



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Rapport final 30 novembre 2009

Turbines diagonales

Programme de développement d'une turbine
hydraulique diagonale destinée à équiper les
petites centrales à moyenne chute (25 à 100 m)

Mandant:

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

Mandataire:

MHyLab
Chemin du Bois Jolens 6
CH-1354 Montcherand
www.mhylab.com

Auteurs:

Aline Choulot, MHyLab, aline.choulot@mhylab.com
Vincent Denis, MHyLab, vincent.denis@mhylab.com

Durée prévue du projet : 15 novembre 2006 – 31 décembre 2009

Responsable de domaine de l'OFEN: Dr. Michael Moser

Chef de programme de l'OFEN: Dr. Klaus Jorde

Numéro du contrat et du projet de l'OFEN: 101915 / 152361

L'auteur de ce rapport porte seul la responsabilité de son contenu et de ses conclusions.

Résumé

Suite au succès rencontré par MHyLab dans le cadre des programmes de développement des turbines haute chute avec les Pelton, et des turbines basse chute avec les axiales, ce nouveau projet vise à développer les turbines moyenne chute avec les turbines Diagonales sur les mêmes principes de haut niveau de performances, haute fiabilité, coût compétitif et simplicité de construction.

Le financement obtenu de l'*OPEN* et des *S/G* nous avait permis, en 2007, d'établir les bases de notre projet de développement. En 2008, nous recevions le soutien de *Swisselectric research* et une collaboration était conclue avec la Haute Ecole de Horw-Lucerne pour la modélisation du profil méridien à la base de notre modèle réduit.

L'année 2009 a permis la conception hydraulique des la pale de la roue motrice ainsi que la validation, par calculs numériques d'écoulement, de l'entier du profil hydraulique de la turbine. En parallèle aux travaux de modélisations, nous avons également pu achever la conception mécanique de la totalité de la machine et plus particulièrement du dispositif de commande des aubes de la roue motrice. Un dossier de plans de construction a pu être réalisé et le modèle de laboratoire à 8 pales est actuellement en construction dans les ateliers sélectionnés sur la base d'un appel d'offres.

Tous les acteurs et facteurs ayant été réunis, *MHyLab* est confiant quant au succès du projet Diagonale, le prochain objectif étant de débuter les essais de la configuration à 8 pales en février 2010.

Introduction

Ce rapport fait le bilan des activités "Diagonales" du **15 novembre 2006 au 30 novembre 2009**, et fait suite au rapport annuel 2008, daté du 12 mai 2009.

Buts du projet

Description

Ce programme a pour objectif le développement de la technique hydro-mécanique d'une turbine diagonale destinée à équiper les petites centrales à moyenne chute : 25 à 100 m.

Il s'inscrit entre les deux domaines déjà réalisés avec succès et complètement opérationnels, celui des hautes chutes (60 à 700 m) et des basses chutes (1 à 30 m), qui sont respectivement ceux des turbines Pelton et axiales.

Comme pour les deux domaines précédents, celui des moyennes chutes doit répondre aux critères suivants :

- haut niveau de performances et comportement hydrodynamique garantis par un développement systématique en laboratoire.
- haute fiabilité, directement liée à la rentabilité de l'installation,
- coût compétitif également lié à la rentabilité de l'installation, mais aussi à la compétitivité des constructeurs suisses.
- possibilité de construction par des PME et ateliers locaux, leur assurant ainsi un accès à la R&D qui leur fait généralement défaut et permettant leur positionnement sur le marché international.

Tout comme les 2 programmes de développement précédent, à l'issue de ce projet, ce concept innovant devrait permettre de développer **un nouveau savoir-faire, une nouvelle technologie et un nouveau produit**.

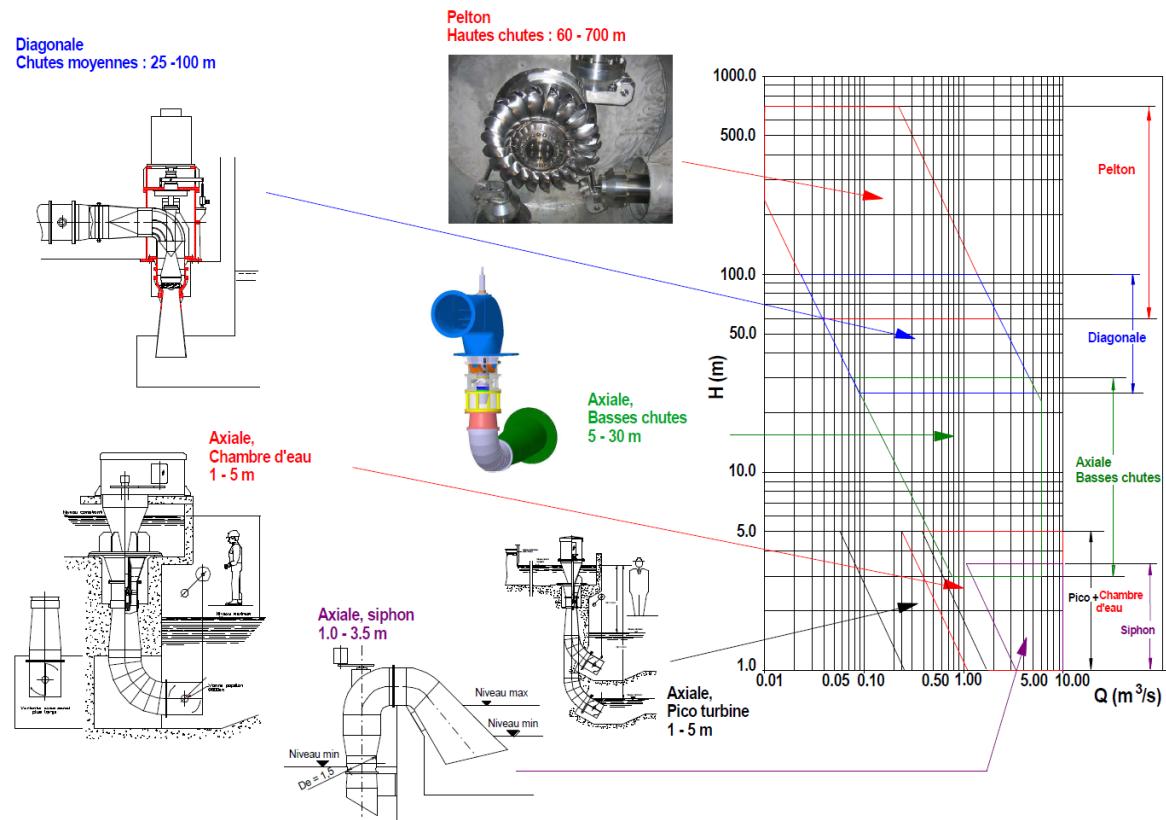


Figure 1. Domaine de R&D MHyLab pour les petites turbines hydrauliques

Objectif global

Pour ce faire, l'objectif global consiste à:

1. Développer, en s'appuyant sur une méthode de calculs numériques d'écoulement, un **modèle réduit** de turbine à installer sur le stand d'essais de MHyLab, valider les options choisies, et développer un profil hydraulique optimal.
2. Couvrir un **domaine de dénivellation compris entre 25 et 100 m**, pour une puissance maximale de l'ordre de 1 MW, en développant des **configurations à 8, 10 et 12 pales**, dont le rendement mécanique devra atteindre 90% tout en présentant un excellent comportement exempt de cavitation.
3. Développer un **outil de conception systématique** basé sur les résultats d'essais en laboratoire qui permettra un dimensionnement sur mesure de chaque machine, en fonction des caractéristiques du site.
4. Développer un produit industriel basé sur les travaux de R&D en laboratoire, dont le **rapport coûts-bénéfice** est largement supérieur à celui des produits "standard".
5. **Garantir le fonctionnement hydrodynamique** des turbines, comme cela se fait avec les grandes unités.
6. Permettre une **réduction des coûts de fonctionnement** grâce à une optimisation des performances et un comportement hydrodynamique exempt de cavitation.
7. Fournir une technologie efficace, sûre et garantie aux **constructeurs** indépendants suisses et européens, laquelle est à ce jour encore inabordable financièrement.

8. Permettre une large **diffusion** des résultats du projet de R&D.

Cet objectif global, nécessitant des moyens financiers importants, est toutefois réaliste grâce à la contribution de l'*OFEN* à laquelle s'ajoutent celles des *SIG⁴* et de *Swisselectric Research³*.

Planning

Le premier planning établi en 2007 définissait pour les années 2007, 2008 et 1^{er} semestre 2009, les objectifs suivants:

1. Recherche d'information, tracé théorique du profil, calculs numériques
2. Etudes constructives du modèle réduit et dessins de fabrication
3. Fabrication du modèle réduit et montage sur la plateforme d'essais
4. Essai en laboratoire de la 1^{ère} configuration à 12 pales
5. Essai en laboratoire de la 2^{ème} configuration à 8 pales
6. Recherche d'un site de démonstration

Cette planification initiale n'a pu être respectée pour les raisons suivantes:

- tous les moyens financiers n'étaient pas réunis avant le démarrage, en octobre 2008, du projet soutenu par de *Swisselectric Research*,
- la collaboration avec des spécialistes du tracé d'aubage issus de General Electric au Canada, nous ayant fait défaut suite à une réorganisation de la société et la vente de ses activités hydrauliques au Groupe Andritz, l'organisation mise en place pour la modélisation du rotor/stator de la turbine a dû être entièrement revue.

Le planning a par conséquent été redéfini lors de l'établissement de la collaboration avec *Swisselectric Research* (cf. « Délai (convention) » dans le Tableau 1).

Concernant l'adéquation avec les délais annoncés, les dossiers de plans pour la conception finale du laboratoire ont été achevés en août 2009. Le retard est en partie dû à la difficulté de réunir les experts appropriés pour ce type de travaux très spécifiques.

Ce retard n'a qu'une influence mineure sur la suite des activités. En effet, les commandes auprès des ateliers mécaniques venant d'être passées, le modèle réduit pourra être monté sur le stand d'essais en février 2010.

De plus, si les résultats en laboratoire sont conformes à la modélisation, le reste du planning pourra être tenu.

Étapes	Points clés	Délai (convention)	Délai (réel ou prévu)
Conception du modèle de laboratoire	Dossier de plans de construction du modèle à disposition	03/09	08/09
8 pales : Conception finale du modèle	Dossier de plans spécifiques au modèle 8 pales	04/09	08/09
8 pales : Construction et mise en place du modèle d'essais	Modèle à 8 pales monté sur le stand	12/09	02/10
8 pales : Essais en laboratoire et développements. Analyse	Dossier des résultats à disposition	09/10	09/10

des résultats et systématisation			
12 pales : Construction, conception et mise en place de la nouvelle roue	Modèle à 12 pales monté sur le stand	10/10	10/10
12 pales : Essais en laboratoire et développements Analyse des résultats et systématisation	Dossier de synthèse des résultats à disposition	06/11	06/11

Tableau 1. Planning Diagonale – délais prévus et délais réels ou prévus

Travaux effectués et résultats acquis

A ce jour, les travaux suivants ont été exécutés :

- Analyse de l'état de l'art et des méthodes utilisées dans le domaine des moyennes chutes en petite hydroélectricité. Cette analyse a été menée en se basant sur les rares publications et exemples de turbines et pompes turbines diagonales de grande taille. Elle a permis de faire une synthèse des solutions retenues et des besoins du domaine. C'est sur cette base que nous avons pu définir un programme de travail et de développement précis.
- Rédaction d'une notice : "*Turbine diagonale MHyLab – Conception hydromécanique. Profil méridien et aide au tracé d'aubage*". Cette notice est le résultat principal du travail scientifique effectué en 2007. Elle a servi de base au développement de la machine de laboratoire.
- Approfondissement du profil hydraulique de la turbine. Ce profil réutilise les techniques et savoir-faire optimisés lors du programme de recherche sur les turbines basse chute, à savoir (cf. Figure 12):
 - Forme saxo qui permet un positionnement optimal du générateur
 - Entonnement amont à section carrée
 - Aspirateur droit ou coudé

Un premier profil méridien pour une configuration à 8 pales a été défini comme base pour la modélisation: dimensions du moyeu, rayon externe de roue, angle d'inclinaison des pales par rapport à l'axe de la roue, etc.

- Modélisation numérique du rotor/stator avec la collaboration entre la *Haute Ecole de Horw Lucerne (HSLU)*⁵ – Pr. Th. Staubli et MHyLab (cf. Figure 3).

Les tâches réalisées en collaboration avec la HSLU ont été les suivantes:

- Conception de l'aubage moteur dans le profil méridien proposé puis validation par CFD, pour un prototype à 8 pales sous 40 m de chute avec un axe de pales incliné à 40° par rapport à l'axe de la roue, aux dimensions du modèle réduit (cf. Figure 4).
- Vérification que ce profil méridien proposé pour cette première configuration est conservé dans tout le domaine requis, soit de 25 à 100 m de chute, par l'analyse numérique des écoulements dans la configuration tracée (pressions, vitesses, incidences, etc.) (cf. Figure 3).

- Contrôle que pour une implantation maximale de 1 mètre du plan de référence Z_R sous le niveau d'eau aval, pour la plus haute chute, une cavitation non érosive est assurée au point de fonctionnement optimal.
- Validation de la modélisation numérique d'une turbine diagonale à partir d'un cas réel, celui d'une turbine diagonale récente en service en Ecosse (turbine à bâche spirale, double réglage, angle des axes des pales de 30° sous 58 m de chute, $N' = 300$ t/min, $P_{\text{turb}} = 17.1$ MW) (cf. Figure 2). Cette validation a été rendue possible par l'acquisition de la géométrie de cette machine et des résultats d'essais auprès de la société Andritz Hydro.

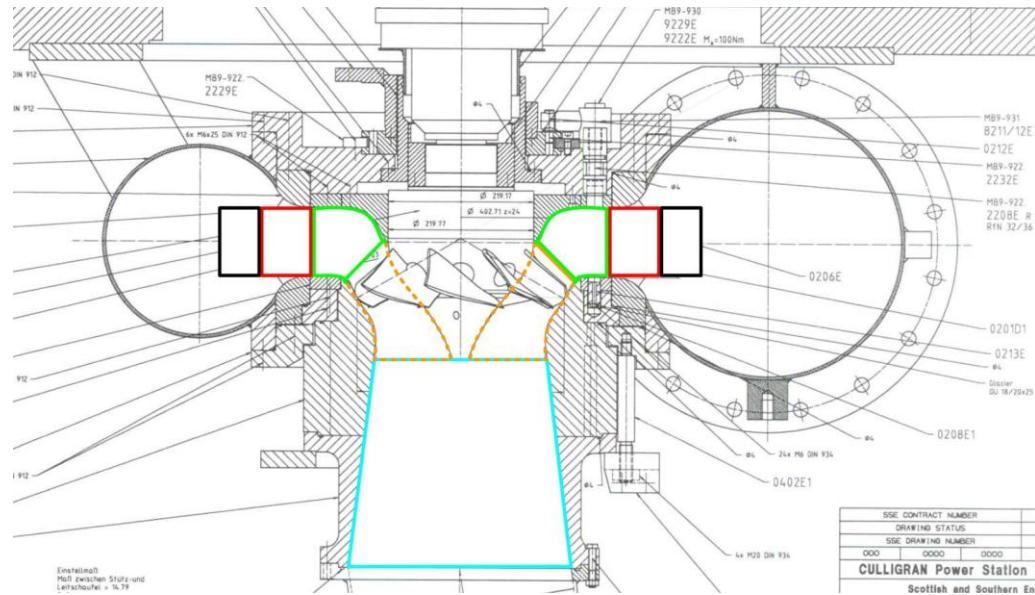


Figure 2. Turbine de Culligan : Découpage des zones de calcul pour la validation du modèle numérique (Dessin de base : Andritz Hydro)

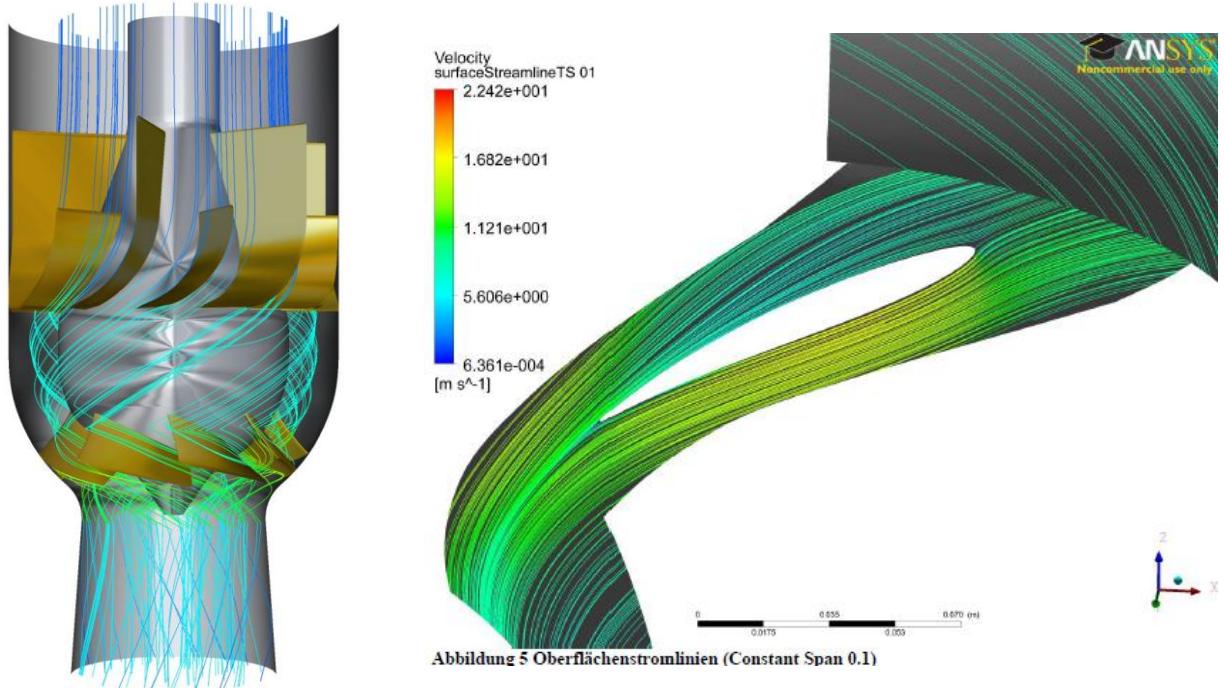


Figure 3. Modélisation du rotor/stator

Figure 4. Répartition des pressions sur la pale de la roue de la turbine Diagonale

Cette modélisation est aujourd'hui achevée (5 tracés de distributeurs et 5 tracés de la pale ont été testés), les objectifs fixés ayant été atteints dans les délais impartis. La Figure 4 illustre l' excellente répartition des pressions au niveau de la pale.

- Etude mécanique de la roue et de la commande des pales (entre 8 et 12).

Les configurations retenues dans le cadre du programme étant à 8, 10 et 12 pales, le choix a été fait de concevoir une commande des 12 pales inclinées dans la roue tout en assurant le montage / démontage de la roue. Cette étape de conception a été réalisée à l'aide d'un programme de dessin 3D permettant de visualiser le fonctionnement du mécanisme. Le système d'accouplements coniques initialement proposé (voir rapport annuel 2008) a finalement été abandonné au profit d'un ensemble de leviers et bielles (cf. Figure 5, Figure 6, Figure 7, Figure 8 et Figure 9), dont le bon fonctionnement a aujourd'hui été validé.

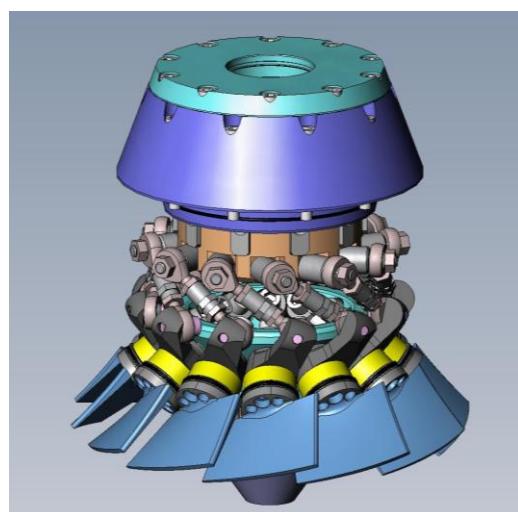


Figure 5. Système de leviers et bielles pour la commande des 12 pales de la roue Diagonale

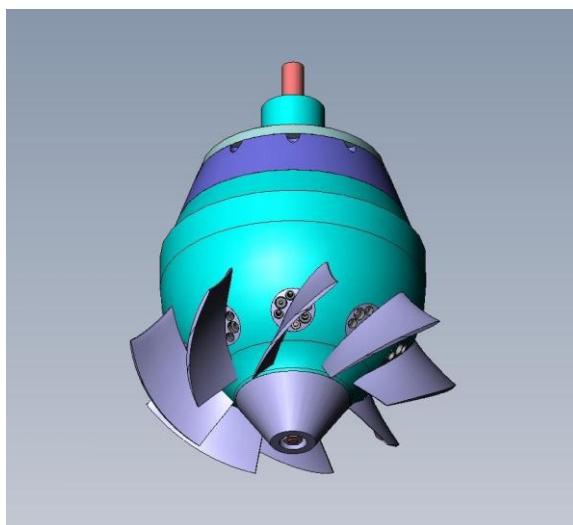


Figure 6. Roue à 8 pales en position totalement ouverte

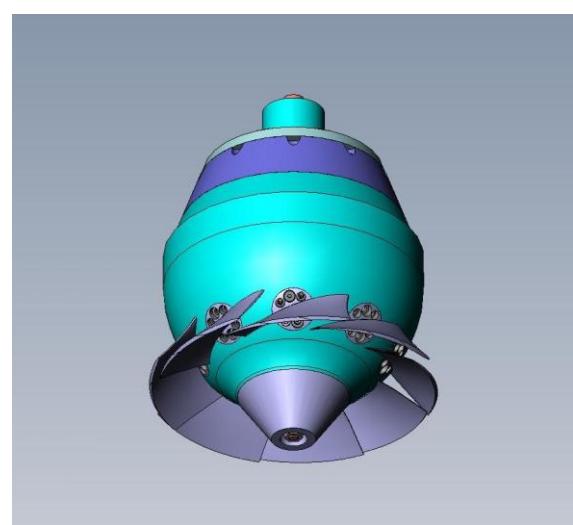


Figure 7. Roue à 8 pales en position totalement fermée

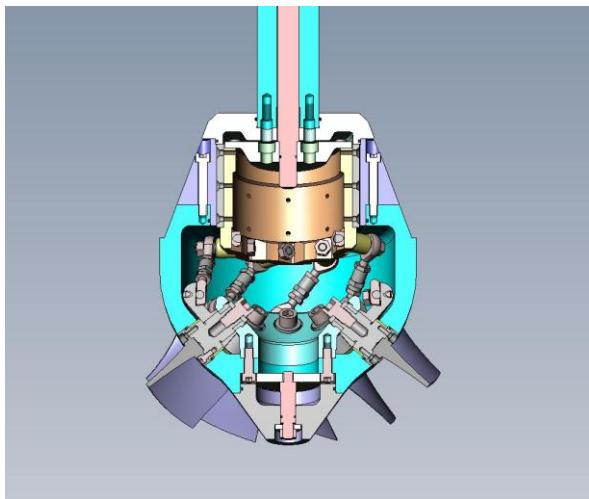


Figure 8. Roue à 8 pales en position ouverte et système de commande des pales (coupe)

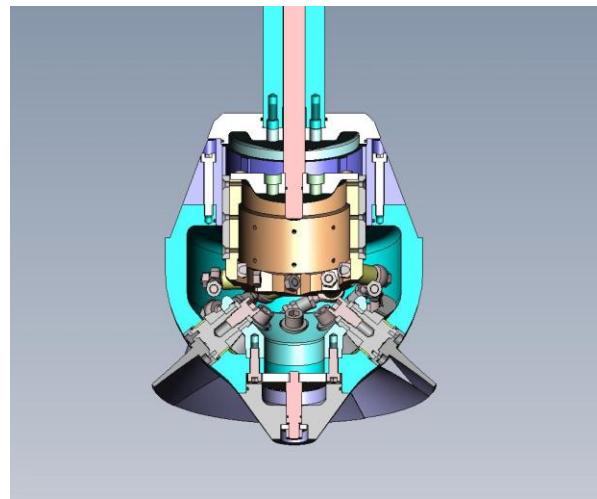


Figure 9. Roue à 8 pales en position totalement fermée et système de commande des pales (coupe)

- Etablissement du dossier de construction du modèle réduit de laboratoire à 8 pales, consultation et choix des ateliers mécaniques pour la fabrication ledit modèle.

Parallèlement à la modélisation et à la validation du système de commande des pales, le dossier de plans de construction de la machine a été réalisé (cercles d'entretoises, distributeur à ailettes, aubes directrices, arbre moteur, palier à eau, manteau du diffuseur (cf. Figure 11)-, coude d'aspiration, etc.).

Suite aux demandes d'offres effectuées auprès de divers ateliers mécaniques, les commandes ont été passées auprès de :

- *Program SA*¹ pour la fabrication et l'assemblage de la roue motrice,
- *Hydro Exploitation SA*² pour la construction de la turbine d'essais (hors roue motrice).

¹ *Program SA, Ch. De Bellevue 3, 1197 Prangins*

² *Hydro Exploitation SA, Rue des Creusets 41, CP 750, 1951 Sion*

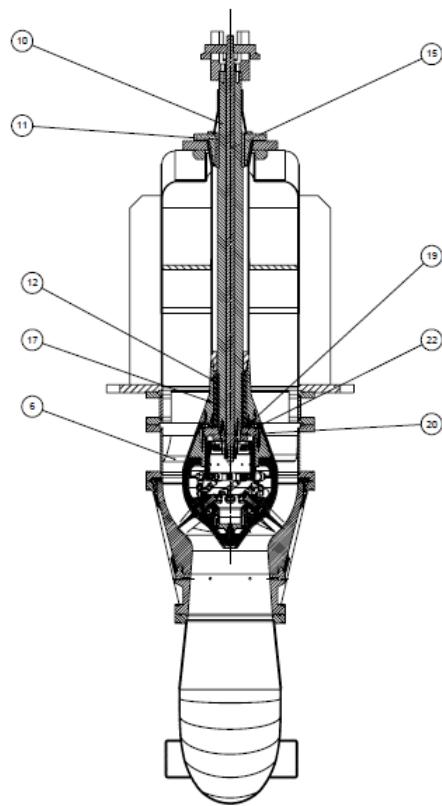


Figure 10. Dessin d'ensemble de la turbine Diagonale (coupe)

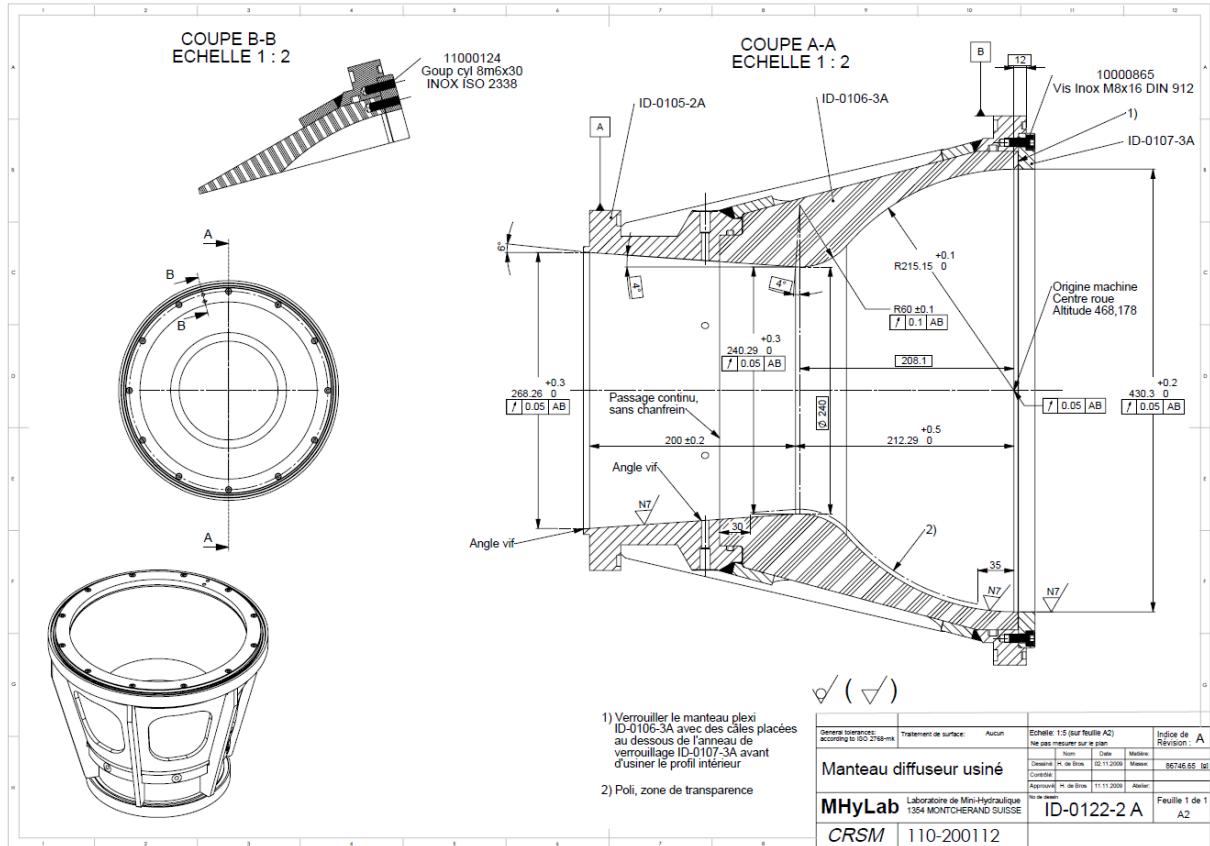


Figure 11. Dessin du manteau diffuseur usiné

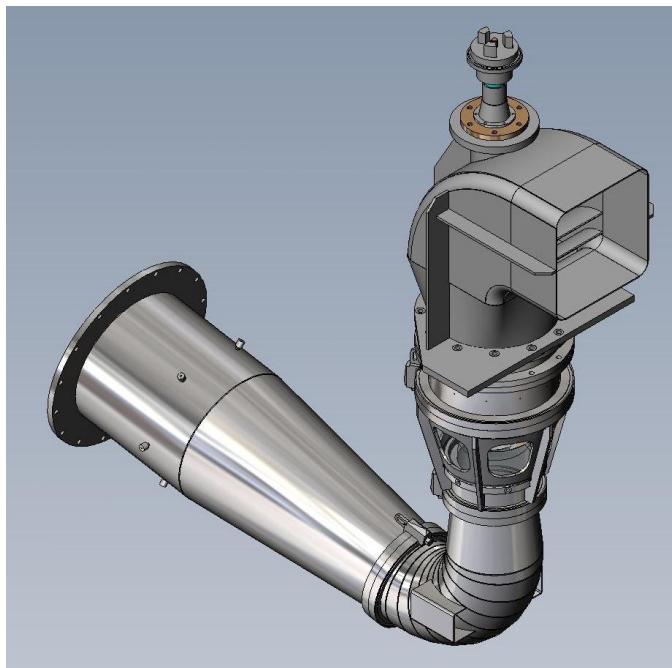


Figure 12. Vue globale de la turbine Diagonale

- Préparation du stand d'essais MHyLab en vue des prochains essais Diagonales.

Un nouvel étalonnage de l'ensemble des dispositifs de mesures, ainsi qu'une révision globale du stand ont été programmés en début d'année 2010, avant le montage de la turbine diagonale.

Collaboration nationale

En terme de soutien financier, en plus de l'*OFEN*, le projet est soutenu par *Swisselectric Research*³ et les *Services industriels de Genève (Fonds SIG NER)*⁴.

En terme de collaboration technique, la *Haute Ecole de Horw, Lucerne*⁵ pour les travaux de modélisation du rotor/stator reste impliquée jusqu'aux premiers résultats des tests sur le stand d'essais. Une prolongation de la collaboration est d'ores et déjà prévue pour le développement des solutions à 12, voire 10 pales.

S'ajoute la collaboration avec le bureau *Conception et Réalisation de Système de Montage*⁶ pour la conception mécanique de la turbine.

³ *Swiss Electric Research, Monbijoustrasse 16, 3001 Berne, www.swisselectric.ch*

⁴ *Fonds SIG NER – SIG – Service de l'électricité, case postale 2777, 1211 Genève, www.mieuxvivresig.ch*

⁵ *Hochschule Technik + Architektur Luzern (HSLU), Fluidmechanik & Hydromaschinen, Technikumstrasse 21, 6048 Horw*

⁶ *CRSM Bt H. de Bros, Conception et Réalisation de Système de Montage, Pugessies 65, 1400 YVERDON*

A noter également que l'équipe MHyLab pour la Diagonale s'est agrandie de deux nouveaux intervenants :

- M. Vullioud, expert hydraulicien, issus de Andritz Hydro, pour les travaux préparatoires et le suivi du projet
- M. Cottin, ingénieur, en charge notamment du programme de développement expérimental.

Collaboration internationale

Aucune collaboration internationale n'est à relever à ce jour.

Évaluation de l'année 2009 et perspectives pour 2010

Depuis l'obtention de l'aide financière de *Swisselectric research* en octobre 2008, le planning Diagonale (cf. Tableau 1) initialement soumis à l'OFEN a été révisé, tout en maintenant les mêmes objectifs, comme explicité en page 4.

Depuis 2007, les travaux réalisés considèrent plus particulièrement les objectifs globaux 1 et 2 définis en page 4, qui consistent à concevoir le modèle réduit qui sera monté sur le stand d'essai MHyLab, modèle réduit qui se doit d'être adapté pour 8, 10 ou 12 pales de manière à couvrir le domaine des moyennes chutes de 25 à 100 m.

L'objectif 8 portant sur la diffusion défini en page 4 a déjà été amorcé, avec la réalisation :

- D'une présentation lors de la conférence internationale Hydro 2009 qui s'est tenue à Lyon en octobre 2009 (cf. Annexe 1).
- D'un article dans notre revue Hydroscoop de novembre 2009 (cf. Annexe 2).
- D'un article paru dans la revue française sur la petite hydroélectricité HydroEnergie Revue de septembre 2009 (cf. Annexe 3).
- D'une plaquette et d'une affiche conçus par *Swisselectric research* (cf. Annexe 4 et Annexe 5).

Ainsi, l'année 2009 a permis de faire un grand pas en avant dans le projet Diagonale, le modèle réduit étant entièrement défini et sur le point d'être réalisé. Ce succès est notamment dû à la fructueuse collaboration avec la HSLU pour la partie modélisation et le bureau CRSM pour la partie conception mécanique.

Avec le montage du modèle réduit à 8 pales sur le banc d'essais en février 2010, les objectifs globaux 3, 4, 5, 6 et 7 de développement et d'optimisation technique et économique pourront être abordés.

D'ici-là, le laboratoire de MHyLab, auparavant adapté à la turbine Axiale, aura été réétalonné et équipé des dernières technologies disponibles en matière d'acquisition des données, notamment, de manière à recevoir cette nouvelle turbine, et commencer les nouveaux essais dans des conditions optimales.

Face aux résultats de la modélisation et aux nouvelles collaborations avec les ateliers mécaniques, nous sommes particulièrement confiants quant aux prochaines étapes d'optimisation du profil hydraulique sur le stand d'essais MHyLab.

Références

Le domaine exploré étant nouveau pour la petite hydraulique et ne faisant l'objet d'aucune publication récente à notre connaissance, nous ne pouvons citer d'ouvrages ou articles de référence.

Annexes

- Annexe 1. Présentation Diagonale, Hydro 2009, octobre 2009
- Annexe 2. Article Diagonale, Hydroscoop, MHyLab, novembre 2009
- Annexe 3. Article Diagonale, HydroEnergie Revue de septembre 2009
- Annexe 4. Plaquette Diagonale, *Swisselectric research* 2009
- Annexe 5. Affiche Diagonale, *Swisselectric research* 2009