

CENTRALE HYDROÉLECTRIQUE : PETITE ET FLEXIBLE

Produire de l'électricité lorsqu'elle génère le plus de revenu ou peut être utilisée pour stabiliser le réseau électrique - telle a toujours été l'idée commerciale à la base des centrales hydroélectriques à accumulation. Les petites centrales hydroélectriques dans les Alpes souhaitent maintenant imiter ce qui était auparavant l'apanage des grands acteurs. En fait, elles sont également capables de fournir, dans une certaine mesure, de l'énergie de pointe et des services système. C'est ce que démontre un projet de recherche soutenu par l'OFEN pour la petite centrale hydroélectrique de Gletsch-Oberwald. Le projet a étudié le potentiel économique d'une exploitation flexible, mais aussi des impacts sur l'écologie fluviale.



La caverne du désableur de la petite centrale hydroélectrique de Gletsch-Oberwald : le réservoir est utilisé comme réserve d'eau, ce qui permet une production d'électricité plus flexible à la centrale. Photo : FMV



Salle des machines de la petite centrale hydroélectrique à Oberwald : Les turbines d'une puissance de 2 x 7,5 MW sont conçues pour une production maximale en été. En comparaison, les cinq éoliennes mises en service sur le Saint-Gothard à l'automne 2020 ont une puissance nominale de 5 x 2,35 MW. Photo : FMV

Il y a plus de 1000 petites centrales hydroélectriques en Suisse, chacune d'une capacité brute annuelle moyenne inférieure à 10 MW. La capacité totale installée est de 760 MW, ce qui est impressionnant. Avec une production annuelle de 3 400 GWh/an, ils couvrent environ 5% de la consommation d'électricité suisse. Selon une estimation de l'OFEN datant de 2019, la production d'électricité à partir de petites centrales hydroélectriques peut être augmentée de 110 à 550 GWh par ans à long terme. Afin de réaliser ce potentiel, les nouvelles centrales électriques doivent répondre aux exigences de la protection du paysage et de l'écologie aquatique, et elles doivent - bien sûr - fonctionner de manière économique. Cette dernière est favorisée si elle peut produire de l'électricité à des moments où elle peut être vendue avec un bénéfice particulièrement important.

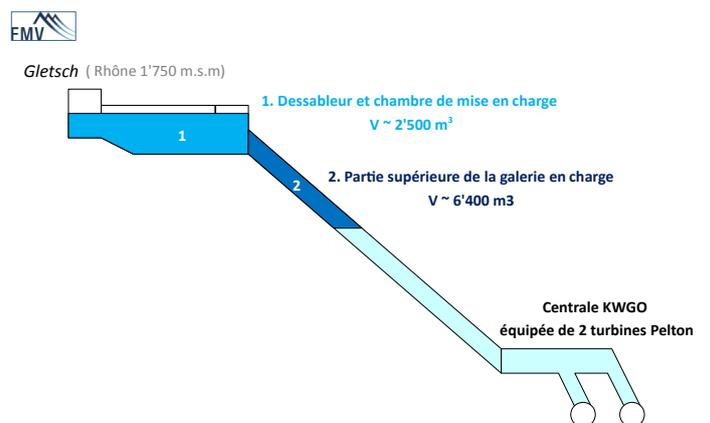
Une exploitation flexible a toujours été au cœur du modèle économique des grandes centrales de stockage. La situation est différente pour les petites centrales hydroélectriques sans réservoir de stockage : elles produisent généralement de l'énergie en continu, tout comme les centrales au fil de l'eau sur les rivières suisses. Cependant, même les petites centrales hydroélectriques ont parfois un potentiel de flexibilité qui peut être exploité de manière ciblée, comme une équipe de chercheurs l'a maintenant démontré en prenant l'exemple de la centrale de Gletsch-Oberwald : La centrale a été construite avec des mesures de compensation appropriées (revitalisation du Rhône) et produit environ 41 GWh d'électricité par an de-

puis sa mise en service à la mi-2018. Avec deux turbines Pelton d'une puissance nominale de 7,5 MW chacune, la centrale dépasse le seuil de 10 MW. Néanmoins, elle est comptée dans la catégorie des petites centrales hydroélectriques car la puissance moyenne est de 4,7 MW en raison des grandes fluctuations saisonnières.

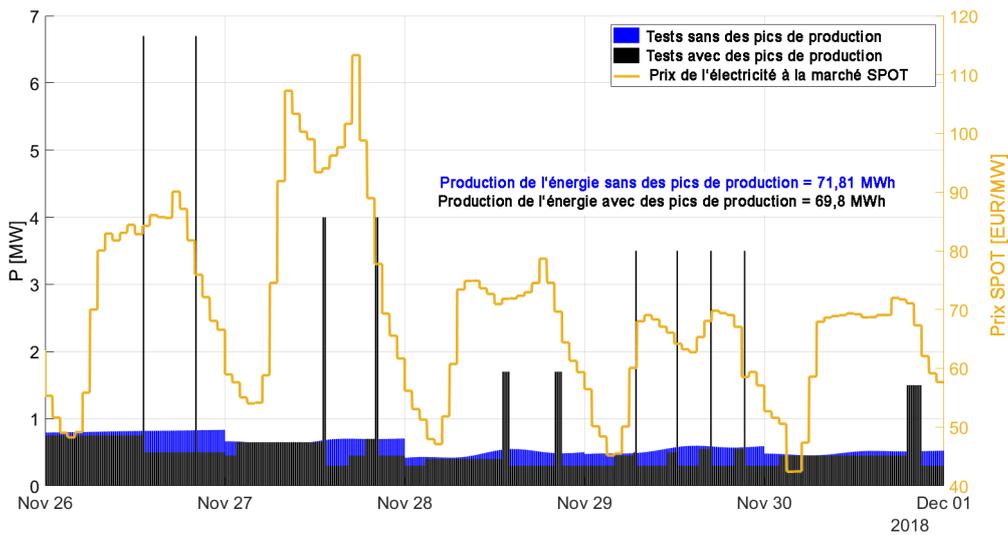
Deux volumes de stockage

La centrale de Gletsch-Oberwald utilise principalement l'eau du glacier du Rhône pour produire de l'électricité. Comme il n'y a pas de réservoir, la production dépend directement des apports naturels. Pendant les mois d'été, 5'000 à 15'000 l/s d'eau utilisable sont disponibles, pendant les mois d'hiver, nettement moins de 500 l/s. Afin de faire face aux fortes fluctuations du débit volumétrique, les six injecteurs de chaque turbine Pelton peuvent être ouverts individuellement. De cette manière, le débit de la centrale peut être régulé dans une plage comprise entre 145 l/s et 5'800 l/s.

Cependant, il serait faux de croire que la centrale électrique ne pourra jamais convertir en électricité qu'une quantité d'eau égale à celle qui circule actuellement. La centrale dispose de deux volumes qui peuvent être utilisés pour le stockage : d'une part, le dessableur (incl. la chambre de mise en charge), qui sert à réduire la proportion de particules fines, et d'autre part, la partie supérieure de la galerie en charge de la chambre de mise en charge à Gletsch à la centrale d'Oberwald (différence d'altitude de 288 m). Grâce à ces volumes de stockage, la petite centrale hydroélectrique peut être exploitée de manière flexible, c'est-à-dire à des moments où l'énergie de pointe hautement rémunérée peut être vendue sur le marché de l'électricité. Il est également envisageable



Cette illustration (non à l'échelle) montre les zones qui peuvent être utilisées comme stockage : le bassin du dessableur (incl. la chambre de mise en charge) et la partie supérieure de la galerie en charge. Graphique : SmallFLEX, édité C. Münch, HES SO Valais-Wallis



Lors de la première campagne de mesures en novembre 2018, onze pics de production entre 15 minutes et deux heures ont été réalisés. Ceux-ci ont été programmés de manière à ce que l'électricité soit produite soit pendant les périodes où les prix du marché sont élevés soit pendant les mesures dans la zone alluviale (courbe jaune). Pendant ces périodes, la centrale produisait une puissance qui était un multiple de la puissance normale. En bleu à titre de comparaison : la production de la centrale électrique sans les pics de production. Graphique : SmallFLEX/édité B. Vogel

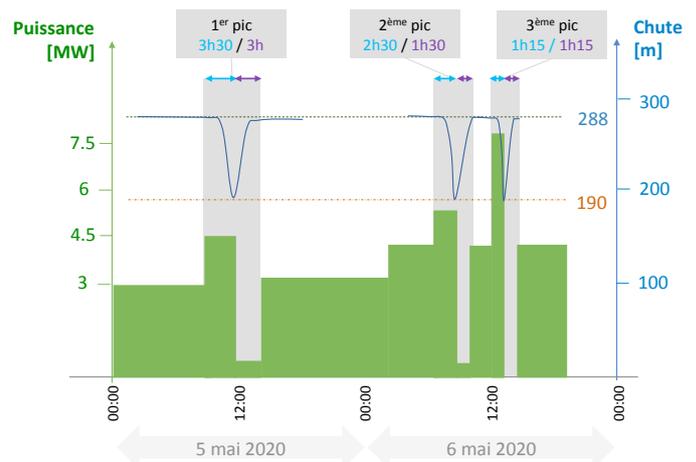
que le volume de stockage puisse être utilisé pour fournir du courant d'équilibrage à la société nationale de réseau Swissgrid. Cela est nécessaire pour maintenir l'équilibre entre l'offre et la demande dans le réseau électrique.

Énergie de pointe et pouvoir d'équilibrage

Une équipe interdisciplinaire de chercheurs dirigée par la Haute école spécialisée de Suisse occidentale (HES-SO) Valais-Wallis a maintenant étudié le potentiel d'une exploitation flexible dans le cadre d'un projet de recherche de l'OFEN (« SmallFLEX »). Les chercheurs ont mené deux campagnes de mesures en novembre 2018 et en mai 2020. En utilisant le volume de stockage disponible, évalué par le laboratoire de construction hydraulique de l'EPFL et l'équipe de la HES SO Valais-Wallis, des pics de production (hydropeaks en anglais) d'une durée allant de 15 minutes à 3,5 heures ont été réalisés. Lors de la première campagne de mesure, seul le volume de stockage de la caverne du dessableur et de la chambre de mise en charge (2'500 m³) a été utilisé ; lors de la deuxième campagne de mesure, le tiers supérieur de la galerie en charge (6'400 m³) a également été utilisé, ce qui donne un volume de stockage total de 8'900 m³.

Conclusion essentielle des tests : En principe, la centrale est capable de produire de l'énergie de pointe ou de puissance de réglage à Swissgrid. Pour ce faire, selon les calculs des FMV (Sion), propriétaires de la centrale hydroélectrique, un volume de stockage utilisable de 6'180 m³ est disponible (ce qui correspond à environ 4,0 MWh d'électricité). C'est moins que les 8 900 m³ théoriquement disponibles. La raison de cette restriction est que lorsque la galerie en charge est vidée

jusqu'à une hauteur de 210 m, des effets indésirables se produisent au niveau de la turbine (voir encadré p. 4). Les FMV utiliseront la galerie en charge en mode flexible jusqu'à une hauteur de chute maximale de 230 m, afin d'avoir une marge de sécurité, correspondant à un volume de stockage à 6'180 m³. Un deuxième résultat des essais : Si la galerie en charge n'est plus complètement remplie, le rendement des turbines diminue également car les deux turbines Pelton dans cette situation ne fonctionnent plus dans les conditions prévues (hauteur de chute de 288 m) selon les simulations numériques réalisées par la HES-SO Valais-Wallis et PowerVi-

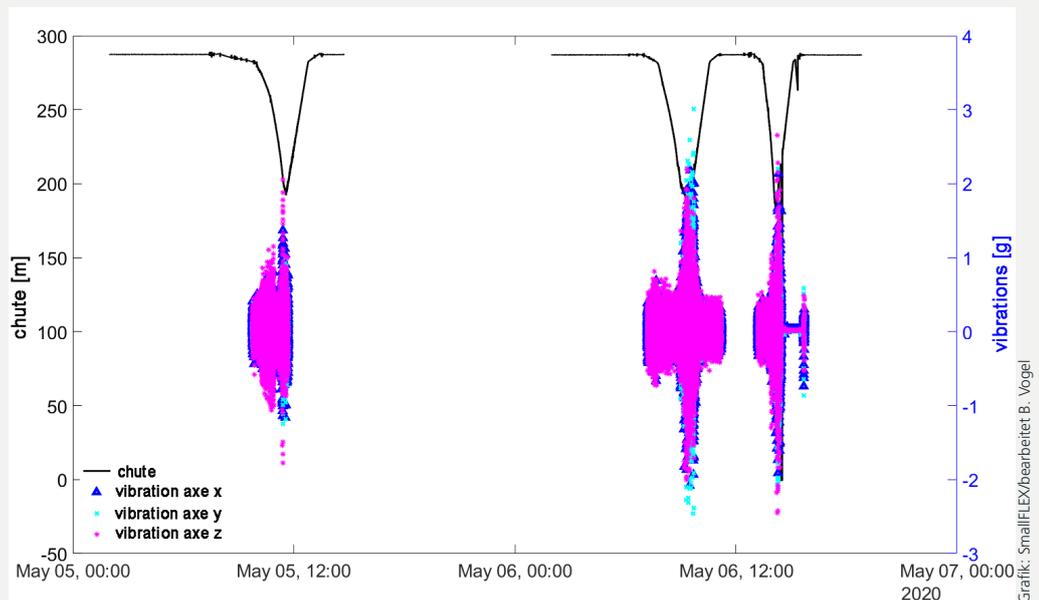


Lors de la seconde campagne d'essai, la totalité du volume de stockage identifié a pu être utilisée pour produire des pics de production. Durant deux jours, trois pics ont été réalisés pour tester différentes vitesses d'abaissement de niveau dans la galerie et de remplissage et évaluer la chute minimale acceptable pour utiliser les turbines en toute sécurité. Graphique : SmallFLEX, édité C. Münch, HES-SO Valais-Wallis

LIMITER LA FATIGUE DE LA TURBINE PELTON

L'équipe de la HES SO Valais-Wallis s'est en particulier concentrée sur l'influence de la diminution de la Chute sur la turbine : L'utilisation d'une partie de la galerie en charge comme réservoir a pour conséquence qu'elle n'est plus remplie d'eau jusqu'au sommet pendant certaines phases de fonctionnement. Cela se traduit par une réduction de l'énergie cinétique au niveau de la roue. En conséquence, les jets d'eau frappent avec une vitesse plus faibles les augets de la roue de la turbine et, dans le pire des cas, peuvent y

déclencher des vibrations. Les exploitants de centrales électriques veulent éviter les vibrations car elles réduisent le rendement de la turbine et accélèrent la fatigue des matériaux, ce qui entraîne des coûts pour les investissements de remplacement.



Les chercheurs de SmallFLEX voulaient maintenant savoir dans quelle mesure la galerie en charge peut être vidée sans provoquer de vibrations au niveau de la roue de la turbine. Ils ont vidé la galerie en charge lors d'essais de 287,5 mètres (à l'état complet) à une hauteur de chute de 185 mètres. Ces essais ont été monitorés avec, entre autres, le système de surveillance HydroClone® développé par PVE. Ils ont pu montrer que des effets indésirables se produisent lorsque la conduite forcée est vidée à une hauteur de chute inférieure à 210 mètres (cf. graphique). Les chercheurs de la Haute école spécialisée de Suisse occidentale et le laboratoire de machines hydrauliques de l'EPFL ont également effectué diverses simulations pour étudier comment une variation de la hauteur de chute (entre 287,5 et 185 m) affecte la qualité du jet et le couple transmis à la roue. BV

sion Engineering (PVE). Les FMV estiment la puissance maximale qui peut être générée dans le cadre d'une exploitation flexible à $2 \times 5 \text{ MW} = 10 \text{ MW}$.

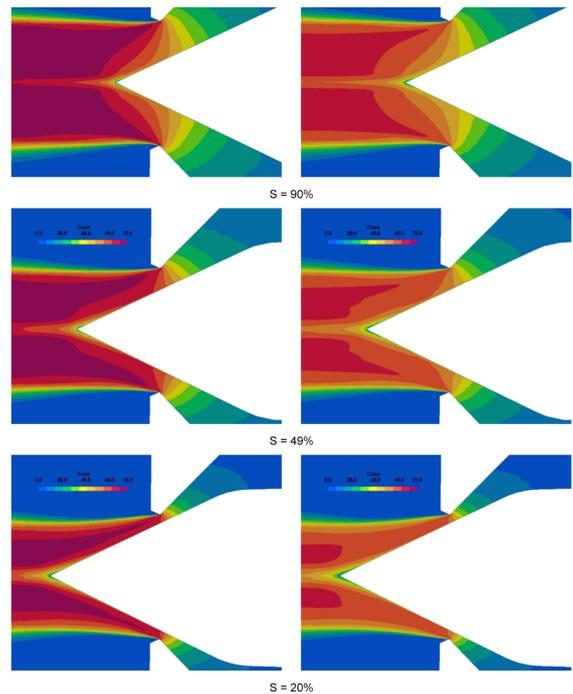
« Ce sont des ordres de grandeur qui permettent de proposer des services intéressants au marché suisse de l'électricité », déclare la coordinatrice du projet, la professeure Cécile Münch-Alligné, experte en hydroélectricité à la HES-SO Valais-Wallis. Selon les chercheurs du projet, les résultats sont transférables à 175 centrales suisses de 1 à 30 MW qui sont également équipées de turbines Pelton. « Une production flexible pourrait également être utilisée dans les régions qui disposent de nombreuses installations photovoltaïques pour compenser les baisses à court terme de la production d'énergie solaire », explique la chercheuse valaisanne.

Puissance de réglage oui, énergie de pointe non

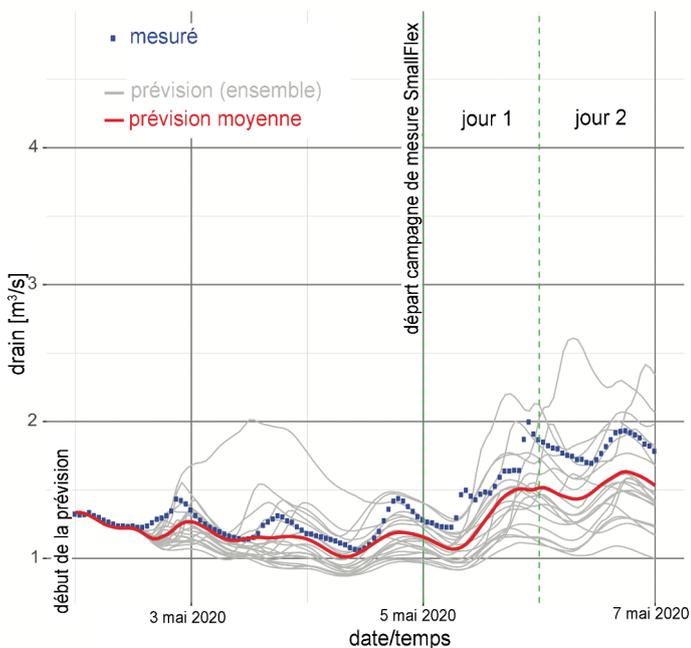
Dans le cadre du projet SmallFLEX, les FMV souhaitent savoir quelles utilisations du volume de stockage étaient financièrement et opérationnellement intéressantes. Les FMV se concentrent principalement sur la fourniture de la puissance de réglage. « Grâce à l'installation de stockage, nous pouvons fournir au réseau Suisse jusqu'à 1,5 MW de puissance de réglage pratiquement toute l'année », explique Steve Crettenand, qui a accompagné le projet pour les FMV. Les FMV apporteront la puissance de réglage de la centrale électrique à un pool auquel participent plusieurs fournisseurs de la puissance de réglage. La production d'énergie de pointe est moins intéressante pour la centrale électrique : ce type de production n'est pas possible pendant les mois d'hiver et ne vaut pas la peine pendant les mois d'été avec de grandes

quantités d'eau. La production d'énergie de pointe serait possible pendant les mois où les flux sont moyens (avril/mai et octobre/novembre), mais selon Steve Crettenand, cela n'aurait guère de sens, car le volume de stockage disponible est relativement faible avec environ 4,0 MWh. Un autre argument contre la production d'énergie de pointe est que l'efficacité des turbines Pelton diminue lorsque la galerie en charge n'est plus complètement remplie (voir ci-dessus). Ainsi, l'énergie de pointe atteint un bon prix, mais le volume de production diminue, ce qui réduit le résultat net.

D'autre part, il est intéressant d'utiliser le volume de stockage pendant la période hivernale (de janvier à mars). Pendant ces mois, lorsque l'eau est rare, la quantité d'eau qui peut être tirée de la rivière est souvent insuffisante pour faire fonctionner la centrale électrique. Dans ces moments-là, l'eau du réservoir permet d'atteindre le volume d'eau minimum nécessaire pour turbiner (145 l/s). « Grâce au réservoir, la centrale peut produire de l'électricité en continu sur de plus longues périodes ; il y a moins d'interruptions de la production avec l'arrêt et le redémarrage des turbines. Cela nous permet d'augmenter la production pendant les trois mois d'hiver, de 200 à plus de 500 MWh », déclare Steve Crettenand, qui ajoute : « Cela est conforme à la stratégie énergétique



Simulation numérique du jet (sens du flux de droite à gauche) en sortie d'injecteur de la turbine Pelton pour différente ouverture du pointeau avec une Chute : à gauche de 287 m, à droite de 215 m. L'influence de la Chute sur la qualité du jet est minime, seule la vitesse diminue. Graphique : J. Decaix, HES-SO Valais-Wallis



Prévision du 2 mai 2020 pour le volume d'eau du Rhône lors de la campagne de mesure SmallFLEX (mesuré en m³/s). Les lignes grises sont des prévisions individuelles de rejets avec différentes hypothèses, la ligne rouge indique la prévision moyenne sur cinq jours, la ligne bleue les valeurs réelles. Graphique : Konrad Bogner, WSL

2050 ». La FMV estime à environ 30'000 Euros par an le gain financier dû à la souplesse de fonctionnement.

Prévisions d'afflux pour un fonctionnement flexible

Le fonctionnement flexible d'une centrale électrique exige qu'une quantité suffisante d'eau soit disponible pour les pics de production. La centrale électrique de Gletsch-Oberwald tire son eau du Rhône. Une équipe de l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL) a développé un système de prévision de l'approvisionnement en eau de la rivière dans le cadre du projet SmallFLEX, en collaboration avec MétéoSuisse.

Les résultats sont là : Le système permet des prévisions jusqu'à douze heures avec précision. Pour une période de prévision de trois jours, l'erreur n'est que de +/- 1000 l/s. « Nous pouvons prévoir la période de remplissage du stockage disponible au-delà de trois jours avec une précision d'environ dix minutes, ce qui est un ordre de grandeur acceptable », déclare le Dr Manfred Stähli, chercheur au WSL. Grâce à la précision des prévisions, il est possible de planifier un fonctionne-



Le Rhône avec coulé (à gauche) et houle (à droite) : la houle lors d'un pic de production fait monter le Rhône en dessous de la centrale électrique - et emporte une partie des larves d'insectes vivant dans le fleuve. Photo : Claire Aksamit, Eawag

ment flexible de la centrale électrique pendant cinq à six jours, explique le scientifique.

Effets sur l'écosystème

Les éclusées générées par le fonctionnement flexible ont un impact sur l'écosystème du Rhône. Les larves d'insectes (macro-invertébrés), qui vivent au fond du lit des rivières et servent de source de nourriture par exemple aux poissons et aux araignées, constituent une partie importante et diversifiée de l'écosystème. Dans le cadre du projet de l'OFEN, une équipe de l'Institut Fédéral Suisse des Sciences et Technologies de l'Eau (Eawag) a étudié dans quelle mesure ces invertébrés sont emportés par ces éclusées. A cette fin, la centrale a généré des éclusées expérimentales d'une durée de 15 minutes avec des temps de récupération de plus en plus courts (de huit jours à un seul jour) sur une période de deux semaines.

« Le nombre de macro-invertébrés emportés par le flux est considérablement augmenté pendant les éclusées, mais d'après nos observations, la communauté d'espèces est revenue à son niveau de base le lendemain des éclusées, probablement grâce à l'état quasi naturel des eaux d'amont », explique le Dr Martin Schmid, chercheur à l'Eawag, en résumant une des principales conclusions de l'étude. Cependant, les scientifiques ont constaté que l'abondance de certaines espèces a diminué au cours de l'expérience. Des inondations fréquentes pendant l'exploitation régulière et flexible de la centrale pourraient donc causer des dommages à long terme à l'écosystème. Les experts de l'Eawag conseillent donc, en cas d'introduction d'un fonctionnement flexible, de surveiller l'évolution de l'écosystème sur plusieurs années.



Les chercheurs de l'Eawag utilisent ces filets pour enregistrer le nombre de larves d'insectes emportées. Photo : Claire Aksamit, Eawag

- Le rapport final sur le projet « Démonstrateur de petite centrale hydroélectrique flexible » (en anglais: Demonstrator for flexible Small Hydropower Plant/SmallFLEX) est disponible à l'adresse suivante: <https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=40717>
- Des informations sur le projet peuvent être obtenues auprès de Dr.-Ing. Klaus Jorde (klaus.jorde@atlkjconsult.net), responsable du programme de recherche sur l'hydroélectricité de l'OFEN.
- D'autres articles techniques sur les projets de recherche, les projets pilotes, les projets de démonstration et les projets phares dans le domaine de l'hydroélectricité peuvent être consultés ici : www.bfe.admin.ch/ec-hydro.