une première phase de tests a été réalisée en augmentant progressivement la consigne de la vanne de Verney. La distribution des débits mesurées est présentée sur la Figure 60 à gauche et les pressions mesurées, transformées en niveaux de pression compte tenu de l'altitude des équipements, sur celle de droite. La pression aval de Verney est ajoutée à la Figure 60 à gauche pour faciliter la lecture et identifier les instants où la consigne sur cette pression est modifiée. La chambre de Davel était priorisée durant toute la durée des essais. Le débit total a varié autour d'une valeur moyenne de 80 m³/h.

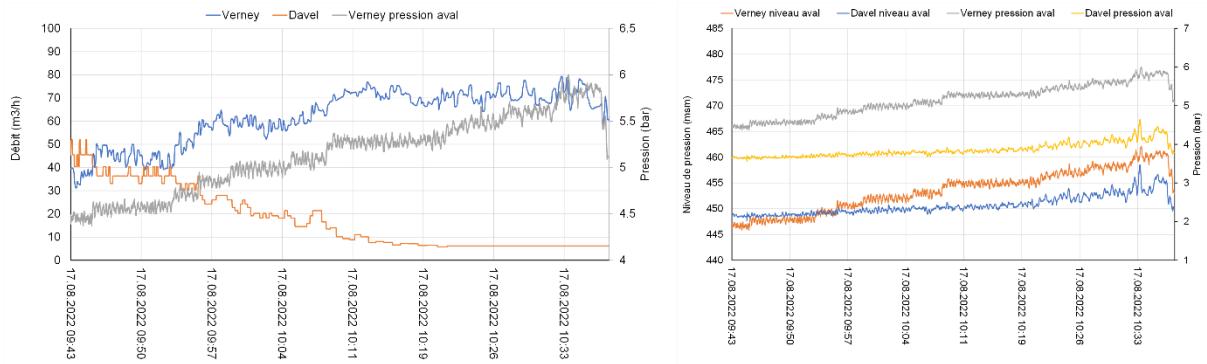


Figure 60 Débits (gauche) et pressions aval (droite) mesurés aux chambres de Verney et Davel pendant la première phase d'essais.

Pour évaluer si le modèle numérique représente correctement la distribution des débits selon les consignes de pression, une comparaison entre les données mesurées et les résultats obtenus avec le modèle a été réalisée.

Les conditions de consignes et débits trouvés le 17 août 2022 ont ainsi été reportées dans le modèle. Selon les mesures, la pression à l'aval de la chambre de Davel a varié entre 3.6 et 4 bar (448.25 et 452.12 msm en niveau) avant que la vanne se ferme complètement. Cette variation de 0.4 bar rend difficile l'estimation avec certitude de la consigne de pression aval à Davel. Pour l'analyse des résultats et la comparaison avec le modèle, il est supposé une consigne de 3.7 bar (449.1 msm). Pour la chambre de Verney, il a été supposé que la mesure de pression au début des mesures (4.5 bar, correspondant à 478.71 msm) est la consigne de Verney.

La Figure 61 à gauche présente la relation entre la pression la pression aval Verney et les débits à Davel, selon les mesures et le modèle numérique. Le débit total a varié entre 20.4 et 24.7 l/s. Deux courbes de modèle sont présentées, pour 22 l/s et pour 25 l/s. La figure à droite présente la même information exprimée en différence de niveau de pression entre Davel et Verney.

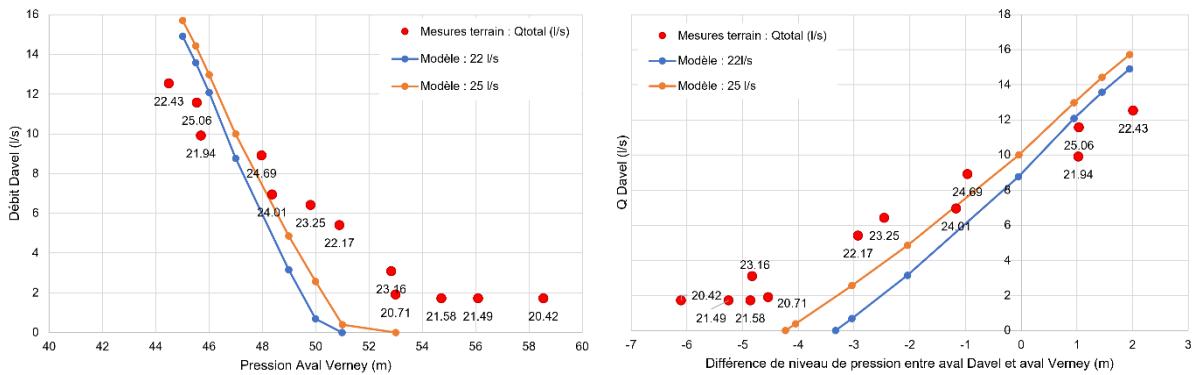


Figure 61 Comparaison modèle – mesures : relation Pression aval Verney – Débits à Davel (gauche) ; relation Différence de pression aval entre Davel et Verney – Débits à Davel (droite).

Pendant les mesures, un monitoring a été réalisé au niveau des deux chambres. Les débits mesurés de 1.71 l/s ont été interprétés sur le terrain comme nuls. Les mesures ont également une certaine dispersion, qui s'explique par la variation des débits totaux et des incertitudes des instruments de mesure. Le modèle numérique diffère des mesures : la pente de la ligne définie par les points supérieurs à 1.7 l/s diffère des pentes du modèle numérique. Quand la chambre de Davel est priorisée (différence de niveau entre aval Davel et aval Verney positive), le débit à Davel modélisé est supérieur au débit mesuré. Lorsque c'est la chambre de Verney qui est priorisée (différence de niveau entre aval Davel et



aval Verney négative), le débit à Davel modélisé est inférieur à celui mesuré. Le modèle tend ainsi à favoriser excessivement la chambre priorisée, ce qui peut être expliqué par des coefficients de perte de charge dans le modèle plus faibles qu'en réalité. À noter, néanmoins, que l'erreur induit par le modèle est relativement faible : la différence de niveau de pression à corriger pour obtenir la distribution des débits mesurée est de l'ordre de 1.5 m.

Dans la deuxième phase des essais de terrain, le 17 août 2022, la consigne de Verney a été remise à son état initial et une borne hydrante proche de la chambre Verney a été ouverte. La distribution des débits mesurées est présentée sur la Figure 62 à gauche et les pressions mesurées, transformées en niveaux de pression compte tenu de l'altitude des équipements, sont présentées à droite.

Le débit total a atteint 161 m³/h, 90 m³/h à Davel et 72 m³/h à Verney. Davel a réagi d'abord, avec une pression qui a diminué de 3.6 bar à 3.2 bar, puis Verney 5s après (valeurs approximatives car la synchronisation entre toutes ces mesures n'est pas garantie), avec la pression diminuée de 4.5 bar à 4.2 bar.

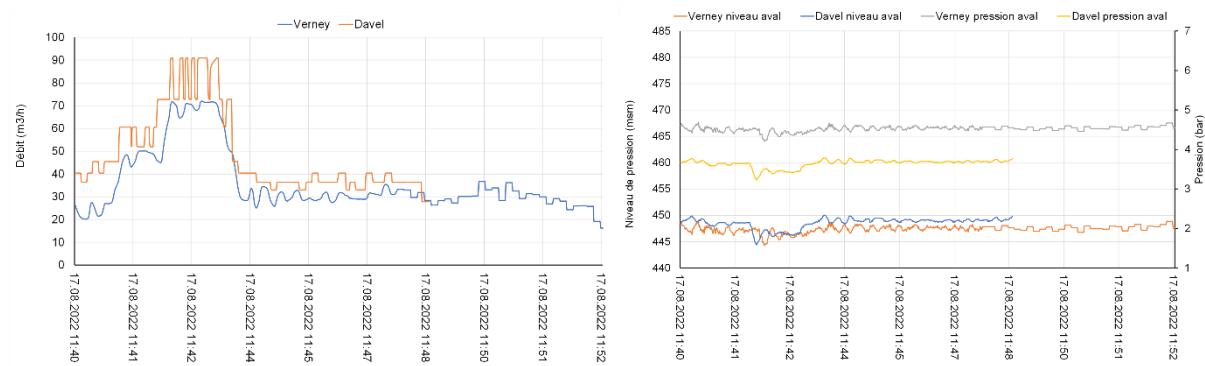


Figure 62 Débits (gauche) et pressions aval (droite) mesurés aux chambres de Verney et Davel pendant la deuxième phase d'essais.

En modélisant numériquement une consommation à la borne hydrante de 82 m³/h et une consommation de base du secteur Montetan inférieur de 81 m³/h, le résultat est une répartition des débits de 66 m³/h sur Davel et 94 m³/h sur Verney. La chambre de Verney est plus favorisée dans le modèle même si c'est Davel qui est priorisée en pression : la borne hydrante qui a été actionnée est beaucoup plus proche de Verney. Une rugosité trop faible peut de nouveau justifier cette différence.

Mesures sur la turbine installée dans la chambre de Verney

Des mesures de performance, pour valider le bon fonctionnement du prototype DuoTurbo de Verney et de l'ensemble du système intégré dans le réseau maillé de distribution d'eau de Pully, ont été réalisées pendant plusieurs semaines après l'installation et la mise en service finale de la machine. Ces mesures ont été effectuées à l'aide de plusieurs capteurs (voir le paragraphe 4.1.2 - Figure 9) servant à la fois au pilotage de l'installation en toute sécurité et à la surveillance du comportement du système à long terme.

Les valeurs des différentes mesures (hydrauliques, mécaniques, électriques, etc.) ont été enregistrées avec une cadence variable allant de quelques dizaines de secondes à toutes les 15 minutes, en fonction principalement de la variation entre deux valeurs consécutives. Ce système de stockage des données, implémenté dans l'automate de la turbine, permet l'enregistrement d'un maximum de valeurs avec un minimum d'espace disque requis. De plus, ces mesures permettent un suivi du fonctionnement en temps réel de l'installation et une analyse ultérieure des statistiques de performance du système de turbinage.



La Figure 63 présente l'Interface Homme-Machine (IHM) – l'interface de contrôle/commande de la turbine développée et adaptée par Telsa pour ce site. Cette fenêtre permet de visualiser les valeurs principales mesurées sur site et l'état de la turbine, ainsi que d'arrêter, de quittancer les erreurs ou réenclencher le turbinage. L'ensemble des fonctions habituelle de contrôle-commande ont été intégrées et rendues disponibles à travers les différentes pages de cette interface interactive.

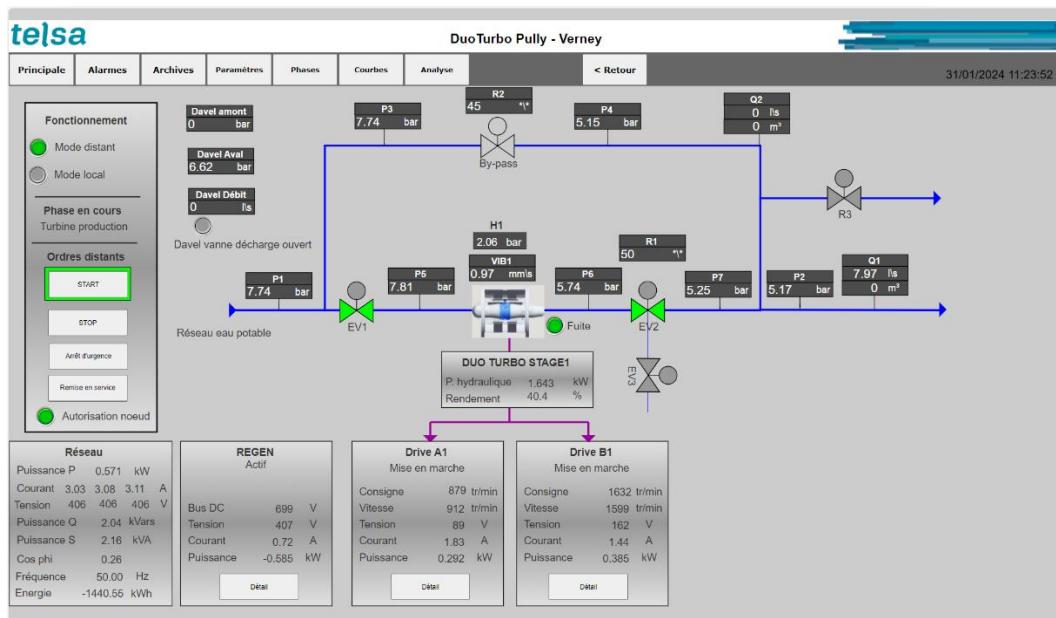


Figure 63 l'Interface Homme-Machine (IHM) de contrôle/commande de la turbine de Verney à Pully.

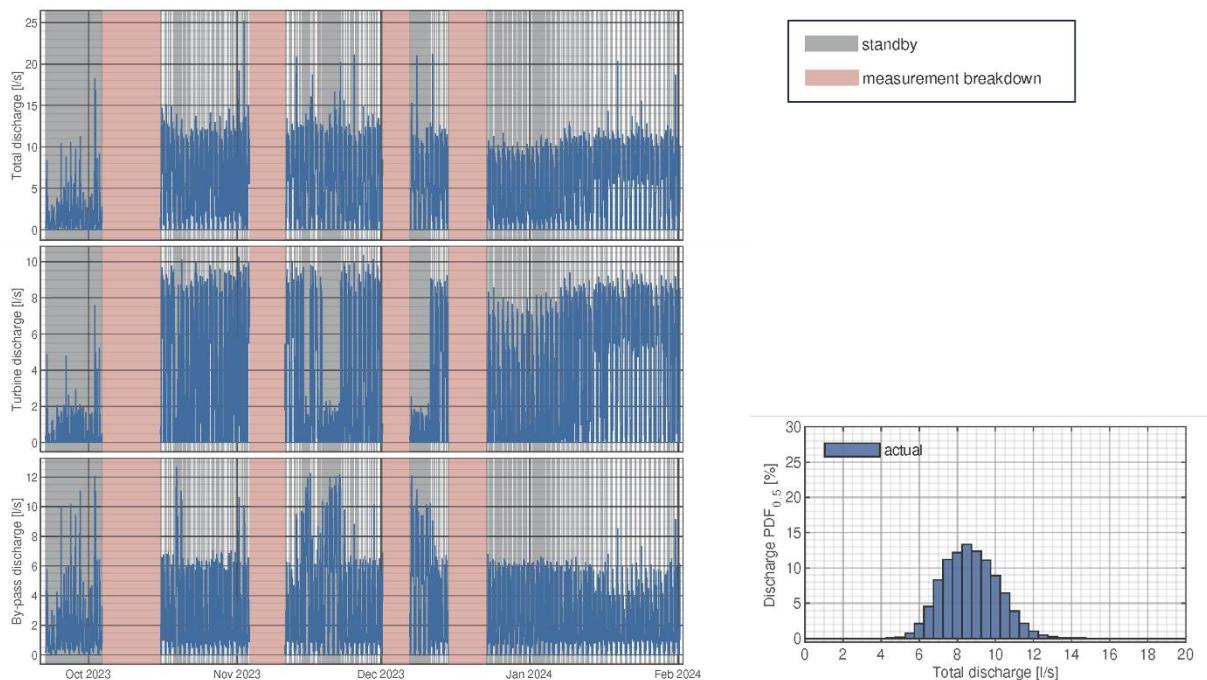


Figure 64 Historique du débit total, du débit turbiné et du débit de by-pass (gauche) et distribution du débit total (droite) sur le site de Verney à Pully sur la période 22.09.23 – 01.02.24.



L'historique des valeurs du débit total, du débit de bypass et du débit turbiné (obtenu par la différence entre les deux premières) sur la période 22 septembre 2023 – 1^{er} février 2024 est fourni sur la Figure 64. La distribution des débits pendant toute cette période de monitoring est également représentée dans le graphique de droite. Les zones hachurées en gris représentent les périodes pendant lesquelles la machine ne fonctionnait pas, soit en raison d'un débit insuffisant ou trop important, soit d'un état de défaut induit principalement par les alarmes du système de contrôle-commande pendant la phase de finalisation de la mise en service. Les périodes hachurées en rose représentent les dates auxquelles les données du site sont manquantes, principalement pour des raisons de finalisation de la mise en service du système de collecte des données. Le reste représente la période durant laquelle la machine était en fonctionnement. A noter encore que la machine cesse systématiquement de turbiner pendant les périodes nocturnes (entre 22h00 et 06h00) quand le débit est généralement insuffisant pour la production, l'alimentation du secteur aval se fait alors par la chambre de Davel.

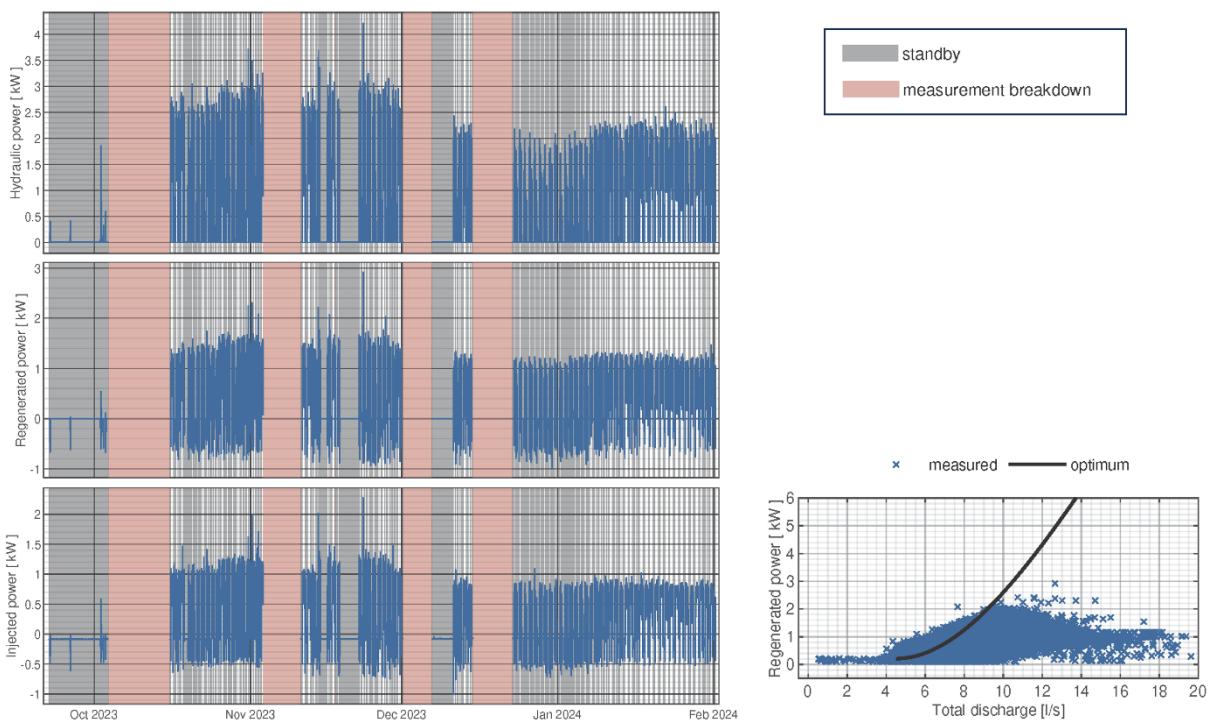


Figure 65 Historique de puissance hydraulique, de puissance électrique régénérée et de puissance électrique injectée (gauche) et distribution de la puissance électrique régénérée en fonction du débit total du site de Verney à Pully sur la période 22.09.23 – 01.02.24.

Les mêmes représentations sont utilisées également pour la puissance hydraulique disponible, pour la puissance régénérée par le convertisseur de fréquence principal d'injection dans le réseau électrique ainsi que pour la puissance électrique injectée dans le réseau (voir la Figure 65). Dans le graphique de droite, les valeurs de puissance électrique régénérée en fonction du débit total du site sont superposées à la courbe de puissance optimale extraite des mesures en laboratoire. Une grande partie des points mesurés sont distribués autour de cette courbe optimale. Cependant, on observe également toute une série des points qui s'éloignent de cette courbe, mesurés pour des débits supérieurs, qui sont le résultat d'une limitation de la chute disponible sur ce site.

Le bilan du fonctionnement pendant toute la période du 22 septembre 2023 au 1^{er} février 2024 est fourni sur la Figure 66. Sur la première ligne on y retrouve le nombre total d'heures sur la période de monitoring considérée. Pendant toute cette période, la machine a produit pendant 1'040 heures, soit 32.8% du temps total. Le temps d'arrêt de la machine (pour les diverses raisons présentées précédemment) est



de 1'330 heures, soit 41.9%. La dernière ligne de ce comptage représente le nombre d'heures pendant lequel les données n'ont pas été enregistrées.

| | | | |
|----------------------------------|--------|--------|-----|
| Total time | 100 % | 3174.3 | h |
| Registered operation time | 32.8 % | 1040.3 | h |
| Registered standby time | 41.9 % | 1330.1 | h |
| Measurement breakdown time | 25.3 % | 803.8 | h |
| Measured hydraulic energy | 100 % | 1732.6 | kWh |
| Optimum regenerated energy | 70.7 % | 1224.8 | kWh |
| Measured regenerated energy | 50.8 % | 880.8 | kWh |
| Total injected energy | 39.8 % | 690.2 | kWh |
| Exploitation level | | 71.9 | % |
| Average system efficiency | | 45.5 | % |
| Average electronic efficiency | | 89.5 | % |
| Average hydroelectric efficiency | | 50.8 | % |

Figure 66 Bilan du fonctionnement de la DuoTurbo de Verney à Pully sur la période 22.09.23 – 01.02.24.

Sur le temps de fonctionnement de la machine, une énergie hydraulique potentielle de 1.73 MWh a été comptabilisée. Sur ce potentiel, l'énergie régénérée optimale serait de 1.22 MWh, en considérant un fonctionnement permanent de la machine (sans périodes d'interruption) sur la courbe de production optimale. L'énergie totale réellement régénérée s'élève à 0.88 MWh, soit 50.8% du potentiel estimé. L'énergie totale injectée pendant toute cette période est de 0.69 MWh, un chiffre inférieur au précédent en raison du cumul des périodes de consommation du système (l'ensemble des éléments électriques de la chambre) quand la turbine ne tourne pas. Cependant, malgré une période de fonctionnement par intermittence en raison de la finalisation de la mise en service et d'une période de correction des erreurs de programmation restantes, le taux d'exploitation s'élève à 71.9%. Sur cette période, on constate un rendement moyen du système complet de 45.5 %, un rendement moyen de l'électronique de puissance de 89.5% et un rendement moyen hydroélectrique de 50.8% (expliqué en partie par le fonctionnement de la machine à faible puissance par rapport à sa plage de fonctionnement totale, imposé par les conditions de chute-débit du site).

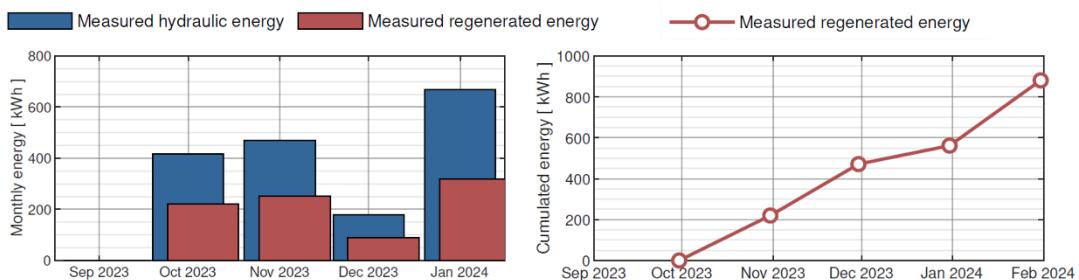


Figure 67 Bilan de production mensuelle (gauche) et cumulée (droite) de la DuoTurbo de Verney à Pully sur la période 22.09.23 – 31.01.24.

A partir des statistiques mensuelles (voir l'Annexe C) les valeurs d'énergie hydraulique disponible sur la période septembre 2023 - janvier 2024 ont été représentées sur l'image de gauche de la Figure 67. En rouge, on retrouve les valeurs d'énergie régénérée par la turbine. Comme mise en évidence également dans les graphiques précédents avec l'historique des débits et des puissances sur la période de monitoring, la turbine a produit plus pendant le mois de janvier 2024, la période des interruptions du turbinage pour la correction du programme de contrôle-commande étant terminée. Enfin, sur le



graphique de droite on retrouve l'évolution d'énergie régénérée cumulée pendant toute cette période de production.

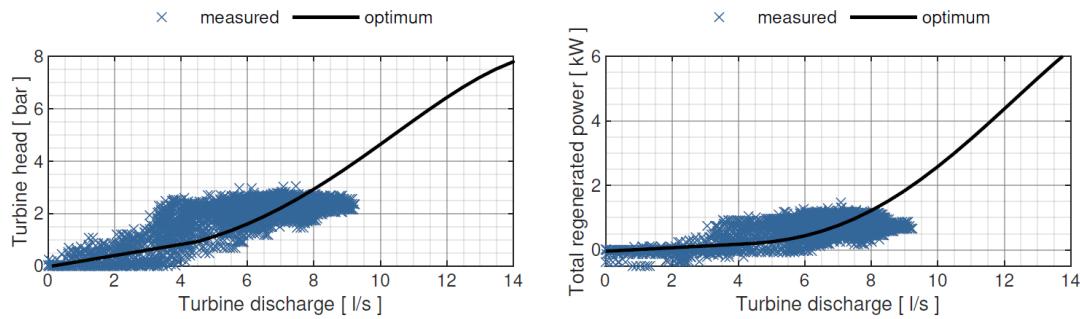


Figure 68 Distribution de la chute (gauche) et de la puissance électrique totale régénérée (droite) en fonction du débit turbiné de la DuoTurbo du site de Verney à Pully sur la période 27.01.24 – 31.01.24.

Afin de mieux mettre en évidence le fonctionnement optimal de la machine par rapport aux conditions du site, la distribution de la chute et de la puissance totale régénérée en fonction du débit turbiné de la machine a été représenté sur la Figure 68 sur une période plus courte (du 27 au 31 janvier 2024) caractérisée par un nombre réduit de démarrages journaliers. Les points mesurés se retrouvent globalement bien autour des courbes optimales de la machine. La dispersion des points autour de la courbe optimale s'explique par plusieurs éléments : mesures pendant les phases transitoires non-filtrées, valeurs non-synchrones enregistrées par le système de mesure, précision de mesure relativement faible du débitmètre calorimétrique de bypass, utilisé pour le calcul du débit turbiné. La distribution de la vitesse de rotation en fonction de la puissance régénérée pour chaque roue illustrée sur la Figure 69 pour toute la période d'enregistrement montre à nouveau une répartition globale de points autour des courbes optimales attendues. La dispersion des points est expliquée à nouveau par des valeurs enregistrées pendant les phases transitoires, le manque de synchronisation entre les valeurs enregistrées, ainsi que par les variations cycliques de vitesse de rotation des roues imposées par l'algorithme MPPT du système de contrôle-commande utilisé pour adapter le régime de fonctionnement de la turbine aux différentes conditions de débit.

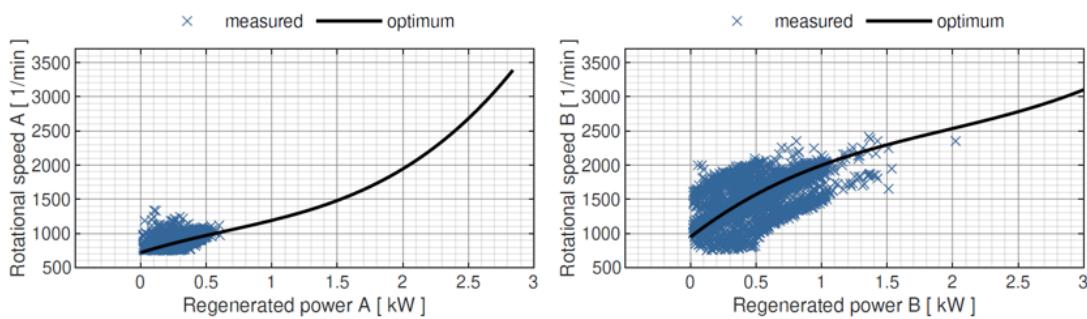


Figure 69 Distribution de la vitesse de rotation de la première (gauche) et de la deuxième (droite) roue en fonction de la puissance électrique produite par les deux demi-génératerices de la turbine DuoTurbo du site de Verney à Pully sur la période 22.09.23 – 01.02.24.

Sur la Figure 70, la distribution du rendement hydroélectrique (valeurs moyennes et écarts-type) en fonction de la puissance hydraulique de la turbine tracées à partir des valeurs enregistrées sur toute la période de monitoring montre des valeurs proches de celles attendues, représentées par la courbe noire. Malgré une précision relativement faible de certaines valeurs mesurées (débit turbiné et puissance électrique fournie par le convertisseur, qui n'est pas un instrument de mesure), ainsi que des



arguments évoqués précédemment, les valeurs obtenues se retrouvent relativement bien autour de celles attendues sur toute la plage de puissance hydraulique.

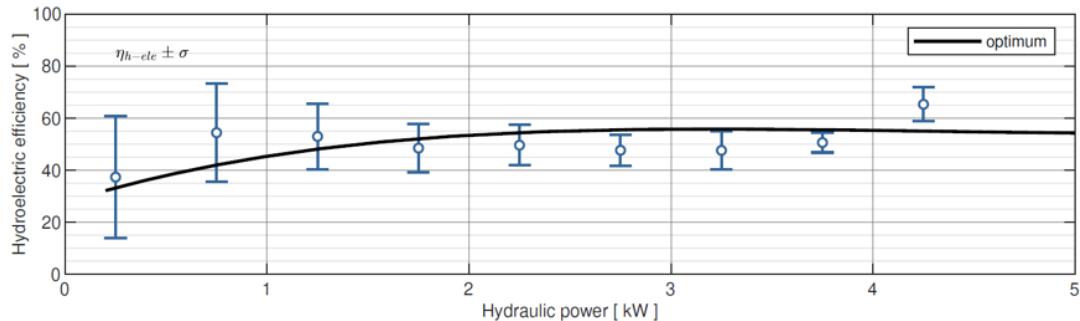


Figure 70 Distribution du rendement hydroélectrique en fonction de la puissance hydraulique de la turbine DuoTurbo du site de Verney à Pully sur la période 22.09.23 – 01.02.24.

La distribution de la vitesse de vibration générale ainsi qu'en fonction de la vitesse de rotation de chaque roue est fournie sur la Figure 71. De manière générale, on peut constater que le niveau de vibration est bien inférieur au seuil d'alarme fixé à 2 mm/s. Les quelques valeurs entre 2 et 2.2 mm/s ont été enregistrées pendant les phases de finalisation de la mise en service, jusqu'à ce que la fixation complète de l'ensemble de la tuyauterie de la chambre ait été réalisée. La distribution de la vitesse de vibration avec la vitesse de rotation des roues ne montre pas de régimes avec une augmentation prédominante du niveau de vibration (excitation des éventuels fréquences propres) sur la plage de fonctionnement expérimentée par la machine sur ce site pendant toute la période de monitoring considérée.

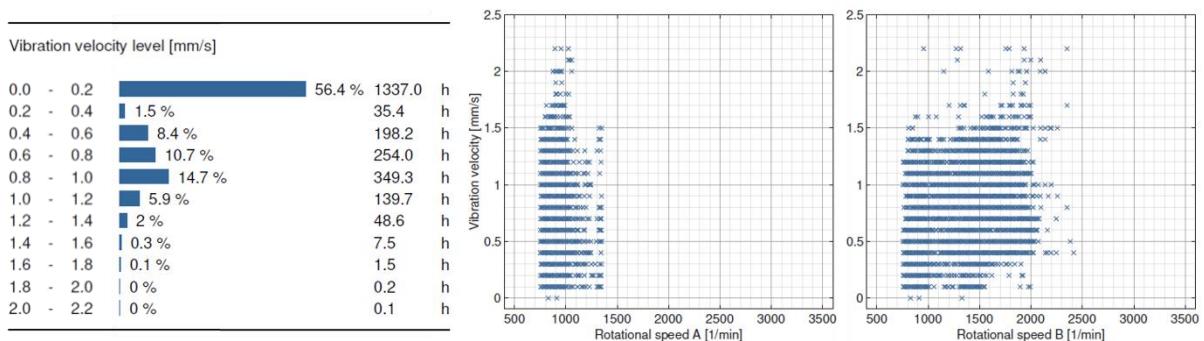


Figure 71 Distribution de la vitesse de vibration générale (gauche) et en fonction de la vitesse de rotation de chaque roue (centre et droite) de la turbine DuoTurbo du site de Verney à Pully sur la période 22.09.23 – 01.02.24.

Le bilan du nombre moyen de démaragements par jour durant cette phase de monitoring, fourni sur la Figure 72 à gauche, indique que la machine a démarré au moins 10 fois par jour presque tous les mois, avec une réduction pour le mois de janvier. Ce nombre relativement élevé de démaragements journaliers s'explique d'une part par le grand nombre de tests effectués pendant les phases de mise en service et de correction des erreurs du programme de contrôle-commande, ainsi que par le régime inhabituel de débit du site avec des valeurs parfois inférieures à celui turbinable.

Sur la figure de droite, la distribution des vitesses de vibration par mois montre des valeurs généralement en dessous du seuil de 1.4 mm/s, ce qui est tout à fait normal pour cette machine, sans une évidence d'augmentation des vibrations avec le temps.

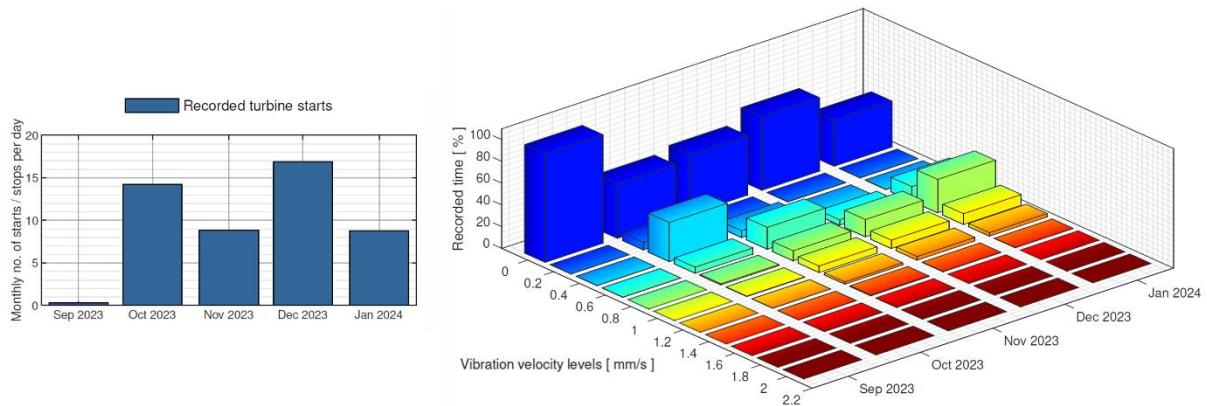


Figure 72 Bilan du nombre de démarrages/arrêts par jour durant les quatre premiers mois d'exploitation (gauche) et distribution mensuelle de la vitesse de vibration générale (droite) de la turbine DuoTurbo de Verney à Pully sur la période 22.09.23 – 31.01.24.

Les trois défauts identifiés par le programme de contrôle-commande pendant la période de monitoring du 22 septembre 2023 au 1^{er} février 2024 sont :

- Le rotor bloqué, une fausse alarme induite par une combinaison des valeurs. Le faux déclanchement de cette alarme a été résolu en corrigeant les erreurs restantes dans le programme de pilotage.
- Détection de fuite sur la turbine, induite aussi faussement par une sensibilité trop importante du capteur de détection de fuite (en conditions de condensation dans la chambre) installé sur le bac de récupération de l'eau des garnitures mécaniques de la machine. Le capteur a été remplacé entre temps et une temporisation avant le déclenchement de l'alarme sera ajouté au programme de pilotage pour éliminer les fausses alarmes.
- Défaut de vibration élevée sur la turbine, déclenché par une fixation initiale insuffisante des conduites de l'installation de la chambre. Après le renforcement des fixations, le niveau des vibrations est redescendu à un niveau habituel.

En plus de produire de l'électricité, la machine peut être potentiellement utilisée également comme **capteur de débit et de chute**. Pour cela, on part de l'hypothèse que la machine opère en tout temps autour de la courbe de puissance maximale obtenue à partir des mesures en laboratoire. Sur la Figure 73, les équations des variations du débit et de la chute avec respectivement les puissances électriques des deux génératrices (gauche) ou avec les vitesses des deux roues (droite) sont fournies pour les points de fonctionnement sur la courbe de puissance maximale de la turbine. A noter que ces valeurs sont propres à chaque profil hydraulique (« Savièse » dans le cas présent). On peut tirer la conclusion que plus la dérivée de la fonction est faible, plus la prédition sera précise. Cela reviendrait à utiliser pour le calcul du débit turbiné et de la chute de la machine, les valeurs de puissance électrique ou de vitesse de rotation plutôt de la deuxième roue. Ces calculs sont en cours d'implémentation dans le programme de contrôle-commande. Les mesures enregistrées pendant les mois suivants serviront à évaluer la fiabilité de cette fonctionnalité.

Cependant, en considérant les valeurs enregistrées sur une journée complète le 29 janvier 2024, les valeurs de débit turbiné et de chute de la machine comparées à celles enregistrées sur suite par les autres capteurs montrent sur la Figure 74 des résultats prometteurs, même en cas de grande fluctuation de débit ou de chute. Une évaluation plus quantitative sera relâssée une fois les équations implémentées dans l'automate, car le synchronisme entre les valeurs utilisées et enregistrées en temps réel est très important pour un résultat pertinent.

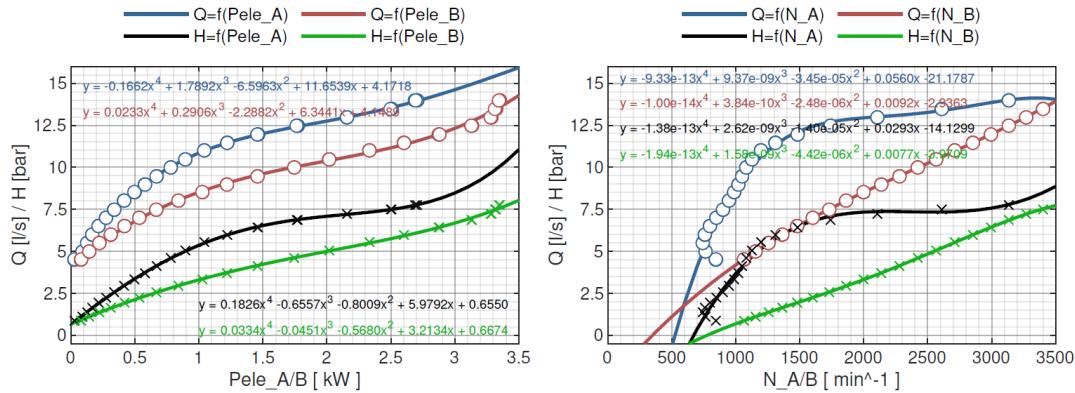


Figure 73 Relations théoriques entre le débit et la chute en fonction de la puissance électrique de chaque demi-générateur (gauche) ou de la vitesse de rotation des roues (droite) obtenues à partir des mesures en laboratoire sur la courbe de puissance maximale de la turbine DuoTurbo de Verney.

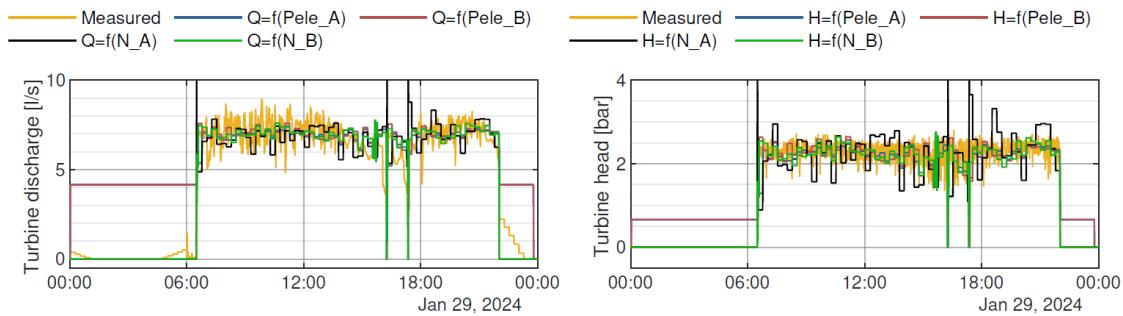


Figure 74 Comparaison entre les valeurs mesurées et prédictives de débit (gauche) et de chute (droite) de la turbine DuoTurbo de Verney à Pully sur une période de 24 heures 29.01.23.

Un deuxième jeu de données sur l'ensemble des deux sites parallèles de Verney et de Davel est enregistré par les programmes de contrôle-commande des automates des nœuds programmés par Pilet. Sur la Figure 75, l'historique des valeurs de débit et de pression amont et aval des deux sites, enregistrées en simultané avec une cadence de 1 Hz pendant la période du 28 au 31 janvier 2024 fournit une vue d'ensemble du fonctionnement des deux chambres en parallèle. On peut identifier facilement les périodes de transit de l'eau potable journalier et nocturne alternatif entre les deux chambres (celle de Verney pendant la journée et celle de Davel pendant la nuit). De plus, si pendant la nuit le débit à Verney est nul, on constate pendant la journée, le fonctionnement de la chambre de Davel pour compenser la demande en eau du secteur aval. Les deux pics de débit synchrones enregistrés le 31 janvier montrent que la régulation actuelle de vannes Clayton implantée dans les deux chambres parallèles permet un grand soutirage en cas de nécessité. Pour la pression statique amont et aval des deux sites, on peut noter un comportement similaire entre les deux chambres, avec à chaque fois un écart induit par la différence d'altitude entre les deux sites et la différence de consigne de régulation des vannes Clayton. Les sauts de pression amont d'environ 0.5 bars sont provoqués par la mise en route du système de pompage adjacent couplé au réseau d'alimentation en eau de la commune. En revanche, le fonctionnement de la turbine (avec ses démarriages et arrêts) ne semble pas induire d'effet indésirable sur la pression ou le débit dans le réseau, prouvant ainsi sa bonne intégration dans un réseau maillé. Les sauts de pression de courte durée sont plutôt synchrones, ce qui signifie qu'ils sont probablement provoqués par des événements localisés bien en amont ou en aval de ces deux chambres.

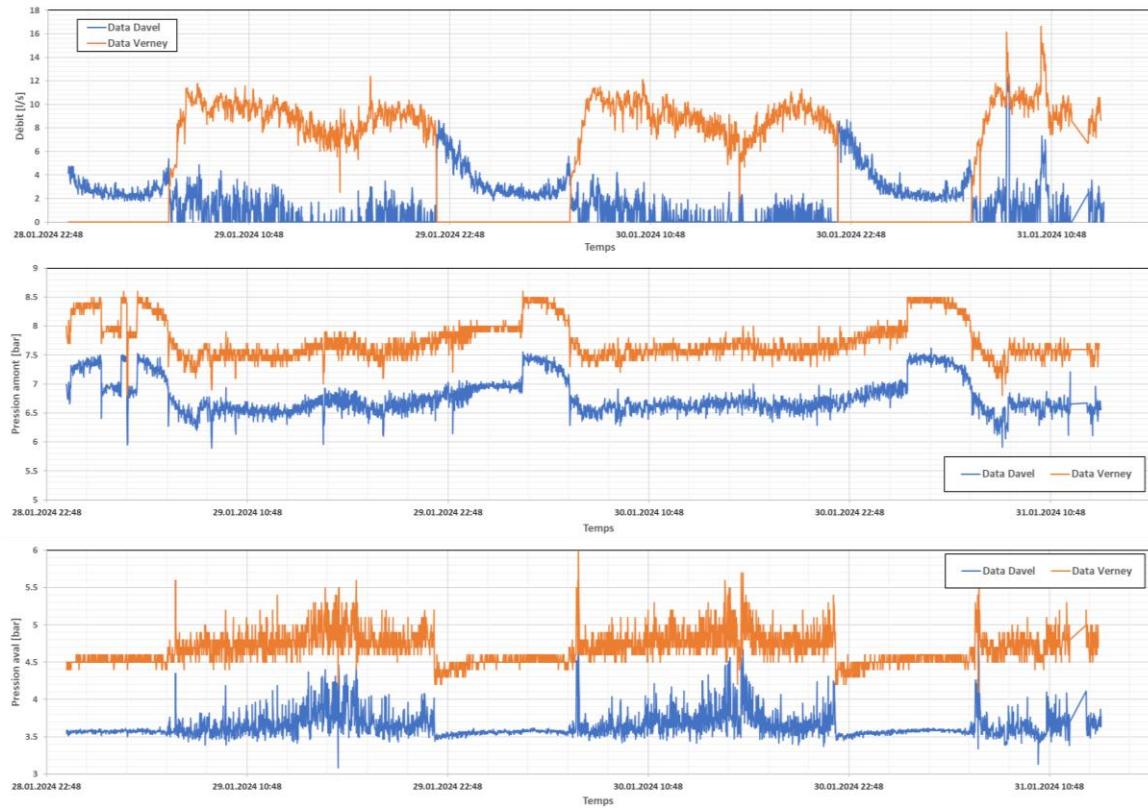


Figure 75 Débits (haut), pressions amont (milieu) et pressions aval (bas) mesurés dans les chambres de Verney et de Davel à Pully sur la période 28.01.24 – 31.01.24 avec la turbine DuoTurbo de Verney en fonctionnement.

Depuis sa mise en service sur le site de Verney au mois de septembre 2023, la turbine contrarotative DuoTurbo a produit près de 0.88 MWh d'énergie regénérée mesurée sur une période d'environ 4 mois. On observe environ 800 heures de pertes de mesures, soit 25% du temps total de mesure, pour la période monitorée du 22 septembre 2023 au 1er février 2024.

Pendant cette phase d'exploitation semi-industrielle, la turbine a subi quelques arrêts anormaux, provoqués généralement soit par un pic élevé de vibration, soit par des fausses alarmes de fuite ou encore par des faux défauts de rotor bloqué. Le défaut de vibration a été induit par une fixation latérale insuffisante des conduites de la chambre, et n'a plus été identifié une fois le problème résolu. L'alarme de rotor bloqué n'est pas provoquée par un vrai problème mécanique, mais plutôt par une combinaison des valeurs utilisées dans la logique du programme de pilotage et n'a plus été détectée depuis la correction du programme. Le défaut de détection de fuite est provoqué non pas par une fuite de la machine, mais plutôt par des gouttelettes de condensation, détectées par un capteur avec une sensibilité trop importante. La correction par programmation d'une détection prémature est prévue et en cas de nécessité le capteur sera remplacé avec un autre type.

La turbine effectue environ 10 démarriages par jour, un nombre qui semble diminuer pour le mois de janvier, mois durant lequel la machine a fonctionné le plus.

Les résultats qui figurent dans ce rapport permettent également de démontrer le fonctionnement attendu de la turbine. La caractéristique H-Q mesurée sur site correspond à celle obtenue en laboratoire. L'algorithme MPPT respecte bien la courbe mesurée en laboratoire. Enfin, avec plus de 1'000 heures de fonctionnement depuis sa mise en service en septembre 2023, la turbine DuoTurbo de Verney à Pully a pu démontrer son efficacité et sa robustesse pour un fonctionnement continu dans un réseau d'eau potable urbain maillé.



5 Conclusions et résumé

En installant une turbine Duo Turbo dans la chambre de Verney de la ville de Pully, ce projet avait pour but de démontrer la possibilité de turbiner l'eau potable d'un réseau d'eau potable urbain maillé, pouvant alimenter en électricité un monitoring du réseau tout, en régulant les différentes branches de ce réseau pour favoriser la qualité de l'eau.

Durant la première partie du projet, le cahier des charges de l'installation a pu être défini en collaboration avec tous les partenaires du projet. La liste des modes de fonctionnement, l'architecture générale et le cahier des charges de chaque équipement ont ainsi été réalisés avec succès.

La phase de développement a ensuite pu démarrer début 2021 et a abouti avec la commande de la turbine durant l'été 2021. La phase de fabrication a pris du retard dû au problème d'approvisionnement en matière première suite à la crise du coronavirus. Il a donc été décidé de réaliser une partie des essais avec un prototype de laboratoire de la Duo Turbo. Le plan d'expérience a pu ainsi être défini, et des mesures de performance approfondies intégrant le fonctionnement en régime cavitant ainsi que des mesures transitoires ont pu être réalisées en 2022 et en 2023.

Des simulations numériques des régimes transitoires du réseau pour différents cas de charge ont été réalisées en parallèle, démontrant que l'ajout de la turbine ne génère pas des surpressions ou souspressions dangereuses pour le réseau amont ou aval. L'installation de protections anti-bélier autre que la vanne de décharge à l'intérieur de la chambre n'a ainsi pas été nécessaire.

Concernant le site pilote, des mesures sur site ont pu être réalisées, d'abord en 2021 au niveau de la chambre de Davel qui se trouve sur le même étage de pression que la chambre de Verney ; puis en 2022 sur les deux chambres. Ceci a permis de mieux comprendre la dynamique du réseau d'eau de la Ville de Pully dans cette zone et de valider la pertinence du modèle numérique. Ces essais ont permis de conclure que le modèle numérique représente bien l'état du réseau mais avec une incertitude de l'ordre de 1 à 2 m sur la différence de pression entre les deux chambres. Il a été aussi relevé que la courbe de débits classés estimée avant le démarrage du projet sous-estime probablement les apports réels. Les mesures réalisées ne permettent pas de faire une correction de la courbe car elles ont été réalisées soit en période de transition du réseau (travaux de changement d'étage) soit sur des périodes courtes avec des effets de saisonnalité.

La chambre de Verney a finalement été équipée en juin 2023 avec la turbine, les automates et des capteurs de débit et pression pour la surveillance. La mise en service complète de l'installation a eu lieu en octobre 2023. Le suivi du fonctionnement de ce nouvel équipement a été réalisé pendant plus de 4 mois dans le cadre de ce projet. Le système de turbinage a pu démontrer son efficacité et sa robustesse pour un fonctionnement continu dans les conditions particuliers d'un réseau d'eau potable urbain maillé. Dix arrêt-démarrages ont été détectés en moyenne par jour depuis la mise en service, ceci met en évidence la nécessité d'avoir une turbine robuste et réactive.



6 Aperçu et mise en œuvre prochaine

L'analyse des mesures durant les premiers d'exploitation de la turbine a permis d'identifier que cette turbine pourrait aussi offrir la possibilité de mesurer indirectement le débit ou la pression. Cette nouvelle fonctionnalité pourrait être confirmée en analysant les mesures sur une plus longue période.

Le suivi de l'amélioration de la qualité d'eau n'est pas prévu à ce stade, mais des mesures de taux de l'oxydant résiduel (chlore), avec et sans la priorisation active, permettront de documenter l'impact de cette nouvelle régulation du réseau d'eau grâce à la turbine.

Le projet s'est concentré sur la turbine DuoTurbo idéale pour les sites présentant une grande variation horaire de débit et de pression. Pour exporter le concept à d'autres sites sur des réseaux d'eau potable, d'autres machines pourraient aussi être considérées.

Un travail de Master, Luginbühl (2023), réalisé à la HES SO Valais en collaboration avec Jacquier-Luisier, a permis d'améliorer les procédés de fabrication de la turbine permettant de réduire les coûts de 23%, d'automatiser le développement du design des roues pour des caractéristiques hydrauliques données et de développer une gamme pour des diamètres de conduite supérieurs à 100mm. En vue d'augmenter les possibilités de commercialisation, une étude de marché devrait encore être réalisée pour identifier les caractéristiques typiques des réducteurs de pression dans les réseaux maillés (combinaison chute-débit) et ainsi cibler d'autres développements à effectuer pour atteindre au mieux le marché.

Dans la suite du développement du pilotage intelligent des réseaux, d'autres fonctionnalités pourraient être développées, notamment celles identifiées au début du projet mais qui n'ont pas été retenues pour cette première installation (Figure 8).

7 Coopération nationale et internationale

Le projet et les premiers résultats ont été présentés :

- aux Services Industriels de Genève (SIG), le 4 novembre 2020,
- au Service de l'eau de Lausanne, le 26 mars 2021,
- aux services industriels du Val de Bagnes, le 1 février 2021,
- lors du workshop de l'International Energy Agency (IEA) organisé par l'Annexe XVI Hidden and Untapped Hydropower Opportunities, le 1er juillet 2021,
- lors de la journée technique de Swiss Small Hydro à Verbier, le 9 octobre 2021.



8 Publications

Biner D, Hasmatuchi V, Rapillard L, Chevailler S, Avellan F and Münch-Alligné C (2021), "[DuoTurbo: Implementation of a Counter-Rotating Hydroturbine for Energy Recovery in Drinking Water Networks](#)", Sustainability., sep, 2021. Vol. 13(19), pp. 10717. MDPI AG.



9 Bibliographie

Hasmatuchi V., Biner D., Avellan F., Münch-Alligné C. (2016), "Performance Measurements on the DuoTurbo Microturbine for Drinking Water Systems", Hydro 2016, Montreux, Switzerland, October 10-12, 2016

Hasmatuchi V., Bosioc A., Luisier S. and Münch-Alligné C. (2018), "A Dynamic Approach for Faster Performance Measurements on Hydraulic Turbomachinery Model Testing", Applied Sciences., 2018. Vol. 8(9), pp. 1426. MDPI AG.

Biner, D., Hasmatuchi, V., Rapillard, L., Chevailler, S., Avellan, F., Münch-Alligné, C. (2021) "DuoTurbo: Implementation of a Counter-Rotating Hydroturbine for Energy Recovery in Drinking Water Networks", Sustainability 2021, Vol. 13, pp. 10717.

DuoTurbo, HES-SO Valais Wallis. (2017), "Mesures transitoires sur un réducteur de pression".

Flavio Luginbühl, « Développement d'une gamme de turbines pour l'eau potable », Travail de master MSE, février 2023.



10 Annexes

Annexe A – Résultats des calculs transitoires

Annexe B - Diagramme de Flux du pilotage du nœud Verney

Annexe C – Rapports mensuels statistiques d'opération de la turbine