

PUISSANCE HYDRO

Le magazine de
l'hydroélectricité
25 €

#40
décembre 2024
janvier 2025

DOSSIER

Moulins et petites puissances : quelles turbines, à quels prix ?



EN PRATIQUE

La DGEC décrypte
le nouveau contrat H16

INNOVATION-RECHERCHE

De l'acier laminé
à l'électricité

À LA LOUPE

Centrale de Fresse
(Haute-Saône)

Moulins et petites puissances : quelles turbines, à quels prix ?

Il existe un important potentiel de production d'hydroélectricité grâce à la rénovation des sites de petites puissances. Les investissements y étant complexes à rentabiliser, l'autoconstruction est souvent la règle. Aujourd'hui, des solutions abordables sont disponibles pour toutes les hauteurs de chutes et débits, depuis la traditionnelle roue à aubes jusqu'à la petite Pelton de haute chute, en passant par les vis hydrodynamiques, les Kaplan et les crossflow.





Le moulin de Beaumer, à Monts en Loire-et-Loire, a été l'un des premiers sites équipés d'une vis hydrodynamique en France.
Photo : Jérôme Chabaudie



Autoconstruction et standardisation

Même si l'équation pour rentabiliser un site de moins de 50-60 kW reste compliquée à résoudre, de multiples porteurs de projets y parviennent en réalisant certains travaux par eux-mêmes. De plus, pour tous les sites, il existe aujourd'hui des machines avec un bon rapport rendement/prix grâce notamment à la standardisation. Par [Juliette Fihman-Talpin](#)

Ah, les fameux coûts fixes ! Qu'un site produise quelques milliers de kWh ou plusieurs millions, ces charges varient peu et pèsent lourd sur l'investissement. Les chiffres parlent d'eux-mêmes. Selon l'étude de l'ADEME sur le coût des énergies renouvelables et de récupération de 2024 (basée sur les installations réalisées en 2021 et 2022), le montant moyen d'investissement, pour une centrale de moins de 1 MW, est de 5 388 € HT/kW, mais il peut atteindre 10 000 € HT pour des installations de basse chute de quelques kW installés.

Pour minimiser ce coût, les porteurs de projets doivent se montrer "débrouillards" et prendre en charge une grande partie des travaux. Le poste clé est le génie civil car il représente une part importante de l'investissement. Mais le futur producteur doit être épaulé par des personnes compétentes (maçon, bureau d'études) pour répondre

aux exigences structurelles qu'imposent la mise en place d'une machine de plusieurs tonnes. L'idéal est aussi qu'il dispose de compétences en chaudronnerie pour rénover/réaliser par lui-même les vannes et la grille.

Solutions clé-en-main

Les fournisseurs de turbines proposent en général des solutions clé-en-main comprenant la turbine, le multiplicateur (souvent par poulie-courroie), la génératrice, le groupe hydraulique, ainsi que les armoires de commande et électrique. Certaines sont même livrées "prêtes à l'emploi", après un montage de quelques jours. Alors que la règle en hydroélectricité est en général le sur-mesure, les machines de petites puissances sont le plus souvent standardisées pour réduire le temps de



Les turbines de petites puissances sont en partie standardisées et souvent livrées clé-en-main avec la génératrice, le contrôle-commande et l'armoire électrique. Ici, la centrale de Claude Glise (lire en page 48). Photo : Irem

conception et le coût de fabrication. L'objectif est ici de maximiser le rapport entre la performance et le coût plutôt que de gagner les derniers points de rendement grâce à un profil hydraulique optimisé. Les fournisseurs de ces machines se défendent toutefois de faire du "low cost" ; l'idée est plutôt de fournir du matériel simple et robuste. Sur les moulins de basse chute, en complément aux roues à aubes, de nombreuses solutions existent désormais avec des vis hydrodynamiques ou des turbines Kaplan. Concernant ces dernières, l'offre est désormais large avec l'arrivée de nouveaux acteurs sur ce marché des petits

diamètres, proposant aujourd'hui des machines aussi bien verticales, qu'inclinées ou de type bulbe. En petites puissances de moyenne chute, la turbine Francis est quasi absente, souvent remplacée par la crossflow, moins chère et plus simple à exploiter. Sur les torrents ou captages de haute chute, les petites Pelton semi-standardisées ont montré leur efficacité, un marché qui intéresse aussi de nouveaux fournisseurs. Une bonne nouvelle qui offre encore plus de possibilités aux porteurs de projets sur de petits sites. Tant mieux car chaque kilowattheure d'énergie renouvelable compte, rappelons-le ! —

La roue à aubes : un classique qui tourne toujours !

Valeur patrimoniale, simplicité mécanique, diversité des modes de fonctionnement La roue à aubes est aujourd'hui encore une des solutions technologiques privilégiées pour les très basses chutes de moins de 2 m et les petites puissances de 10 à quelques dizaines de kW.

Par Bruno Morgat. Illustrations : Wikipedia

Utilisée depuis des siècles dans les moulins, la roue à aubes reste souvent la seule solution pour continuer à y valoriser la force de l'eau. Elle se décline en plusieurs types, chacun adapté à des conditions spécifiques de débit et de hauteur de chute. Le choix du matériau dépend du budget et du contexte. Les roues en bois, moins durables, sont privilégiées pour les mises en valeur patrimoniales, mais l'acier et l'inox, plus coûteux, offrent un meilleur rendement à long terme.

Bien que les fabricants de roues à aubes se fassent rares, des artisans et petites entreprises spécialisées comme Croix et Fils (voir encadré), perpétuent ce savoir-faire. La conception de ces roues sur mesure nécessite cependant l'appui de spécialistes pour

déterminer le dimensionnement optimal en fonction du site, comme Novea Technologies (Maine-et-Loire), Moulins Demain (Paris), Askeul (Rhône), Gratia Hydro (Meurthe-et-Moselle)...

Roues par en-dessous

Alimentées par le bas de la roue, grâce à la vitesse de l'eau, elles conviennent pour des débits de 0,1 à 2 m³/s et des hauteurs de chute inférieures à 1,50 mètre. De par leur conception, l'écoulement de l'eau est progressif et génère peu de turbulences et d'éclaboussures, d'où un faible niveau de bruit. Parmi elles, trois profils se distinguent : Sagebien, Poncelet et Zuppinger.



Six générations d'amouleurs

Depuis 1845, la société Croix et Fils perpétue le métier d'amouleur, c'est-à-dire l'art de fabriquer des roues à aubes. Cette entreprise familiale, basée dans le Maine-et-Loire, maîtrise l'ensemble du processus de fabrication. Elle est autonome pour l'approvisionnement en bois grâce à sa propre scierie et assure la fabrication complète de roues Poncelet, ou plus souvent Zuppinger, généralement conçues avec des bureaux d'études partenaires. Grâce à ses compétences en charpente et en métallerie, elle travaille aussi bien sur la restauration de moulins historiques que sur des projets modernes de petite hydroélectricité.



La société Croix et Fils fabrique 5 à 6 roues par an en bois ou en acier. *Photo : Croix et Fils*

E&S

Bureau d'études spécialiste
de l'hydroélectricité

Contactez-nous !

Adresse :

5 bis rue du Prieuré
31000 Toulouse

Téléphone :

06 24 80 58 71
05 62 89 51 10

Email :

contact@es-hydro.com

Site internet :

www.es-hydro.com



MISE EN CONFORMITÉ
PISCICOLE ET
SÉDIMENTAIRE



CONSTRUCTION &
RÉNOVATION



CRÉATION &
RENOUVELLEMENT
D'AUTORISATION



MAÎTRISE D'ŒUVRE



RECHERCHE &
RECONNAISSANCE DE
DROIT D'EAU

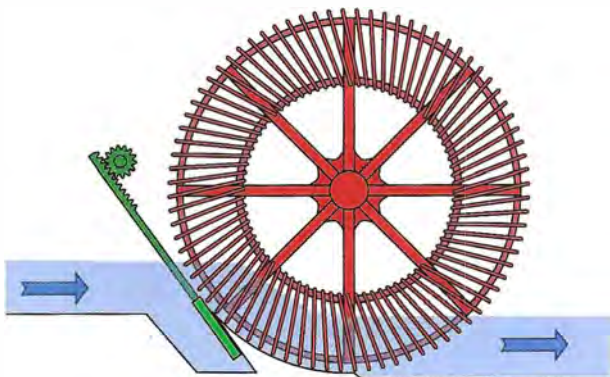


EXPLOITATION/
MAINTENANCE/
OPTIMISATION



ÉTUDE
DE PRODUCTIBLE

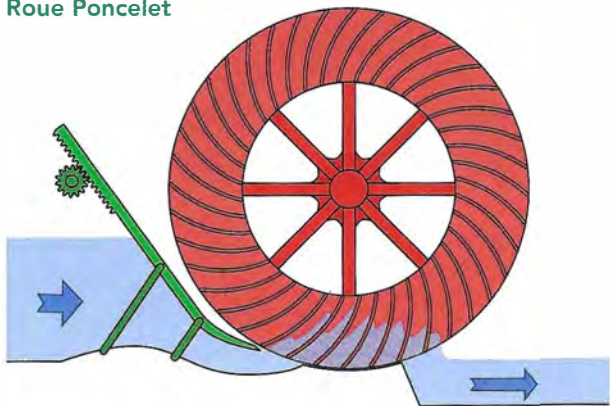
Roue Sagebien



La roue Sagebien excelle sur des chutes de 0,60 à 1,50 m où elle atteint un rendement de 80 à 90 %. Son couple important, dû à la quantité d'eau stockée dans ses aubes¹, est un atout. Cependant, sa faible vitesse de rotation impose l'utilisation de plusieurs étages de multiplication, pénalisant le rendement global intégrant ceux du multiplicateur et de la génératrice (55 – 60 %).

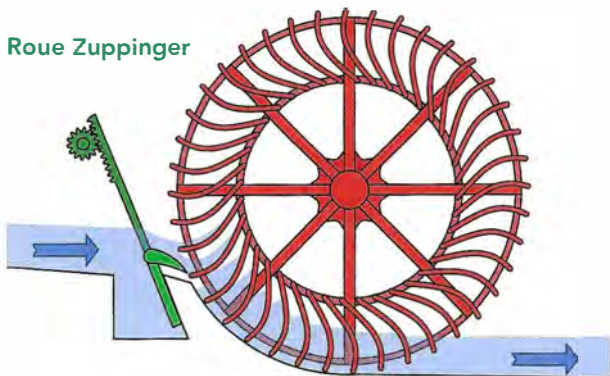
¹ Dans les roues Sagebien, c'est l'énergie potentielle de l'eau qui est déterminante. Les aubes pénètrent dans l'eau à un angle de 45° avec l'horizontale. Elles permettent à l'eau d'entrer sans choc dans les aubages grâce à la vitesse similaire de la roue, laissant l'eau agir uniquement par son poids.

Roue Poncelet



La roue Poncelet est idéale pour les chutes de 0,5 à 1,50 m avec un débit stable, qui lui permettent d'atteindre un rendement de 55 – 60 %. Contrairement à la Sagebien, elle tire profit de la vitesse de l'eau, grâce à des aubes incurvées vers son centre, permettant une rotation plus rapide et une transmission avec moins d'étages de multiplication. Son rendement global est ainsi moins dégradé (40 – 50 %).

Roue Zuppinger



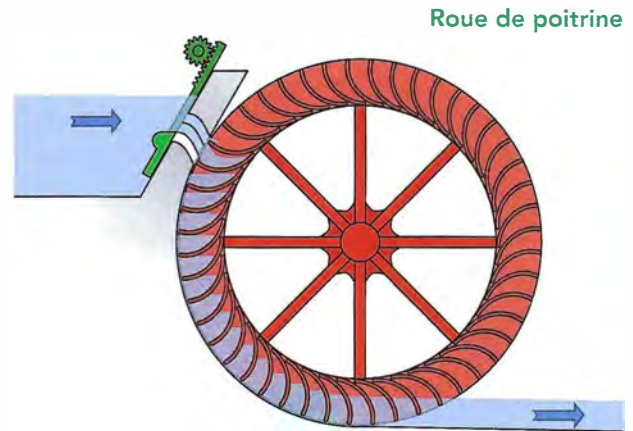
La roue Zuppinger, convient aux chutes de 1 à 3 m pour des débits de 0,5 à 2 m³/s. Avec ses aubes arrondies vers l'extérieur, elle offre un rendement élevé (jusqu'à 80 %) en optimisant l'injection et l'évacuation de l'eau. L'eau entre à une hauteur légèrement supérieure à celle de la roue Sagebien, pour exploiter à la fois le poids et l'énergie cinétique de l'eau. Sa géométrie permet des vitesses périmétriques plus importantes que la Sagebien sans compromettre le rendement global (80 %).



Roues de poitrine

Les roues de poitrine, alimentées au niveau médian, utilisent surtout l'énergie potentielle de l'eau. Elles sont adaptées aux chutes de 1,50 à 3 m. Moins courantes en France qu'en Allemagne, elles nécessitent un vannage précis² pour optimiser leur rendement, généralement autour de 60%, mais seulement 30% après transmission.

² Le vannage doit guider l'eau de façon à ce que la vitesse d'entrée de l'eau ait une direction située à l'intérieur de l'angle défini par la vitesse d'entraînement et la vitesse relative le long de l'aubage.



Roue de poitrine



**CONCEPTION
FABRICATION
INSTALLATION
MISE EN SERVICE
RÉNOVATION**



**FABRICANT FRANÇAIS DE TURBINES HYDRAULIQUES
& ÉQUIPEMENTS HYDROMÉCANIQUES**



**TURBINES DE 1,5M À 1000M DE CHUTE
VANELLERIE SUR MESURE
PLUS DE 400 MW INSTALLÉS**



La Région
Auvergne-Rhône-Alpes



www.hydropowerplant.com
hpp@hydropowerplant.com
+33 3 83 28 52 19

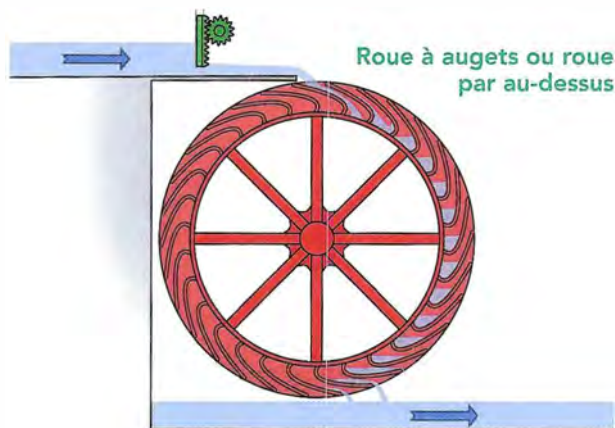
Roues par au-dessus

Les roues par au-dessus, ou roues à augets, alimentées par le haut, exploitent l'énergie potentielle de l'eau pour des chutes de 5 à 12 mètres. Leur rendement global atteint 60 % du fait de l'éjection de l'eau des augets à haute vitesse. Les performances peuvent cependant varier en fonction des caractéristiques du site.

Par exemple, le moulin de la Combelle sur la Volane à Antraigues-Asperjoc (Ardèche), dont Lilian Ranc est propriétaire depuis 2 ans (6 m de chute, 25 kW), dispose d'une roue à augets inox de 4,50 m de diamètre, assez atypique. "Construite par un artisan, cette roue tourne



Au moulin de la Combelle (Ardèche), la roue par au-dessus de 4,50 m, sur une chute de 6 m pour 25 kW, dispose d'un rendement global de 50 %, compensé par une vitesse de rotation élevée. Image : Lilian Ranc



à 15 tr/min, soit deux fois plus vite qu'une roue par au-dessus classique". Comme elle prend aussi beaucoup plus d'eau, cela lui assure un bon niveau de production malgré un rendement global de seulement 50 %.

Seuil de rentabilité à 10-15 kW

Pour Dominique Quinton, responsable commercial chez Novea Technologies, "pour un chantier vierge de toute installation, il est difficile d'envisager une turbine ou même une vis en-dessous de 1,20 m de chute. La roue à augets est alors la seule solution". Son seuil de rentabilité est estimé entre 10 et 15 kW, avec un coût d'installation pouvant atteindre 6 000 € par kW. Maxime Delacourt, fondateur de Moulins Demain rappelle que "la rentabilité d'un projet est toujours meilleure avec une turbine qu'avec une roue". Néanmoins, le choix d'une roue peut se justifier dans une réflexion plus globale, intégrant des aspects patrimoniaux ou environnementaux.

Dans le cas d'un moulin existant, la première étape consiste à analyser le génie civil en place. Dominique Quinton explique : "Il faut comprendre ce qu'avait voulu faire l'ancien meunier, voir quel type de roue il voulait utiliser, car le coursier (le canal qui dirige l'eau vers la roue) est normalement spécifique à la roue".



Les contraintes structurelles, comme la présence de bâtiments ou l'état des bajoyers (les murs latéraux qui supportent la roue, ndlr), limitent souvent le choix de la technologie. Ainsi, une roue Sagebien, qui exige un génie civil très précis pour minimiser les pertes d'eau, ne serait pas adaptée à des murs rugueux ou mal jointoyés. Thierry Croix, dirigeant de la société Croix et Fils, le confirme : "la géométrie de la roue dépend toujours du génie civil existant". Dominique Quinton conseille également de respecter autant que possible les conditions d'utilisation spécifiques à chaque type de roue. "Dans 90 % des situations, ces règles ne sont pas respectées, c'est pourquoi les rendements sont toujours inférieurs à ceux revendiqués par leur concepteur". Il souligne également l'importance

du système de vannage pour optimiser le rendement. Enfin, bien que les roues à aubes aient un impact limité sur les poissons, leur ichtyocompatibilité n'est pas encore officiellement reconnue par les pouvoirs publics français. "Les autorités comprennent qu'une machine lente est moins dangereuse pour la faune, mais ce n'est pas automatique" précise Dominique Quinton. Quand c'est le cas, "c'est un gros avantage pour le montage du dossier, témoigne Lilian Ranc. J'ai un module de 2,8 m³/s et une roue qui prend 680 l/s. J'ai une goulotte de 50 cm de côté dans le barrage qui équivaut pour la préfecture à une dévalaison à 280 l/s, d'où un dossier très allégé par rapport à une turbine Kaplan, et un investissement réduit". —

4^e producteur d'hydroélectricité en France

Vous êtes producteur ou porteur de projet ?

Vous cherchez :

- À valoriser votre production au sortir de l'obligation d'achat
- À céder votre actif hydroélectrique
- À optimiser la conception ou l'exploitation de votre installation
- Un partenaire technique et financier pour vous accompagner dans votre projet

Informations et contact :

www.hydrocop.fr



 GROUPE
Hydrocop

www.hydrocop.fr



Des petites vis dans des sites autoconstruits

Les vis hydrodynamiques sont entrées dans le paysage des basses chutes depuis plus de 20 ans, avec un avantage important, leur ichtyocompatibilité. Pour rentabiliser les sites de petites puissances, les propriétaires autoconstruisent en grande partie la centrale.

Par Aude Richard et Juliette Fihman-Talpin

Prébiscitées par l'administration, les vis constituent aujourd'hui une solution reconnue pour les basses chutes de petites puissances. " *Les maîtres d'œuvre se posent maintenant systématiquement la question entre une turbine et une vis mais sur ce type d'installations plus complexes à rentabiliser, le porteur de projet doit pouvoir prendre en charge en partie le génie civil, la vannellerie voire l'électricité*", souligne Alexandre Gerst, responsable commercial France de Vandezande. Dans l'Hexagone, le fabricant belge a installé deux machines de très petites puissances. Une

Au moulin de Bénac (Hautes-Pyrénées), les propriétaires ont réalisé eux-mêmes le génie civil, la vannellerie et l'électricité de leur vis de 17 kW. Photo : Vandezande





de 75 kW à Arbois dans le Jura (lire *Puissance Hydro #2*) et une de 17 kW à Bénac dans les Hautes-Pyrénées pour laquelle les propriétaires ont réalisé une grande partie des travaux par eux-mêmes. "Nous ne faisons pas de *low cost* pour ces sites, la qualité de la machine est la même, mais nous accompagnons davantage les clients pour s'assurer d'une bonne réalisation du génie civil", ajoute-t-il.

Simple, robuste et ichtyocompatible

Le principal atout de la vis est son ichtyocompatibilité. Les poissons peuvent dévaler par les spires qui tournent à une vitesse inférieure à 50 tr/min, permettant ainsi de s'affranchir d'une grille fine et du débit de dévalaison. Comme des inter-barreaux de 10 à 15 cm suffisent, "dans 90 % des cas, on pourra se passer de l'utilisation d'un dégrilleur", ajoute Alexandre Gerst. La grille est inclinée à 70° et non à 20°, ce qui réduit significativement la taille des prises d'eau.

Le principe est simple et robuste, sans réglage mécanique, ce qui limite les pannes. Néanmoins, il est possible de faire varier la vitesse avec l'électronique de puissance. Rudy Yvrard, directeur commercial de HPP, fournisseur de la vis Elléo, et unique fabricant français (Vosges, en partenariat avec Joyeaux), ne le recommande que dans des cas particuliers. "Sur un moulin, le gain de productible n'est pas flagrant et l'investissement est difficilement amortissable". Le génie civil est moins profond et moins complexe que pour l'installation d'une turbine Kaplan. Deux murs bajoyers, un radier supportant le haut de la vis et une auge recevant la vis suffisent. C'est ce qui a séduit Philippe et Patricia Daragon à Roanne (Loire) qui ont installé une vis Elléo de 36 kW (2,10 m de hauteur de chute et 2,1 m³/s de débit). Elle mesure 11 m de long

Un pionnier de la vis

Le moulin de Beaumer, à Monts en Indre-et-Loire, a été l'un des premiers sites équipés d'une vis hydrodynamique en France. Elle a été construite par l'entreprise Joyeaux (Sarthe) dans les années 2000. Avec une puissance de 10-12 kW, elle produit environ 50 000 kWh/an. Elle est précédée par une grille avec des inter-barreaux de 15 cm qui la protège tout en permettant aux poissons de dévaler. Une vingtaine d'années après son installation, Bernard Lecocq, le propriétaire de l'époque en était pleinement satisfait. "La vis génère un léger bruit et a une esthétique plutôt industrielle. Néanmoins, c'est idéal pour les faibles hauteurs d'eau, pour la rusticité du système et pour l'entretien très sommaire qu'elle nécessite, avec une quasi-absence de maintenance", disait-il encore en 2019 lors d'une visite organisée par l'association des Moulins de Touraine, avant de conclure : "la vis, on l'oublie et c'est drôlement agréable !". Suite à son décès, c'est Alexandra Monie, sa fille, qui va prendre le relais de l'exploitation du moulin.



Le moulin de Beaumer, à Monts en Indre-et-Loire, a été l'un des premiers sites équipés d'une vis hydrodynamique en France, dans les années 2000. Avec une dizaine de kW de puissance, elle produit environ 50 000 kWh/an.
Photo : DR



Au moulin de Cezi à Arbois (Jura), la vis hydrodynamique de 75 kW turbine 2,50 m de hauteur de chute brute et un débit de 0,4 à 4 m³/s, pour une production moyenne de 140 000 kWh/an.
Photo : Benoît Gresset

pour un diamètre de 2,50 m, dont 2,20 m pour l'hélice à trois spires, et produit 124 000 kWh/an (lire *Puissance Hydro #20*).

Rendement moindre et impact sonore

Un des inconvénients des vis vient de leur moindre rendement, de l'ordre de 5 à 10 %, par rapport à une Kaplan. Mais Alexandre Gerst relativise. "*Au nominal, les rendements sont effectivement plus faibles, mais*

dès que l'on s'en écarte, la vis peut être plus compétitive". Autrement dit, plus les hauteurs des lignes d'eau varient et plus la vis sera pertinente. La question du bruit est aussi à souligner. Étant hors de l'eau, la vis joue un rôle pédagogique, mais les entrées et les sorties d'eau clapotent ! Les fabricants travaillent sur les profils des spires afin d'atténuer ce désagrément.

Ajoutons qu'une vis est très lourde et nécessite des grues imposantes sur le chantier. Toutefois, aux Forges royales de Guérisny (Nièvre), la Sem Nièvre Énergies a réussi à intégrer une vis du fabricant néerlandais Landustrie de 54 kW (2,50 m de diamètre) dans ce site historique. "*Nous ne pouvions pas installer la grue à l'endroit*

optimum, l'auge et la vis ont donc dû être levées et déplacées, avec beaucoup de précautions, au-dessus d'un de ces bâtiments classés", explique Pascal Vautrin, co-gérant de ER3i, l'entreprise qui a fourni et posé tout le groupe de production.

Pour un site de moins de 50 kW, le prix d'une vis varie de 4 000 à 7 000 €/kW installé (hors vanne, électricité et génie civil). Ce montant est plus élevé que celui d'une turbine mais il est en partie compensé par un coût moindre de la prise d'eau et par l'absence de débit dédié à la dévalaison. —



FIBER

**BUREAU D'ÉTUDES SPÉCIALISTE DE
L'INGÉNIERIE HYDROÉLECTRIQUE**

Gestion des droits d'eau

- ✓ Reconnaissance de droits fondés en titre
- ✓ Dossier d'autorisation : renouvellement et création
- ✓ Médiation de projet

Études et conseils

- ✓ Étude de faisabilité technico-économique
- ✓ Optimisation énergétique et revalorisation de contrat d'achat
- ✓ Recherche de compromis dans l'aménagement de la continuité écologique

Suivi de chantier

- ✓ Maîtrise d'œuvre
- ✓ Assistance à maîtrise d'ouvrage
- ✓ Recherche de l'économie de construction et respect des règles de l'art de bâtir



**UNE ÉQUIPE D'INGÉNIEURS EXPÉRIMENTÉS ET
PLURIDISCIPLINAIRES PRÊTS À VOUS ACCOMPAGNER**



Agence Toulouse

21 impasse Romain Rolland
31600 Muret



Agence Albi

54 avenue du Colonel Teyssier
81000 Albi



06 89 62 70 60



contact@fiber-hydro.com

www.fiber-hydro.com

Du nouveau dans les petites Kaplan

À axe vertical, incliné ou horizontal. Simple ou double réglage. Avec ou sans variateur de vitesse. L'offre de technologies utilisant une roue Kaplan pour les petites puissances, est en train de s'élargir. Par Juliette Fihman-Talpin

Chez René Cachard, la véranda n'est pas du tout dédiée au farniente. L'ambiance y est même dynamique puisque cette pièce abrite non pas des fauteuils douillets mais une turbine. À Mazet-Saint-Voy (Haute-Loire), sur le Lignon, son moulin était équipé d'un bulbe vertical Leroy-Somer, doté d'un fastidieux réglage de pales manuel. Mais l'ancien professeur de mathématiques a su faire ses calculs. Pour maximiser la production des 3,80 m de chute nette pour 1,12 m³/s de débit, il lui a préféré une Kaplan double réglage à axe vertical Watec Hydro de 500 mm de diamètre (34 kW, pales et directrices réglables). Elle fonctionne avec une multiplication par poulie-courroie et une génératrice asynchrone. Pour minimiser l'investissement, il a refait tout le génie civil avec ses deux frères et son cousin maçon, entre septembre et décembre 2016 (avec des interruptions). "L'équipe de Watec Hydro a consacré

toute une journée à la prise de cotes et nous a fourni un plan très précis, puis nous devons leur envoyer fréquemment un compte-rendu avec des photos et des mesures, nous avons travaillé main dans la main", témoigne-t-il. La production de 135 000 kWh/an en moyenne lui assure une recette d'environ 23 000 €/an. L'investissement s'est élevé à environ 115 000 € dont près de 65 000 € pour la turbine (avec multiplicateur poulie-courroie et génératrice asynchrone).

Le turbinier allemand Watec Hydro a déjà commercialisé en Europe une cinquantaine de petites Kaplan de 500, 560 et 630 mm de diamètre (35 à 50 kW), sur un total de 349 machines allant jusqu'à 400 kW avec un entraînement en poulie-courroie. "La plus petite que nous proposons mesure 450 mm de diamètre pour 25-30 kW de puissance", détaille Jean-Michel Birling, responsable commercial France pour Watec Hydro.



Le constructeur de turbines Kaplan inclinées simple réglage Fugu-Tech propose désormais des machines de 10 à 50 kW. Photo : Fugu-Tech

Le constructeur tchèque Mavel propose quant à lui une gamme de petites turbines Kaplan verticales de 5 à 160 kW pour des chutes de 1,50 m à 6 m (pales réglables manuellement). 65 machines ont déjà été installées en Europe et aux États-Unis.

De son côté, le fabricant breton Turbiwatt propose des machines à directrices et pales fixes de 2 à 130 kW pour des hauteurs de chute de 1,20 à 7 m.

Gammes de machines inclinées

Ce fameux poste du génie civil étant déterminant pour la rentabilité des "petits projets", de nombreux producteurs recherchent des machines inclinées, requérant moins d'excavation et de béton que des machines verticales. Depuis 2 ans, le turbinier dijonnais Fugu-Tech propose ainsi une petite Kaplan inclinée simple réglage



mtbe

MERYTHERM BUREAU D'ÉTUDE

Conception & Installation de
Centrale Hydroélectrique

www.mtbe.be



Expertise
Dossier d'autorisation
Continuité écologique
Suivi d'exécution
Un seul interlocuteur
pour vos projets
hydroélectriques

Contact > MTBE SA
Rue Guillaume d'Orange
4100 Seraing, Belgique

Tél : +32(0)4 325 08 00
sverraes@mtbe.be
www.mtbe.be



Avec ses frères et son cousin maçon, René Cachard a réalisé le génie civil pour installer, dans sa véranda, une turbine Kaplan double réglage de 34 kW. Photo : Watec Hydro

(pales mobiles) avec 4 diamètres prédéfinis pour des puissances de 10 à 50 kW (lire en page 42). Par ailleurs, ER3i, constructeur de turbines Kaplan simple réglage de 100 à 400 kW (Meurthe-et-Moselle) va compléter sa gamme avec des machines de 10 à 100 kW pour des hauteurs de chute de 2 à 10 m (premières livraisons en 2026). "Il s'agira d'une turbine à pales fixes, à axe

incliné ou vertical (pour les chutes plus élevées), avec une structure autoporteuse permettant de réduire les coûts de génie civil", décrit Pascal Vautrin, co-gérant de l'entreprise. La double régulation sera assurée par des directrices mobiles et un variateur de vitesse. La roue sera en inox et le palier immergé sera lisse, donc sans roulements pour plus de fiabilité. —



Une mini-Kaplan pour mini-chutes

Les hauteurs de chute de 0,5 à 1,50 m associées à de faibles débits ont toujours fait partie du domaine réservé des roues à aubes. Pourtant, une petite turbine sera bientôt disponible pour équiper ces très basses chutes sur une gamme de débits variant de 0,7 à 1 m³/s. Xylem, fournisseur de renommée mondiale de solutions pour l'eau, teste actuellement une petite turbine de moins de 10 kW, avec une génératrice immergée. Le spécialiste des pompes, commercialisées sous la marque

Flygt, a adapté un de ses produits pour proposer cette turbine compacte et robuste, qui devrait être disponible en quelques semaines dès 2025. Xylem dispose déjà d'une autre gamme de turbines Kaplan simple réglage, à axe vertical, avec la génératrice immergée mais utilisant une technologie différente. 350 sites dans le monde, de 40 à 700 kW, en ont été équipés. La machine du plus petit diamètre (800 mm) peut délivrer une puissance de 40 à 170 kW selon les configurations.



Maintenance / Reconstruction

Expérience pratique et savoir-faire toutes marques

- Expertise technique
- Réparation et révision de machines électriques
- Moyens de levage importants 50 et 100 tonnes
- Moyens d'essais en charge ultra performants
- Exécutions personnalisées pour applications spécifiques
- Reconstruction à l'identique
- Rapidité et disponibilité
- Assurance qualité



Visitez notre site web www.helmke.fr

Mini Kaplan standardisée, coût optimisé

Le développeur Provence Hydro Énergie a installé une des premières petites Kaplan standardisées du turbinier bourguignon Fugu-Tech, au moulin de Cheval-Blanc (Vaucluse). Il a ainsi limité à 159 000 € le coût de la rénovation de ce site de 36 kW. Texte et photos : Juliette Fihman-Talpin

Rénover un moulin avec un temps de retour sur investissement de moins de 10 ans, c'est possible. La jeune société Provence Hydro Énergie (PHÉ), basée à Saint-Andiol dans les Bouches-du-Rhône, spécialisée dans le développement de projets de petite hydroélectricité sur les réseaux d'eau artificiels, vient d'y parvenir pour son premier projet, mis en service en avril 2024, au moulin de Cheval-Blanc (Vaucluse), implanté sur le canal d'irrigation de Saint-Julien. Hors frais de développement réalisés en interne, les 159 000 € HT investis pour réhabiliter cette installation de 36 kW (1,62 m³/s et 2,80 m de hauteur de chute nominale), produisant 171 000 kWh/an commercialisés en H16, devraient conduire à un temps de retour de 8,5 ans.

Pour obtenir ce bon niveau de rentabilité, "nous avons réalisé en interne l'étude de faisabilité, la grille, le dégrilleur, le cône entre le canal d'amenée et la turbine,



L'installation de la turbine au moulin de Cheval-Blanc (Vaucluse) n'a demandé qu'une semaine de travail. De gauche à droite : Olivier Souchon (responsable exploitation et informatique, PHÉ), Paul de Margon (directeur général, Fugu-Tech) et Vincent Alcaniz (fondateur de PHÉ).



ainsi que le génie civil, en étroite collaboration avec Fugu-Tech", indique Vincent Alcaniz, fondateur de PHÉ, filiale du développeur de centrales photovoltaïques Provence Éco Énergie. Pour remplacer les deux anciennes turbines Francis en chambre d'eau, PHÉ a choisi une Kaplan fabriquée par le jeune turbinier dijonnais Fugu-Tech, en raison de son tarif mais aussi de "cette démarche collaborative nous permettant de bien nous répartir les rôles et donc d'optimiser le coût du projet", précise le dirigeant.

Une base commune et 4 diamètres

Entièrement mécanosoudée, la gamme de Kaplan inclinées simple réglage Fugu-Mini permet d'équiper des sites de 10 à 50 kW pour des débits de quelques centaines de l/s à 2 m³/s et des hauteurs de chute de 1 à 6 m. Elle comprend 4 diamètres prédéfinis (de 400 à 700 mm). "La gamme est standardisée autour d'une base commune (structure, paliers, carter). Seul le diamètre de la roue, le manteau de roue et l'aspirateur vont varier en fonction des caractéristiques du site ; mais nous pouvons modifier chaque élément pour s'adapter à des contraintes spécifiques", décrit Paul de Margon, cofondateur et directeur général de Fugu-Tech. La conception est faite par le bureau d'études du turbinier. Les pièces sont fabriquées par des entreprises implantées en Bourgogne-Franche-Comté, puis contrôlées et assemblées par l'équipe de Fugu-Tech. La turbine est livrée en prête à l'emploi, déjà couplée au multiplicateur poulie-courroie et à la génératrice ; son groupe oléo-hydraulique, ainsi que ses armoires de puissance et de commande sont déjà fixés sur le carter. Par exemple, au moulin de Cheval-Blanc, la mise en service n'a demandé qu'une semaine. Autre particularité, la turbine est conçue pour minimiser le génie civil puisqu'un radier renforcé suffit à la recevoir (poids total d'environ 2 t). "L'aspirateur est mécanosoudé



À droite, le cône d'amenée a été réalisé par PHÉ selon les plans de Fugu-Tech. La turbine a été livrée avec le multiplicateur et la génératrice déjà montés, ainsi qu'avec le groupe oléo-hydraulique et les armoires de commande et de puissance, fixés sur le carter.

pour mettre en service la turbine dès que les connexions électriques sont réalisées, sans faire réintervenir un maçon en second œuvre", souligne Paul de Margon. Côté performances, la machine dispose d'un débit d'armement à 35 % du débit nominal et d'un rendement de 80-85 % en injection sur le réseau (85-90 % turbine seule), ce que confirme PHÉ au moulin de Cheval-Blanc.

Le prix d'une machine en DN 400, avec les auxiliaires, sans option, est de 30 000 € HT (en sortie d'atelier). La maintenance peut être effectuée par l'exploitant lui-même ou des artisans locaux, grâce à l'utilisation de pièces du commerce. En somme, une standardisation poussée à son maximum pour rendre faisable les projets de basse chute de petites puissances. —

Pour prolonger la lecture de cet article, visionnez la vidéo associée sur la chaîne Youtube du magazine : youtube.com/@puissancehydro/videos



Une Kaplan prête à l'emploi
au moulin de Cheval-Blanc (Vaucluse)



Ces turbines qui ont du flow

Une faible emprise, une valorisation des faibles débits, une maintenance limitée : c'est la règle de trois qui vaut toujours du succès à ces machines à flux traversant, "crossflow" en anglais, adaptées aux cours d'eau les plus capricieux, voire "furieux". Par Franck Turlan

Mitchell, Banki, Ossberger. Trois inventeurs du début du XX^e siècle qui renvoient au même type de turbine : une machine à flux traversant, "crossflow", en anglais (lire *Puissance Hydro #18*). De l'Australien, du Hongrois et de l'Allemand, l'histoire retiendra que c'est ce dernier qui aura contribué à son développement commercial, son nom étant toujours celui de la marque bavaroise. Ossberger reste le premier fabricant mondial de crossflow, avec notamment plus de 300 installations à l'échelle de la France. Sa production est aujourd'hui orientée vers des machines de 50 kW à 1 MW. Dans l'hexagone, le fabricant belge JLA Hydro dispose de 45 références (jusqu'à 400 kW), dont 35 pour des machines de moins de 65 kW (lire un exemple dans *Puissance Hydro #38*) et propose désormais des turbines de moins de 20 kW, livrées en kit (lire encadré). Le constructeur italien Irem a quant à lui équipé une dizaine de sites français. Son compatriote E++ est également présent sur le marché

français. Par ailleurs, des "artisans" comme la sarl Shem proposent de petites crossflow sur-mesure (lire en page 46).

Peu de pièces en rotation

En un siècle, chaque marque a apporté des améliorations, sur les profils de directrices, pour optimiser les flux, ou sur des accessoires, comme les capteurs. Mais les éléments fondamentaux et le design de ces crossflow restent les mêmes : un minimum de pièces (souvent 20 à 25), dont très peu en rotation, une roue à aubes non immergée et un distributeur divisé en deux compartiments, équipés chacun d'une vanne directrice.

Le plus souvent, le volume d'eau est ainsi réparti : 1/3 dans le premier compartiment, 2/3 dans le second. Un principe qui permet d'avoir une production significative à très faible débit, et d'obtenir des rendements moyens

de l'ordre de 83 % au-delà de 20 % d'ouverture de la turbine, certes inférieurs à une Francis par exemple, mais sur de plus larges plages de débit. C'est une des raisons pour lesquelles Christophe Guy, représentant commercial d'Ossberger en France, a emporté la décision d'un agriculteur qui voulait installer une turbine de 50 kW, dans le Jura. Le cours d'eau est ici un torrent au débit extrêmement variable : la Furieuse peut afficher 4 m³/s en crue... et 20 l/s en période d'étiage sévère.

Peu d'entretien

Pour ce niveau de puissance, il faut compter entre 50 000 et 100 000 € ; le prix étant directement corrélé à la quantité de métal que renferme la turbine. Un coût important, que l'agriculteur a pu ici supporter en installant lui-même la machine, avec l'appui d'un maître d'œuvre en hydroélectricité. "À moins de 100 kW, si le maître d'ouvrage ne met pas la main à la pâte, le projet sera rarement rentable", prévient Christophe Guy.

Les crossflow sont aussi plébiscitées pour le peu d'entretien qu'elles nécessitent. Dans le cas de l'agriculteur jurassien, c'était même un impératif, étant donné ses heures de travail déjà importantes pour faire tourner la ferme. Les crossflow sont plus particulièrement adaptées à des hauteurs de chute variant de 3 à 200 m mais, au-delà de 150 m, le type Pelton offre souvent un meilleur résultat technico-économique. Pour Ossberger, le cœur de marché se situe entre 6 et 150 m de hauteur de chute, une plage où la turbine Francis est souvent privilégiée lorsque le débit est relativement régulier... Un cours d'eau au débit capricieux, voire "furieux", pourra amener le maître d'ouvrage à préférer la crossflow, pour sa flexibilité, sa rusticité et sa facilité d'entretien. —

Une crossflow en kit à moins de 13 000 €

Après en avoir retravaillé la conception et rendu l'assemblage plus simple, JLA Hydro relance une petite crossflow en kit, déjà commercialisée sur le marché africain il y a une dizaine d'années. "Notre intention est de rendre possible la réalisation de certains projets modestes pour lesquels l'investissement dans une turbine "standard" ne pourrait pas être envisagé", explique Richard Beckers, directeur associé de l'entreprise. Le turbinier belge fournit le rotor, le rond carré et le châssis, déjà montés, ainsi qu'un ensemble de pièces prédécoupées pour assembler la turbine. Le multiplicateur, la génératrice et le contrôle-commande ne sont pas compris dans le kit mais peuvent être fournis indépendamment. Même si un manuel de type Ikea guide le producteur, le travail exige tout de même de disposer de compétences en mécanique, en soudure et en maçonnerie pour adapter le génie civil. D'une puissance de 2 à 20 kW, la machine se décline en 3 largeurs avec un rotor de 30 cm de diamètre, pour un tarif de 12 900 € HT. Elle est disponible dans un délai de 2 à 3 mois.



La JLA Kit existe en 3 largeurs avec un rotor de 30 cm de diamètre pour délivrer une puissance de 2 à 20 kW.
Photo : JLA Hydro

Banki : du sur-mesure venu d'Auvergne

Il y a près de 20 ans, à l'occasion de la rénovation d'une de ses centrales, un petit exploitant de Haute-Loire s'est fait constructeur de turbines. Sa production est depuis orientée vers le type Banki-Mitchell : rencontre avec la famille qui a fondé la sarl Shem. Par Franck Turlan

Dans la famille Dubois, voici André, le père : il a exercé le métier de meunier dans le moulin familial de Paulhaguet, en Haute-Loire. Avec le grand-père, Amable, il a créé il y a 52 ans la Société Hydro-Électrique des Moulins, la sarl Shem, pour se diversifier dans la production d'électricité (en 1981, au départ en retraite d'Amable, son deuxième fils, Claude, devient co-gérant). Et voici Jérôme, le fils : il est enseignant-chercheur en mathématiques. C'est lui qui a pris le second virage, il y a 17 ans : passer de "simple" exploitant de centrales (assurant toutefois aussi la maintenance des petites installations du secteur) à concepteur et fabricant de turbines, de grilles hydrodynamiques ichtyocompatibles et d'automatismes dédiés à la petite hydroélectricité. Une nouvelle orientation "au fil de l'eau", décidée au moment où l'entreprise familiale bute sur la faisabilité



André et Jérôme Dubois devant leur dernière réalisation : une turbine Banki de 116 kW, commandée par une collectivité.
Photo : Franck Turlan

technico-économique de rénover la centrale du moulin de Barreyre, à Vieille-Brioude. Les options de turbine Kaplan proposées à la famille Dubois impliquaient de casser une chambre d'eau exigüe, engendrant un coût de génie civil important et surtout un risque pour la stabilité du moulin. Alors pourquoi ne pas développer sa propre turbine sur-mesure pour ce site sur la rivière Allier, en se limitant à une roue d'1 m de diamètre ? Pour Jérôme le mathématicien, c'est l'occasion "de passer de la théorie à la pratique". Pour la conception des profils des aubes, il fait ainsi appel aux "transformations conformes", une théorie physico-mathématique très contemporaine¹, qu'il "concrétise" via ses outils de conception 3D assistée par ordinateur.

Centrale clé en main

Dès cette première turbine, Jérôme Dubois pose la méthode de travail et les principaux choix techniques que l'entreprise observe encore aujourd'hui. Son offre de petite centrale "clé en main" intègre un travail d'ingénierie et de bureau d'études pour concevoir une turbine spécifique à chaque site. L'entreprise ne disposant pas d'une gamme standard préétablie, c'est à partir de l'étude du site que vont en découler le type de turbine, le diamètre de roue ("1,20 m au maximum, au-delà nous n'avons pas le matériel pour l'usinage et l'assemblage") et les profils de pales. À Vieille-Brioude, les calculs orienteront leur choix vers une Kaplan. Mais c'est à ce jour la seule de l'entreprise auvergnate, les caractéristiques des sites étudiés l'amenant par la suite vers des Banki à double ou simple compartiments.



Une roue à aubages profilés avant traitement dont les pièces sont assemblées dans l'atelier de l'entreprise. Photo : sarl Shem

Autre choix technique fort : le recours à de l'acier inoxydable. "L'inox, ça ne bouge pas : il n'y a pas de formation de grattons de rouille qui altèrent la géométrie des pales et font baisser le rendement", justifie Jérôme Dubois. Les profils hydrauliques, établis en interne pour chaque installation, sont réalisés par une fonderie française, qui produit les pièces métalliques "brutes". Les sous-traitants locaux de l'entreprise auvergnate les usinent ensuite suivant ses plans. L'assemblage des pièces est enfin réalisé par les deux salariés de la sarl Shem, dans l'atelier accolé au moulin de Vieille-Brioude.

Pas de lubrification à l'huile

Autre particularité que l'on retrouve sur toutes les turbines : la lubrification des pièces immergées par

graisse ou huile est proscrite, "pour ne pas polluer", souligne-t-il ; l'usage du groupe à huile étant limité à la commande des vérins hydrauliques non immergés. Pour des pièces comme des paliers ou des directrices, le fabricant utilise donc des matériaux composites, à base de fibres et de résines, ayant un coefficient de frottement très bas.

Des choix techniques qui amènent un certain surcoût à ces machines, chaque fois uniques, vendues entre 50 000 et 150 000 € pièce pour un ensemble électromécanique comprenant la turbine, le système de multiplication et le générateur. Le prix de la durabilité, du point de vue de la famille Dubois. Un critère qui prévaut aussi dans le choix même du type Banki-Mitchell : "c'est vrai qu'il y a un moins bon rendement théorique qu'avec une Francis. Mais on s'y retrouve dans la durée", estime Jérôme. "C'est plus facile d'entretien, avec une roue autonettoyante, et simple à régler avec une ou deux vannes directrices seulement, contre 11 ou 13 pour une Francis. En fait, une Banki, c'est un peu la roue à aubes du XXI^e siècle". L'entreprise auvergnate enregistre un regain de commandes depuis 3 ans, pour un rythme annuel de production d'une à deux installations, qui vient s'ajouter à son activité de maintenance sur une quarantaine de centrales et de fabrication de grilles et de dégrilleurs. "Nous sommes et voulons rester des artisans". Des gens discrets qui plus est, qui aime passionnément leur "terrain de jeu" : le Massif central.

¹ Jérôme Dubois a été l'assistant d'un des auteurs de cette théorie. Elle permet d'obtenir des profils dont la géométrie répond parfaitement aux contraintes hydrodynamiques.



Pelton : un bon ratio rendement/prix

Pour obtenir des projets viables en moyennes et hautes chutes de petites puissances, les constructeurs proposent des machines simples et fiables sans rechercher l'ultraperformance.

Par Juliette Fihman-Talpin

Lorsqu'on évoque les centrales hydroélectriques de petites puissances, on pense souvent aux moulins de basses chutes. Pourtant, il existe de très nombreuses installations sur des torrents de moyennes et hautes chutes qui alimentent notamment des refuges ou des alpages. Lorsqu'il était éleveur et producteur de Beaufort, Claude Glise, associé à son épouse Caroline, a équipé en 1997 son alpage de Pralognan-la-Vanoise (Savoie), non raccordé au réseau car situé à 2 000 m d'altitude, avec une turbine Pelton Irem de 6 kW (5 l/s, 250 m de chute)¹. Au printemps dernier, non loin du magasin de vente de l'exploitation, à Villard-du-Planay sur le torrent des Airollées, sa seconde centrale est entrée en service (150 m de chute, 56 l/s, 60 kW de puissance injectée maximale). "Avec un salarié et mon neveu qui est maçon, nous avons réalisé le béton de la prise d'eau qui est équipée d'une grille Coanda, et aussi celui de

¹ L'entreprise est aujourd'hui gérée par ses enfants.

la centrale où a été installé un groupe Pelton Irem clé-en-main", indique le producteur. Le producteur et son salarié ont par ailleurs soudé eux-mêmes les tuyaux en polyéthylène haute densité DN 250 de la conduite forcée, après qu'un terrassier a creusé la tranchée à la pelle araignée (500 m). L'ensemble représente un investissement de 300 000 €. Le site produit toute l'année, une moyenne de 37 000 kWh/mois soit environ 5 000 € mensuels de chiffre d'affaires. "Je peux vous dire que cela améliore bien ma retraite !", observe l'ancien agriculteur.

Machines semi-standardisées

Omniprésent sur ce marché des petites turbines de hautes chutes, le fabricant turinois Irem a équipé avec ses Pelton près de 250 sites français autonomes ou



La centrale de Claude Glise à Villard-du-Planay (60 kW, Savoie), lors de son inauguration en avril 2024. La machine fait partie des 250 turbines Pelton installées par le turbinier italien Irem en France. Photo : Christophe Convert

raccordés au réseau, et près de 1 600 dans le monde, notamment pour des refuges ainsi que des captages d'eau potable, d'irrigation etc. Les hauteurs de chute varient de 30 à 650 m et les débits de 0,5 à 360 l/s (0,5 à 750 kW). Les machines, à axe vertical, sont semi-standardisées : le constructeur propose plusieurs tailles d'augets, de roues et de distributeurs assemblés sur mesure selon les caractéristiques du site, permettant de gagner sur le coût de production. *"Depuis 1954, nous fabriquons des machines avec un très bon compromis entre la qualité et le prix, pour donner la meilleure solution sur ces puissances"*, explique Fabrizio Rocci, directeur commercial d'Irem. Première particularité, le distributeur est constitué le plus souvent par une bêche en pression sur laquelle sont disposés 6 injecteurs

"tout ou rien" facilitant le passage des feuilles ou des sédiments (dans certains cas, un des 6 injecteurs dispose d'un pointeau). Seconde originalité, la commande des injecteurs est électrique et non oléo-hydraulique pour minimiser le coût de l'investissement et de la maintenance. Le prix des machines varie de 600 à 2 000 €/kW en fonction des conditions hydrauliques. D'autres fournisseurs proposent aussi des Pelton de petites puissances comme l'italien E++ (Cueno, Piémont) qui a, par exemple, installé une machine clé-en-main de 62 kW, à axe horizontal avec un injecteur à pointeau, dans le fort de Vinadio (Piémont) sur 201 m de chute et un débit d'équipement de 40 l/s. *"Nous concevons en interne chaque turbine, nous en faisons fabriquer les composants par un sous-traitant local puis nous l'assemblons dans notre atelier pour la livrer clé-en-main"*, décrit Marco Parola, directeur des ventes de l'entreprise.

Par ailleurs, le turbinier belge JLA Hydro, spécialiste des turbines crossflow, lance une gamme de Pelton de 5 à 175 kW, pour 60 à 200 m de hauteur de chute, et 5 à 250 l/s de débit. *"La moitié de notre activité se situe en Afrique où certaines régions, très montagneuses, doivent être équipées en Pelton. Comme pour nos Banki, nous gardons le même principe d'une gamme standardisée, rustique et fiable, avec 3 tailles de bâtis sur lesquels nous pouvons adapter 3 diamètres de roues"*, précise Richard Beckers, directeur associé de JLA Hydro, précisant que la régulation est assurée par 3 à 6 injecteurs en "tout ou rien". Là aussi la machine est livrée "prête à l'emploi", avec la génératrice, l'armoire électrique et le contrôle-commande.

Enfin, le constructeur suisse Ensy AG (Sufers, canton des Grisons) a déjà équipé une vingtaine de réseaux publics d'adduction d'eau potable avec des Pelton de 3 à 20 kW, en acier chromé, conçues avec le bureau d'ingénierie suisse Mhylab. —