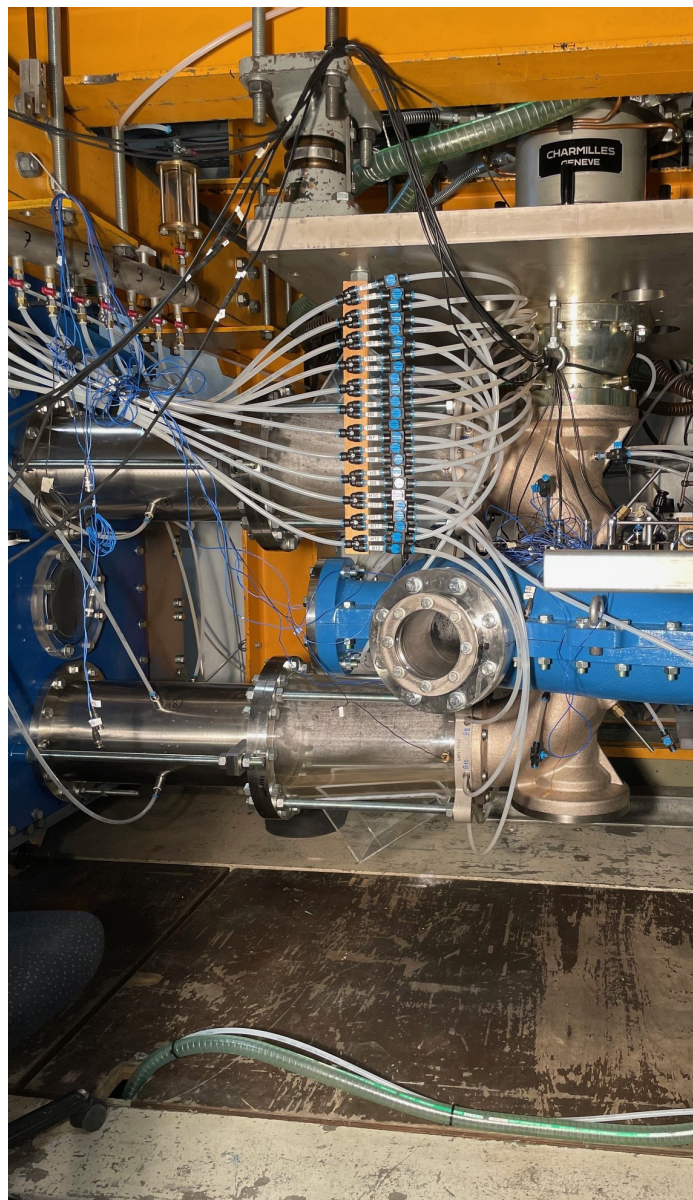


DE L'ÉNERGIE HYDRAULIQUE À L'ÉNERGIE HYDRAULIQUE PLUS

Le développement de l'énergie solaire et éolienne entraîne une production d'électricité qui varie en fonction de l'ensoleillement et des conditions de vent. Afin de réduire cette incertitude, les ressources renouvelables peuvent être associées à l'énergie hydraulique et à des batteries pour former des systèmes énergétiques hybrides. Ceux-ci présentent un fort potentiel en termes de stabilité du réseau et de réduction de l'usure, et favorisent la participation des petites et moyennes centrales hydroélectriques au marché de l'électricité, comme le montrent des projets de recherche actuels.

Un hybride est un mélange. En technologie, un hybride combine deux technologies. Dans le seul domaine de l'énergie, les exemples sont nombreux : les véhicules hybrides combinent des moteurs à combustion et des moteurs électriques ; les systèmes de chauffage hybrides utilisent différentes sources d'énergie ; les modules hybrides produisent de l'électricité et de la chaleur à partir du rayonnement solaire. Les installations de commutation hybrides relient les lignes aériennes et les câbles souterrains dans la technologie haute tension.



À l'EPFL, cette installation de laboratoire a permis d'étudier les avantages que présenterait l'installation d'une batterie dans la centrale hydroélectrique au fil de l'eau d'Ernen, dans le Haut-Valais. Photo : EPFL



Une autre forme d'hybridation : depuis août 2022, une installation solaire située sur le barrage du lac de Mutt, dans les Alpes glaronaises, fournit quelque 3 millions de kWh par an. Le rendement est relativement élevé pendant les mois d'hiver. Photo : Axpo

Lorsque l'on parle d'hybridation de l'énergie hydraulique, il s'agit de la combinaison de l'énergie hydraulique avec d'autres technologies énergétiques. En particulier, la combinaison avec le photovoltaïque (PV), les centrales éoliennes et les batteries de stockage crée une « énergie hydraulique plus », explique Klaus Jorde, qui dirige le programme de recherche sur l'énergie hydraulique à l'OFEN : « L'époque où l'énergie hydraulique était uniquement appréciée pour sa puissance, son énergie et sa flexibilité est révolue. Aujourd'hui, l'énergie hydraulique est également le catalyseur qui rend possible l'intégration d'une part toujours croissante d'énergie éolienne et solaire. Afin d'exploiter pleinement son potentiel, elle devra à l'avenir être combinée à d'autres technologies pour former des systèmes énergétiques hybrides performants. »

Deux sources, un seul système de contrôle

L'énergie hydraulique et l'énergie solaire peuvent être facilement combinées, par exemple en équipant les barrages de panneaux solaires. Citons comme exemples le barrage d'Albigna dans le Val Bregaglia (depuis 2020), le barrage du Muttsee dans les Alpes glaronaises (depuis 2022) ou deux barrages dans la région du Grimsel (depuis 2023). Dans une autre variante, des modules photovoltaïques flottent sur le lac de retenue. Un projet de ce type a été réalisé en 2019 avec le soutien de l'OFEN sur le lac des Toules, au Grand-Saint-Bernard. Dans tous les cas, l'infrastructure existante de la centrale hydroélectrique est utilisée pour produire de l'électricité solaire alpine sans intervention supplémentaire dans la nature.

Dans ces exemples, l'énergie hydraulique et l'énergie photovoltaïque peuvent être considérées comme des technologies hybrides, au sens d'une colocalisation, par exemple,

mais le photovoltaïque est peu pilotable et ne dispose pas de capacité de stockage intrinsèque, ce qui limite la possibilité d'une exploitation hybride véritablement intégrée. « La situation est différente lorsqu'on combine une centrale hydroélectrique avec une batterie et que l'on soumet la turbine et la batterie à une commande commune. On obtient alors une centrale hybride où la génération d'énergie peut être partagée de façon optimale entre la batterie et les turbines hydrauliques et qui peut participer comme entité unique au marché de l'énergie », explique Elena Vagnoni. Titulaire d'un doctorat en génie mécanique, elle dirige la recherche sur la plateforme technologique des machines hydrauliques à l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL).

Moins d'usure, plus de puissance de réglage

Depuis plusieurs années, Elena Vagnoni, en collaboration avec Mario Paolone, professeur ordinaire à l'EPFL et directeur du laboratoire des systèmes électriques distribués, mène des recherches sur la manière d'optimiser la production d'électricité à partir de l'énergie hydraulique grâce à l'utilisation de batteries. Dans le cadre du projet européen XFLEX HYDRO, l'attention s'est notamment portée sur la centrale hydroélectrique au fil de l'eau de Vogelgrun, en Alsace. L'une des quatre turbines Kaplan (puissance de 35 MW) y a été combinée à une batterie (puissance de charge/décharge de 650 kW) et les chercheurs ont développé un algorithme de contrôle avancé du système hybride afin d'en optimiser l'exploitation. La solution proposée repose sur une stratégie de contrôle multi-niveaux optimisant la gestion du débit d'eau de la centrale. Elle vise à maintenir les turbines proches de leur point de meilleur rendement tout en minimisant l'usure des composants. Le projet de démonstration a mis en évi-



La centrale hydroélectrique d'Aegina-Altstafel, située en aval du lac Griesse (photo) non loin du col du Nufenen, a été combinée à des éoliennes (existantes), une installation solaire (à construire) et des batteries (potentielles) de différentes tailles pour former une centrale « virtuelle ». Photo : Shutterstock

ce plusieurs avantages de la solution hybride : la contribution de la centrale aux services système du réseau (en particulier le « frequency containment reserve »/FCR) a été préservée et améliorée et l'usure des turbines a été réduite grâce à un fonctionnement flexible.

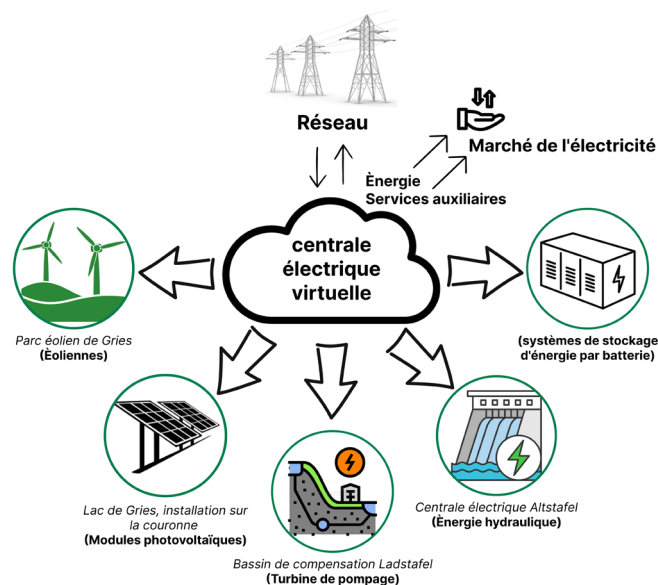
Cette même équipe de chercheurs de l'EPFL a étudié un concept hybride similaire dans une centrale hydroélectrique en Suisse dans le cadre du projet HydroLEAP, soutenu par le programme pilote et démonstration de l'OFEN. À l'aide d'une simulation numérique et d'un montage en laboratoire, elle a évalué les avantages de l'installation d'une batterie dans la centrale au fil de l'eau d'Ernen (32 MW), dans le Haut-Valais. « Avec une batterie relativement petite par rapport à la puissance de la centrale (5% de la puissance totale de la centrale), nous avons montré qu'il était possible de doubler la puissance de réglage donnée au réseau électrique par rapport à ce que la centrale est capable d'offrir aujourd'hui », résume Elena Vagnoni, présentant l'un des principaux résultats de l'étude. « Cela a été réalisé sans réduire la durée de vie de l'installation due à l'usure, sans coûts supplémentaires pour l'entretien, en dehors de l'investissement initial lié à la batterie, et sans risques supplémentaires pour les composants électromécaniques de la centrale. »

Centrales « virtuelles » sur le marché

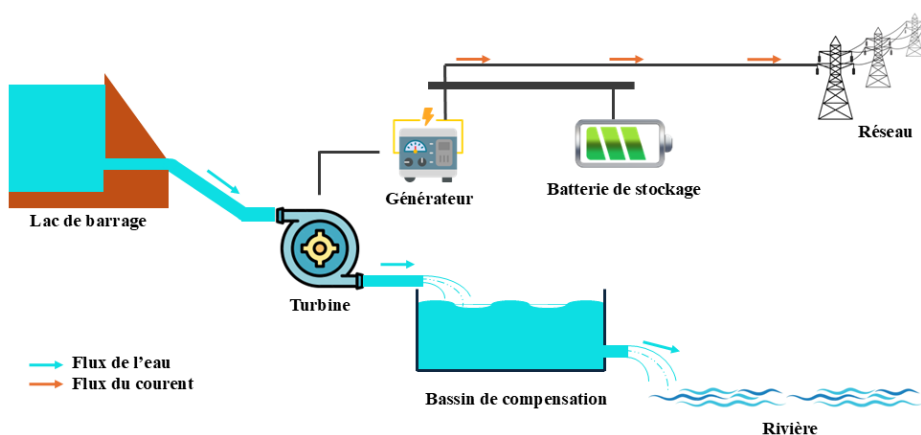
L'énergie hydraulique permet depuis toujours une production d'électricité flexible. Cela vaut tout particulièrement pour

les centrales à accumulation, qui peuvent exploiter le potentiel d'un lac de retenue. Afin de compenser les fluctuations de production des centrales solaires et éoliennes, il faut aujourd'hui exploiter de nouveaux potentiels de flexibilité, dans une moindre mesure pour les centrales au fil de l'eau comme celle d'Ernen, mais surtout pour les centrales à accumulation. Les « centrales électriques virtuelles » constituent une solution possible. Il s'agit généralement de petites centrales hydroélectriques combinées à une batterie et à des centrales solaires et/ou éoliennes. Il n'y a pas de connexion physique directe entre les différentes sources d'énergie, mais elles sont contrôlées conjointement. Grâce à cette forme d'hybridation, les petites centrales hydroélectriques atteignent une taille leur permettant d'offrir des services de haute qualité sur le marché de l'électricité.

Dans le cadre d'un projet de recherche appelé SmallFlex Goms, ce concept est étudié depuis 2022 dans le Haut-Valais sur 19 centrales électriques d'une puissance maximale de 30 MW. « L'un des principaux défis consistait à prévoir de manière aussi fiable que possible la production d'électricité attendue en tenant compte des fluctuations de l'ensoleillement, du vent et du niveau des eaux, afin de pouvoir prendre des engagements de production fiables vis-à-vis du marché de l'électricité », explique Cécile Münch-Alligné, professeure à la branche valaisanne de la Haute école spécialisée de Suisse occidentale, qui a coordonné le projet.



La centrale électrique virtuelle d'Aegina-Altstafel comprend la centrale à accumulation existante et un parc éolien existant. L'installation solaire et la batterie n'existent pas réellement, elles ont été modélisées à des fins de calcul. Illustration : HEIG-VD



Le projet STORE examine notamment les avantages qui découlent du fait que le bassin de compensation peut être dimensionné plus petit grâce à l'utilisation d'une batterie. Graphique : STORE

Revenus supplémentaires grâce aux batteries

Prenons l'exemple de la centrale électrique d'Aegina-Alts- tafel, située au col du Nufenen. Cette centrale fournit une puissance de 9,2 MW grâce à une turbine Francis qui utilise l'eau d'un lac de retenue de 18 millions de mètres cubes. Dans le cadre du projet SmallFlex Goms, cette centrale a été reliée à une centrale éolienne (10 MW), une installation solaire (9 MW) et une batterie de différentes tailles pour former une centrale électrique virtuelle. Les chercheurs ont calculé les revenus que cette centrale pourrait générer en fournissant différents services sur le marché de l'électricité.

Conclusion : en fournissant une puissance de réglage à la société nationale Swissgrid, la centrale électrique virtuelle peut générer un revenu supplémentaire entre 2% et 6%, selon la taille de la batterie utilisée et la situation du marché d'électricité. « La forte baisse du prix des batteries ces dernières années permet désormais un amortissement bien plus court qu'auparavant », explique Mokhtar Bozorg, professeur à la Haute école d'économie et d'ingénierie du canton de Vaud, qui a participé au projet SmallFlex Goms. Les revenus supplémentaires sont encore plus élevés lorsque la centrale électrique virtuelle est utilisée pour éviter les pénalités que les propriétaires de centrales solaires et éoliennes doivent payer sur le marché de l'électricité au niveau des groupes-bilan s'ils fournissent moins (ou plus) d'électricité que prévu.

Selon Mokhtar Bozorg, l'hybridation de petites centrales à accumulation avec des batteries et des centrales solaires et/ou éoliennes n'est pas seulement intéressante sur le plan financier. La combinaison de plusieurs technologies permet également une plus grande flexibilité dans la production d'électricité : « Les batteries, qui sont adaptées à la taille de la centrale hydroélectrique, peuvent être utilisées pour un

cycle quotidien de charge et de décharge. Cette flexibilité quotidienne est ensuite complétée par la flexibilité saisonnière offerte par le lac de retenue. Les exploitants de centrales électriques peuvent tirer pleinement parti des fluctuations quotidiennes et saisonnières des prix grâce aux centrales électriques virtuelles », souligne M. Bozorg.

La batterie atténue les éclusées

L'hybridation de l'énergie hydraulique par des batteries promet également un avantage écologique. C'est l'hypothèse qu'étudie actuellement une équipe de chercheurs de l'ETH Zurich et de la Haute école spécialisée de Suisse occidentale dans le cadre du projet de recherche STORE. La question centrale est de savoir comment éviter, dans les cours d'eau en aval des centrales à accumulation, les fortes fluctuations écologiquement néfastes du niveau d'eau (« éclusées ») causées par les variations importantes de la puissance des turbines. Afin de réduire les effets des éclusées, l'eau turbinée peut par exemple être acheminée vers des bassins de compensation avant d'être réinjectée dans le lit de la rivière. L'utilisation de batteries offre une alternative : celles-ci permettent en effet d'atténuer considérablement les démarrages et arrêts rapides et écologiquement problématiques des turbines.

« Les premiers résultats indiquent que la combinaison d'une batterie et d'un bassin de compensation de plus petite taille permet des solutions particulièrement économiques », explique Korina Drakaki, doctorante travaillant sur le projet STORE. Grâce à l'utilisation de batteries, la puissance instantanée de la turbine est soumise à moins de fluctuations, ce qui réduit l'usure. De plus, l'utilisation combinée permet de réduire la taille du bassin de compensation et de la batterie. Le bassin de compensation bénéficie ainsi de la batterie, car son installation nécessite moins d'espace, et la batterie bénéficie

ficie du bassin, car sa taille et les coûts d'investissement sont réduits. La batterie permet d'offrir une puissance de réglage et d'autres services système. Le projet de recherche se poursuivra jusqu'à fin 2027.

- Projet de l'UE [XFLEX HYDRO](#).
- Projet de l'OFEN [HydroLEAP](#) (projet P+D).
- Projet de l'OFEN [SmallFlex Goms](#) ; un article spécialisé sur le projet précédent SmallFlex est disponible [ici](#).
- Projet d'Innosuisse [STORE](#).
- Pour toute **information** complémentaire, veuillez contacter [Klaus Jorde](#), responsable externe du programme de recherche de l'OFEN sur l'énergie hydraulique.
- Vous trouverez d'autres **articles spécialisés** sur les projets de recherche, pilotes, de démonstration et phares dans le domaine de [l'énergie hydraulique](#).