Essais indépendants sur modèles réduits de turbines hydrauliques

Autor(en): **Avellan, François**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin.ch : Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, VSE = revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse, AES**

Band (Jahr): **105 (2014)**

Heft 2

PDF erstellt am: **03.06.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-856189

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Essais indépendants sur modèles réduits de turbines hydrauliques

Leur rôle dans le développement d'un nouvel aménagement hydroélectrique

Le développement et l'installation d'un nouvel aménagement hydroélectrique est un processus long et extrêmement onéreux. Afin de limiter la prise de risque sur le plan technique, des essais sur modèles réduits sont effectués pour valider les performances et la conception des turbines avant leur fabrication et montage sur site. Le rôle de ces essais est illustré à travers l'exemple du nouvel aménagement de Jirau, pour lequel l'EPFL a conduit les essais contractuels de réception des modèles réduits des turbines bulbes qui équiperont la centrale.

François Avellan

Le développement d'un nouvel aménagement hydroélectrique est un processus qui s'étend sur plusieurs années. Sans parler des études de faisabilité qui peuvent durer plusieurs décennies selon les circonstances économiques, environnementales et politiques, il s'écoule en général 5 à 8 années du lancement effectif d'un projet à la mise en exploitation commerciale de l'ensemble de l'aménagement.

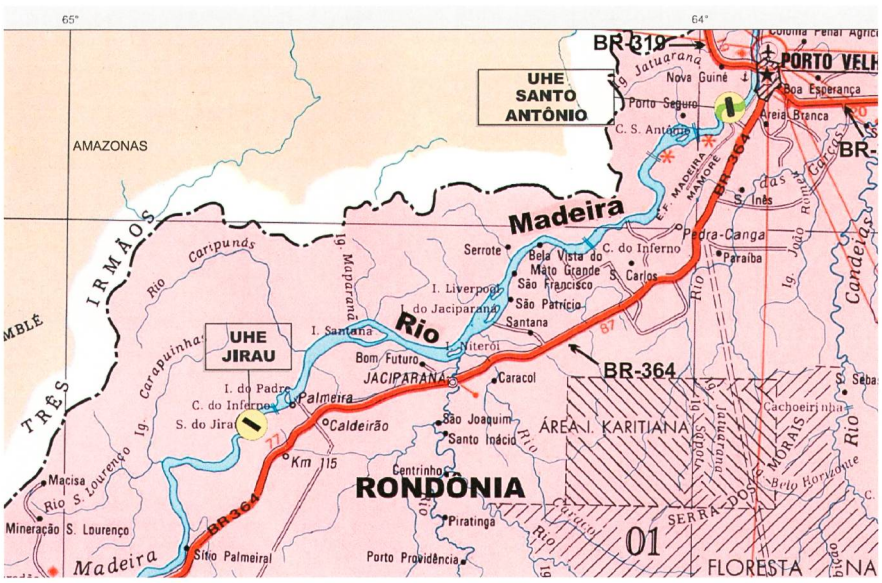
Dans l'exemple du projet hydroélectrique de Jirau, un aménagement au fil de l'eau d'une capacité de 3750 MW situé sur le Madeira, le principal affluent de l'Amazone, la société « Energia Sustentável do Brasil S.A. » [1] a obtenu la concession en août 2008 pour une durée de 35 ans après avoir remporté le 19 mai de la même année les enchères organisées par l'ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) [2]. Or la mise en exploitation commerciale du groupe 29, le premier des 50 groupes de 75 MW, n'est intervenue que le 19 septembre 2013, soit 61 mois après le démarrage officiel du projet ! On conçoit donc qu'il soit opportun de valider les options techniques du projet, et notamment celles qui ont présidé à la conception des turbines destinées à l'aménagement avant de lancer leur fabrication et installation, et ce, d'autant plus que la prise de risque du promoteur représente un enjeu financier majeur.

Le Laboratoire de machines hydrauliques de l'EPFL, qui est doté d'une infrastructure expérimentale unique, a été associé depuis plus de 40 ans à l'expertise des turbines des aménagements hydroélectriques les plus importants au monde, en effectuant en particulier les essais sur modèles réduits des turbines destinées à équiper les centrales planifiées. Ces essais permettent de valider les performances et la conception des turbines avant leur fabrication et ainsi de limiter la prise de risque sur le plan technique en assurant que les objectifs en termes de performance seront atteints.

Le rôle des essais sur modèles réduits sont illustrés dans cet article en se basant sur l'exemple du nouvel aménagement brésilien de Jirau, dont les essais contractuels de réception des modèles réduits des turbines bulbes qui équiperont la centrale ont été conduits par l'EPFL.

L'aménagement hydroélectrique de Jirau

L'aménagement hydroélectrique de Jirau se trouve à une centaine de kilomètres en amont de l'aménagement de Santo Antônio, lui-même situé aux abords immédiats de Porto Velho, la capitale de l'état de Rondônia (figure 1). Jirau fait partie avec Santo Antônio du complexe hydroélectrique du Madeira qui est connecté par une nouvelle ligne de 500 kV au système de transport électrique du Brésil. Il s'agit d'un aménagement « au fil de l'eau » afin de limiter la surface inondée à l'amont du barrage et répondre ainsi aux contraintes environnementales. Suivant la saison, la surface inondée à l'amont du barrage varie entre 31 km² et 108 km², ce qui correspond à un marnage annuel du niveau libre de 83 m à 90 m au-dessus du niveau de la mer, le niveau aval étant maintenu constant à 74 m pour l'aménagement aval de Santo Antônio.



Alstom Hydro

Figure 1 Localisation des aménagements hydroélectriques de Jirau et de Santo Antônio sur le Madeira en amont de Porto Velho, 1° ≈ 111 km.

Energia Sustentável do Brasil S.A.

Figure 2 Vue aérienne de l'aménagement de Jirau en cours de construction, 22 avril 2013.

François Avellan / EPFL

Figure 3 Trois vannes secteurs de l'évacuateur de crue vues de l'aval, largeur 20 m, 30 août 2012.

François Avellan / EPFL

Figure 4 Mise en place de l'armature des aspirateurs de la centrale rive droite en cours de construction, 30 août 2012.

Le barrage en enrochement avec noyau intérieur d'asphalte présente une longueur de crête de 1150 m et une hauteur maximale de 62 m **(figure 2)**. L'évacuateur de crue conçu pour un débit de 82 600 m^3/s comprend 18 vannes secteurs de 20 m de large **(figure 3)**. Sur la rive droite la première centrale **(figure 4)** accueille 28 groupes tandis que sur la rive gauche, la seconde centrale est équipée de 22 groupes.

Pour limiter les risques technologiques et obtenir après appel d'offre des prix compétitifs, le maître d'œuvre, Energia Sustentável do Brasil S.A., a choisi de répartir la fourniture des groupes entre deux constructeurs. C'est ainsi qu'ont été retenus d'une part le consortium CFJ (Consórcio fornecedor Jirau) regroupant Alstom Hydro, Andritz Hydro (en charge pour CFJ de la conception hydraulique de la turbine) et Voith Hydro pour la fourniture clé en main [1)] des 28 groupes de la centrale rive droite et, d'autre part, Dongfang Electric Corporation Limited, le constructeur établi à Chengdu dans la province du Sichuan en République populaire de Chine, pour celle des 22 groupes de la centrale rive gauche.

Les groupes sont dans les deux cas de type bulbe **(encadré)**, c'est-à-dire des groupes bulbes amont à axe horizontal avec un alternateur supporté par deux paliers guides, des aubes directrices diagonales et une roue axiale de type Kaplan dont l'inclinaison des pales est réglée en permanence **(figure 5)**.

D'une puissance unitaire de l'ordre de 75 MW, ces groupes sont, avec ceux de Santo Antônio, les groupes bulbes les plus puissants jamais installés jusqu'à présent **(tableau 1)**.

Choix technologique

Utilisation des groupes bulbes

Les aménagements hydroélectriques de basse chute sont équipés de groupe à axe horizontal de préférence à des groupes Kaplan à axe vertical afin de réduire les dimensions de la centrale. La disposition d'un groupe bulbe amont « aligné » dans le sens de l'écoulement est actuellement la configuration la plus fréquente à l'exemple de celle des 4 groupes de 25 MW, diamètre de roue 6,500 m, de la centrale germano-suisse de Rheinfelden. Toutefois le confinement de la machine électrique dans le bulbe limite le diamètre du rotor, et ainsi le nombre de pôles, ce qui amène parfois à intercaler un multiplicateur de vitesse entre la roue motrice et l'alternateur.

Alstom Hydro

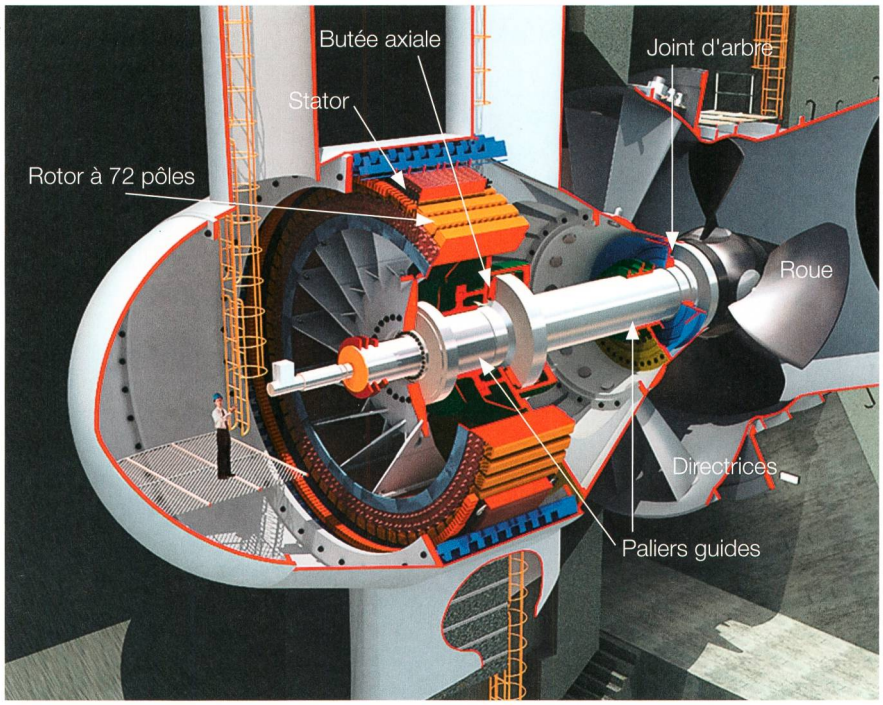


Figure 5 Vue éclatée d'un groupe bulbe (75 MW) de Santo Antônio montrant le générateur en puits (72 pôles, 100 min^{-1}), l'arbre supporté par les paliers guides, la butée axiale au niveau du générateur, les deux paliers guides et le joint d'arbre près de la roue, les directrices diagonales et la roue à 4 pales d'un diamètre de 7,5 m.

EPFL

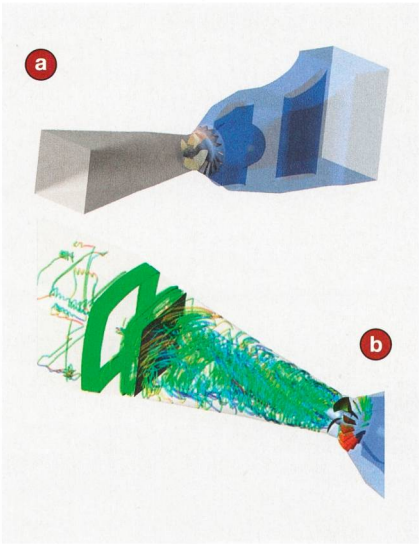


Figure 6 Simulations numériques de l'écoulement dans un groupe bulbe de conception Dongfang Electric Corporation avec les paramètres suivants : roue à 4 pales de 7,90 m de diamètre, vitesse de rotation de 85,71 min^{-1}, chute de 19,60 m, débit de 414 m^3/s et puissance de 74,1 MW. a) Vue du domaine de calcul. b) Représentation des trajectoires de l'écoulement dans l'aspirateur à la sortie de la roue.

Les essais sur modèles réduits

Energia Sustentável do Brasil S.A. a confié à l'EPFL le mandat d'effectuer les essais sur modèle réduit des turbines bulbes pour chacune des deux centrales selon la norme CEI 60193 [3]. Le contrat spécifiait en particulier :

- d'effectuer l'analyse d'écoulement par simulation numérique de la turbine bulbe de conception Dongfang Electric Corporation ;
- d'assister comme expert aux essais finaux sur modèle réduit dans chacun des laboratoires des deux constructeurs ;
- d'adapter le dispositif de mesure du couple à des roues de 0,400 m de diamètre ;
- d'effectuer une campagne d'essais sur modèle réduit pour chacune des deux turbines bulbes ;
- d'éditer les deux rapports d'essais officiels correspondants ;
- et finalement d'expédier les deux modèles réduits chez les constructeurs respectifs.

La première partie du mandat a donc consisté à effectuer une simulation numérique de l'écoulement turbulent dans la turbine bulbe conçue par Dongfang Electric Corporation afin notamment de valider qualitativement la conception hydraulique de l'aspirateur (figure 6) de ce constructeur qui man-

Aménagement	Année	Pays	Nombre de groupes	Puissance unitaire / MW	Vitesse / min^{-1}	Diamètre de roue / m
Jirau rive droite	2018	Brésil	28	76,55	94,74	7,500
Santo Antônio Roue à 4 pales	2016	Brésil	24	75,55	100,00	7,500
Jirau rive gauche	2018	Brésil	22	75,00	85,71	7,900
Santo Antônio Roue à 5 pales	2016	Brésil	20	71,05	100,00	7,500
Tadami	1989	Japon	1	65,80	100,00	6,700
Qiao Gong	2008	Chine	4	58,50	83,33	7,450
Rock Island	1979	USA	8	51,00	85,71	7,400

Tableau 1 Groupes bulbes d'une puissance unitaire supérieure à 50 MW.

Le LMH en bref

Une référence à l'échelle mondiale

Le Laboratoire de machines hydrauliques (LMH) de l'EPFL est un centre d'excellence académique de réputation internationale qui dispose d'une infrastructure expérimentale unique conforme à la norme CEI 60193 pour étudier et expertiser les turbines, pompes d'accumulation et pompes turbines des aménagements hydroélectriques. Dans la liste ci-dessous des aménagements hydroélectriques d'une capacité supérieure à 5000 MW sont indiqués ceux pour lesquels l'EPFL a conduit des essais sur modèles réduits.

Aménagement	Pays	Capacité / MW	Production / TWh	Essais EPFL
Les 3 Gorges	Chine	22 500	98,5	○
Itaipú	Brésil	14 000	98,3	✓
Guri (Raúl Leoni)	Venezuela	8850	53,41	✓
Tucurui	Brésil	8370	41,43	✓
Grand Coulee	USA	6809	20	✓
Longtan	Chine	6426	18,7	○
Krasnoyarsk	Russie	6000	20,4	○
Robert Bourassa (LG2)	Canada	5616	26,5	✓
Churchill Falls	Canada	5428	35	○

EPFL

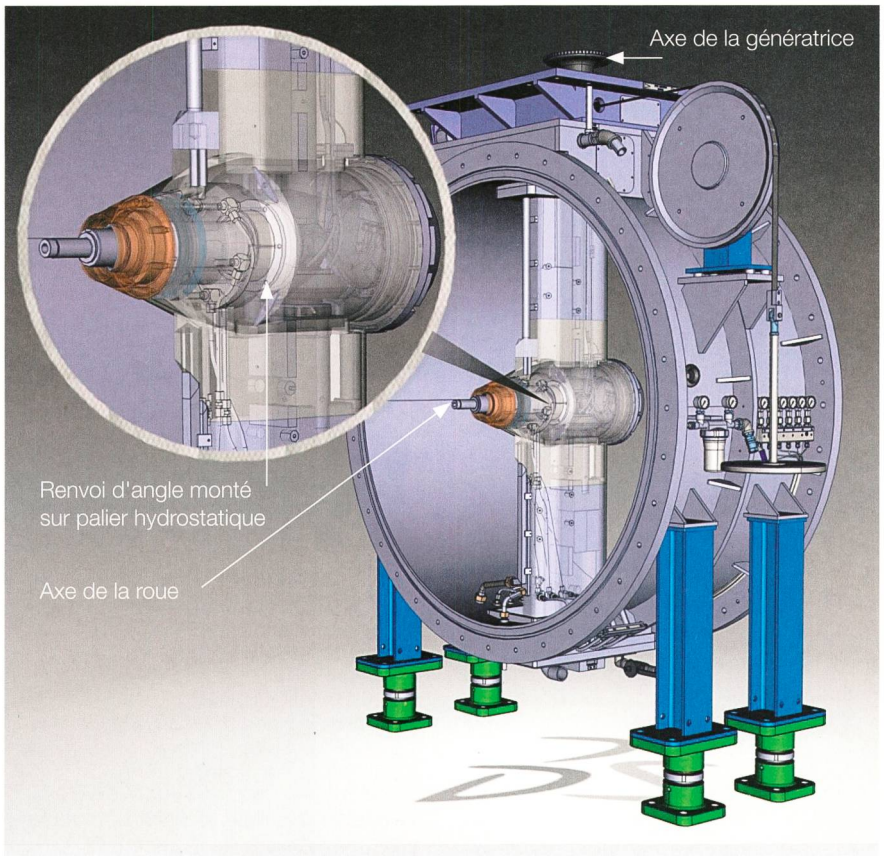


Figure 7 Vue éclatée du dispositif de mesure de couple et de poussée axiale monté sur palier hydrostatique destiné aux validations expérimentales sur modèles réduits des groupes bulbes (diamètre de référence de la roue : 0,400 m).

quait de référence en la matière. En effet, il s'agit d'un composant critique de la turbine qui a pour fonction de récupérer une partie de l'énergie cinétique de l'écoulement à la sortie de la roue, ce qui représente, dans le cas de Jirau, un tiers environ de l'énergie (chute) disponible.

L'expertise des essais finaux chez chacun des deux constructeurs avait pour but de confirmer la finalisation des développements par chacun d'eux et ainsi d'arrêter la conception hydraulique définitive des turbines avant de passer à l'étape des essais officiels de réception à l'EPFL.

Étant donné l'impact des incertitudes de mesures du rendement des groupes, 1 % d'incertitude sur cette mesure correspondant à une valeur de production annuelle d'énergie de près de 0,20 TWh, il a été convenu que le diamètre des roues à l'échelle du laboratoire serait porté à 0,400 m afin de pouvoir mesurer des valeurs de couples significatives et de réduire autant que faire se peut les effets d'échelle d'origine hydrodynamique. C'est ainsi que l'EPFL a développé un nouveau dispositif de mesure directe du couple et de la poussée axiale de la roue (figure 7). Ce dispositif comprend un renvoi d'angle à 90° entre l'axe horizontal du bulbe et la génératrice à arbre vertical de la plate-forme d'essai. Le renvoi d'angle est supporté en balance par un palier hydrostatique permettant ainsi une mesure directe du couple de réaction et de la poussée axiale après la mesure du bras de levier et l'étalonnage des capteurs de force associés. Ainsi l'erreur maximale sur la mesure du couple donnée par l'addition des erreurs systématiques et aléatoires a été de ± 0,063 % pour le modèle de Dongfang Electric Corporation et de ± 0,069 % pour celui d'Andritz Hydro respectivement.

Selon la norme internationale CEI 60193, les essais sur modèles réduits proprement dits se sont déroulés selon les phases successives suivantes :

- montage du modèle sur le renvoi d'angle (15 jours) ;
- installation du modèle réduit sur la plate-forme d'essais (15 jours) ;
- essais préliminaires (15 jours) ;
- essais officiels de réception en présence des représentants du maître d'œuvre (20 jours) comprenant l'étalonnage de toute l'instrumentation, la mesure du rendement pour 8 valeurs d'inclinaison des pales, la mesure de la poussée axiale, les essais de cavitation pour 3 valeurs d'inclinaison des pales, la mesure de la vitesse d'emballement pour 2 valeurs d'inclinaison des pales, la mesure des fluctuations de pression pour tous les points en conjugaison ;
- et enfin le contrôle dimensionnel à la fois des sections du modèle et de la géométrie des aubes directrices et des pales de roue (5 jours).

EPFL

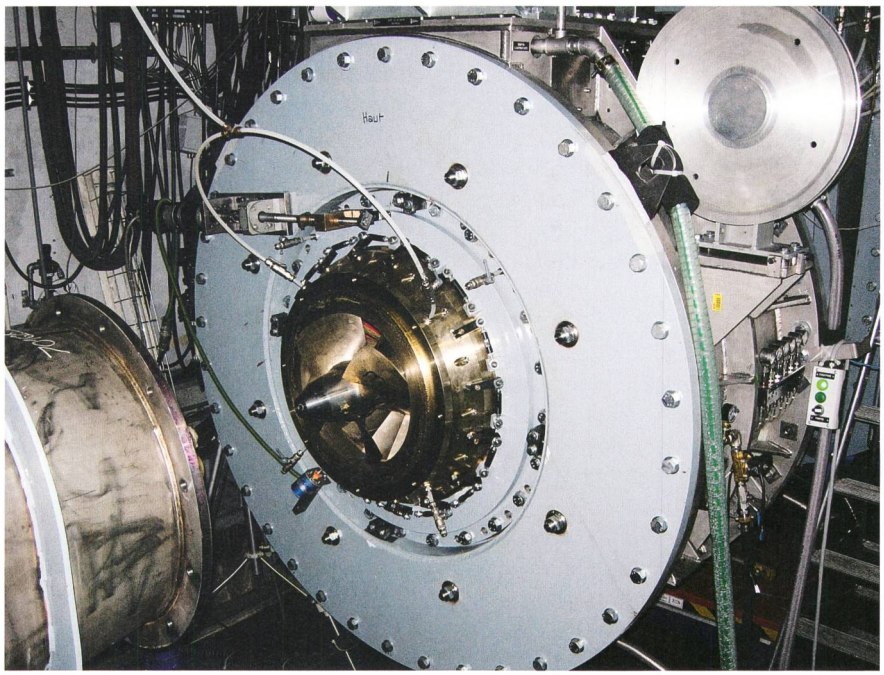


Figure 8 Modèle réduit CFJ Andritz Hydro monté sur le dispositif de mesure de couple à renvoi d'angle installé sur la plate-forme d'essai PF1 de l'EPFL (diamètre de la roue à 4 pales : 0,400 m).

EPFL

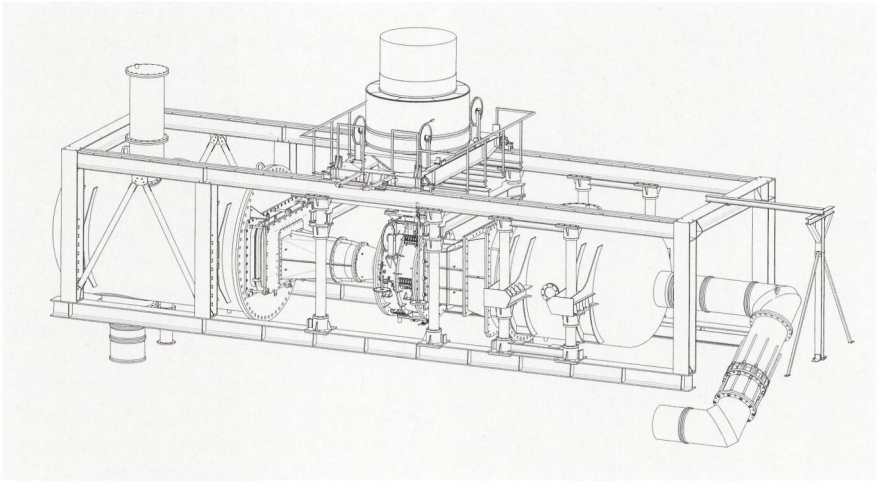


Figure 9 Modèle réduit de Dongfang Electric Corporation installé sur la plate-forme d'essai PF1 de l'EPFL.

Ainsi, les essais du bulbe CFJ Andritz Hydro **(figure 8)** se sont déroulés de février à mi-mai 2010 et ceux du bulbe Dongfang Electric Corporation **(figure 9)** de mi-mai à août 2010. Ils ont permis de valider dans chacun des cas les garanties de rendement maximal, de rendement moyen pondéré dans le domaine de fonctionnement des groupes bulbes avec une erreur inférieure à ± 0,3 %, les marges de cavitation et de fluctuations de pression, ainsi que les valeurs maximales de vitesse d'emballement si importantes pour la conception des générateurs.

Les coûts engendrés par la campagne d'essais sur modèles réduits des turbines bulbes de l'aménagement hydroélectrique de Jirau ont été de l'ordre de CHF 800 000 alors que l'investissement consenti par Energia Sustentável do Brasil S.A. pour la construction de l'aménagement s'élève à 10 milliards de reals brésiliens, soit à peu près 5,5 milliards de francs suisses (2010). La comparaison met en évidence la valeur de ces essais qui permettent de valider la technologie hydraulique à l'origine d'une production annuelle d'énergie électrique attendue de près de 20 TWh.

Conclusions

Les essais sur modèle réduit des turbines représentent une étape essentielle, voire critique, pour le développement d'un nouveau projet hydroélectrique. Ils permettent de valider les garanties de rendement promises par le fournisseur au maître d'œuvre et de vérifier si les valeurs des sollicitations d'origine hydraulique sont conformes à celles retenues pour la conception de la turbine. On voit donc l'intérêt de ces essais qui visent en fin de compte à évaluer si la turbine sera à même d'être exploitée dans le domaine de fonctionnement retenu pour l'aménagement avec le rendement et la fiabilité attendus.

C'est dans cette perspective et compte tenu des développements attendus de l'hydroélectricité pour les 30 prochaines années – on évoque une capacité de 1000 GW à installer dans le monde, soit autant que la capacité totale des aménagements actuels – que s'inscrit le projet EPFL Valais Wallis ayant pour objectif de renouveler et d'augmenter les infrastructures expérimentales de l'EPFL.

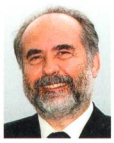
Références

[1] Energia Sustentável do Brasil S.A.: société constituée pour construire et exploiter l'aménagement hydroélectrique de Jirau avec les participations de GDF SUEZ (60 %), ELETROSUL (20 %) et de CHESF, Companhia Hidro Elétrica do São Francisco, (20 %). www.energiasustentaveldobrasil.com.br/.

[2] ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica: agence du gouvernement brésilien créée en 1996 en charge de la prospective et de la réglementation à la fois de la production, du transport, de la distribution et du commerce de l'énergie électrique à l'échelle nationale. www.aneel.gov.br/.

[3] CEI 60193: Norme internationale. Turbines hydrauliques, pompes d'accumulation et pompes-turbines – Essais de réception sur modèle. Commission électrotechnique internationale. 2e édition, 1999-11.

Informations sur l'auteur



Prof. Dr Ing. **François Avellan** est ingénieur hydraulicien diplômé de l'École nationale supérieure d'hydraulique de l'Institut national polytechnique de Grenoble et a obtenu le titre de docteur ingénieur de l'Université d'Aix Marseille II. Professeur ordinaire à l'EPFL, il est le directeur du Laboratoire de machines hydrauliques. Auteur de nombreuses publications, il a été de 2002 à 2012 le président de la Section machines hydrauliques et systèmes de l'AIRH (Association internationale de recherche hydraulique). Il a reçu le « Grand prix 2010 de l'Hydrotechnique » décerné par la SHF (Société hydrotechnique de France) et le « IEC 1906 Award » que la CEI (Commission électrotechnique internationale) lui a décerné en 2011. Il préside le groupe d'experts MT32 de la CEI de révision de la norme internationale CEI 60193.

EPFL, Laboratoire de machines hydrauliques, 1015 Lausanne, francois.avellan@epfl.ch

L'auteur souhaite vivement remercier Luiz Palma, Ingénieur de Energia Sustentável do Brasil S.A., pour avoir mis à sa disposition la documentation sur le projet de Jirau, Luciano dos Santos, ingénieur d'Alstom Hydro, pour avoir organisé la visite du chantier de Jirau et Henri-Pascal Mombelli, responsable du groupe essais sur modèles réduits du Laboratoire de machines hydrauliques de l'EPFL.

[1] Contrat « clés en main » : contrat de type EPC (Engineering, Procurement and Construction).

Zusammenfassung **Unabhängige Versuche mit verkleinerten Turbinenmodellen**

Ihre Rolle bei der Entwicklung neuer Wasserkraftanlagen

Die Entwicklung und Installation einer neuen Wasserkraftanlage ist langwierig und sehr kostspielig. Um die Risiken im technischen Bereich zu minimieren, werden Modellversuche durchgeführt, die eine Überprüfung der Turbinenleistung und -auslegung vor der Fertigung und Montage vor Ort ermöglichen. Die Rolle dieser Tests wird in diesem Artikel am Beispiel des Jirau-Projekts erläutert, einer Wasserkraftanlage am Rio Madeira, dem Hauptnebenfluss des Amazonas in Brasilien, mit einer Kapazität von 3750 MW.

Es besteht aus 50 Rohrturbinensätzen mit jeweils 75 MW (die leistungsstärksten, die je eingesetzt wurden), verteilt auf zwei Stationen mit 28 bzw. 22 Turbinensätzen. Die Lieferung wurde auf zwei Firmen aufgeteilt (eine pro Station). Um zu beurteilen, ob die Turbinen innerhalb des für die Anlage vorgesehenen Funktionsbereichs mit der erwarteten Leistung und Zuverlässigkeit genutzt werden können, wurde das Labor für hydraulische Strömungsmaschinen der ETH Lausanne mit der Durchführung von Versuchen an verkleinerten Turbinenmodellen gemäss IEC 60193 für jede der beiden Anlagen beauftragt.

Die für die Modellversuchsreihe angefallenen Kosten liegen bei rund 800 000 CHF, während die Gesamtinvestitionskosten für den Bau des Wasserkraftwerks bei etwa 5,5 Mia. CHF liegen (2010). Der Vergleich unterstreicht die Bedeutung der Versuche für die Überprüfung der eingesetzten Technik, mit der in Zukunft immerhin eine jährliche Stromproduktion von fast 20 TWh gewährleistet werden soll. CHe