

# Potentialités et limites de l'hydraulique



Alfred Wüest, physicien, dirige le département Eaux superficielles de l'Eawag et enseigne à l'EPF de Zurich et à celle de Lausanne.

Coauteurs : Andreas Bruder, Armin Peter, Stefan Vollenweider

La Suisse va très bientôt investir des sommes colossales dans l'hydraulique. Il faut trouver des solutions intelligentes, à la fois rentables et écologiquement acceptables, pour assurer la production de pointe et le stockage des suppléments produits par les nouvelles énergies renouvelables. Ce serait bénéfique aussi bien à la Suisse qu'Europe et, dans l'idéal, gagnant-gagnant pour les rivières et les électriciens.

Tout le monde en Suisse a accès à l'électricité. Ce qui nous paraît naturel ne l'est pas car la mise en place d'un système de production et de distribution durable et stable est une tâche difficile que tous les gouvernements ne parviennent pas à remplir avec la même efficacité. La catastrophe de Fukushima n'a pas arrangé les choses. En Suisse, le Parlement et le Conseil fédéral ont très rapidement décidé d'abandonner la filière électronucléaire. Nous devons maintenant de toute urgence trouver des solutions pour compenser les quelque 24 TWh/an qui viendront à manquer. Ce déficit énergétique, que nous allons devoir combler par une double stratégie de sobriété et efficacité énergétiques et de renforcement des autres filières, représente aujourd'hui 40 pour cent de la consommation du pays et devrait augmenter du fait de la progression incessante des besoins en électricité.

Nous avons donc besoin, pour être réalistes, de solutions énergétiques livrant 30 à 40 TWh/an [1]. Le plus simple serait de recourir aux énergies fossiles mais ce serait incompatible avec les engagements climatiques du protocole de Kyoto dont la Suisse est cosignataire. La solution doit donc venir des énergies renouvelables comme l'éolien, le solaire, l'hydraulique ou la géothermie. Mais quel rôle peut et doit jouer la filière hydroélectrique dans le scénario énergétique à venir ?

**Le rôle tampon de l'hydraulique.** Le secteur hydraulique est le principal producteur d'électricité de la Suisse dont il couvre plus de 55 pour cent des besoins – mais ses capacités d'expansion sont limitées. Même si les estimations de l'Office fédéral de

l'énergie [2], de l'Association suisse pour l'aménagement des eaux [3] et des organisations écologistes diffèrent, on peut considérer de façon réaliste que sa capacité de production pourrait être augmentée de 1 à 3 TWh/an nets (Tab. 1). En tenant compte de la baisse de production entraînée par le respect des dispositions relatives aux débits résiduels, l'optimisation des ouvrages existants et la construction de nouvelles centrales ne permettraient d'augmenter les capacités que de 10 pour cent par rapport au niveau actuel [3]. En termes de production, l'hydraulique ne sera donc pas en mesure de combler le déficit qui nous attend. Etant donné, par ailleurs, que l'éolien a peu d'avenir en Suisse et que celui de la géothermie est incertain, il apparaît nettement que la filière photovoltaïque devra jouer un rôle important dans le futur mix énergétique.

Mais l'hydraulique peut contribuer de deux autres façons à la résolution des problèmes d'approvisionnement de la Suisse et du reste de l'Europe : (1) en assurant une production de pointe en période de forte consommation et (2) en assurant un stockage des excédents en période de faible demande. Avec une puissance installée maximale de 13,4 GW et des pointes effectives d'environ 10 GW, le parc hydroélectrique suisse est particulièrement flexible et peut réagir très rapidement aux variations de la demande. Disposant en outre d'une capacité de stockage d'environ 4 km<sup>3</sup> dans ses barrages-réservoirs alpins, il est en mesure de compenser les irrégularités d'alimentation du réseau pendant plusieurs mois. Etant donné que jusqu'à présent, les périodes de surproduction soudaines et imprévisibles du solaire et de l'éolien – on parle de production stochastique – ne jouaient pas de rôle réel en Europe, les Alpes disposent encore de peu d'installations de pompage-turbinage dédiées à la compensation des fluctuations jour/nuit. Cette situation va très certainement changer dans un proche avenir : La Suisse peut devenir une pièce maîtresse dans l'échiquier énergétique européen en stockant une grande partie de l'énergie de pointe produite de façon stochastique.

**L'hydraulique pour compenser les fluctuations journalières.** Si d'avenir, la part de l'éolien (du nord de l'Europe) et du photovoltaïque (suisse) augmente, la production d'électricité sera beaucoup moins régulière et connaîtra d'énormes fluctuations

Tab. 1: Potentialités d'accroissement de la production hydroélectrique en Suisse [2–4].

Interventions	Potentiel estimé (TWh/an)
Efficacité énergétique, optimisations, rénovations	1,0 à 1,8
Grandes centrales hydrauliques	0,7 à 1,4
Petite centrales hydrauliques	0,7 à 1,7
Respect des débits réservés	-2,0 à -1,4
Changements climatiques	± 0
<b>Total</b>	<b>0,5 à 3,5</b>

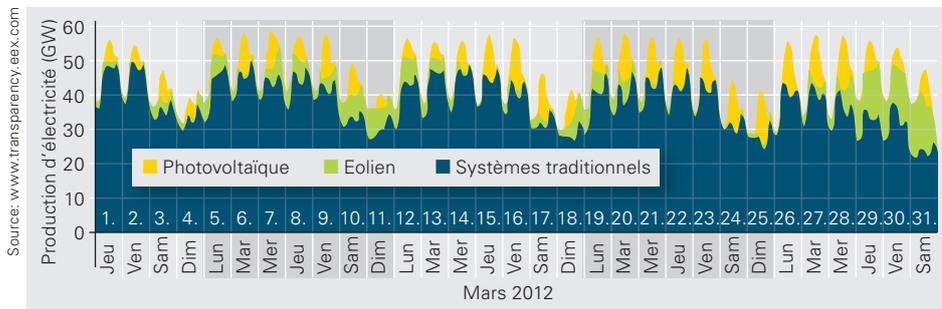
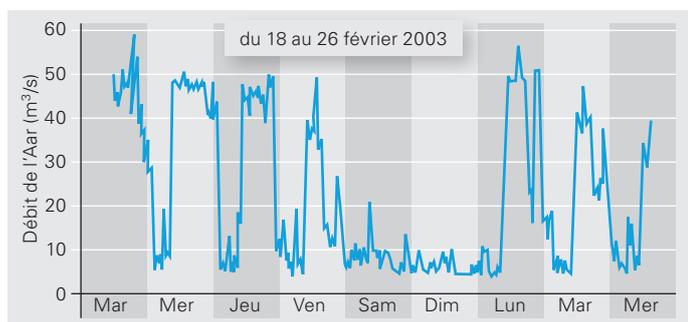


Fig. 1 : Production d'électricité de l'Allemagne pendant le mois de mars 2012. Le samedi 31, la production d'origine solaire et éolienne a atteint 32 GW en milieu de journée, soit plus de 50 pour cent du total. Dans de telles situations, des installations de pompage-turbinage devraient être disponibles pour stocker l'excédent de production.

journalières, voire horaires (Fig. 1). Quel sera l'ordre de grandeur des excédents et déficits de production des nouvelles énergies renouvelables? Et avec quelle soudaineté vont-ils se manifester? Pour nous faire une idée, considérons que les 30 TWh/an perdus par l'abandon du nucléaire seront produits par la filière photovoltaïque. D'après l'expérience de nos voisins allemands, une telle production nécessiterait une puissance installée de 40 GW [4]. Le réseau aurait alors à faire face à des variations de puissance pouvant atteindre 20 GW en fonction de l'ensoleillement. Le parc hydroélectrique suisse n'est pas aujourd'hui en mesure de compenser totalement de telles fluctuations. Même si le solaire a l'énorme avantage de produire pendant les périodes de consommation maximale et que l'installation de réseaux intelligents permet de compenser les variations de courte durée, il apparaît nettement que les capacités de stockage doivent être augmentées.

Une augmentation de la puissance installée des centrales à accumulation consécutive à un accroissement des capacités de stockage dans les barrages réservoirs accentuerait toutefois les problèmes liés aux éclusées en aval des restitutions. Les eaux stockées sont en effet turbinées en fonction de la demande d'électricité (maximale pendant la journée et les jours ouvrables) et le rythme, la durée et le volume des restitutions créent dans les tronçons qui les accueillent un régime artificiel caractérisé par une succession de crues ou éclusées et d'étiages qui perturbe gravement les écosystèmes aquatiques touchés (Fig. 2). La montée rapide des eaux peut ainsi déstabiliser le fond du cours d'eau et provoquer l'entraînement de nombreux organismes comme les larves d'insectes et les poissons de petite taille qui disparaissent

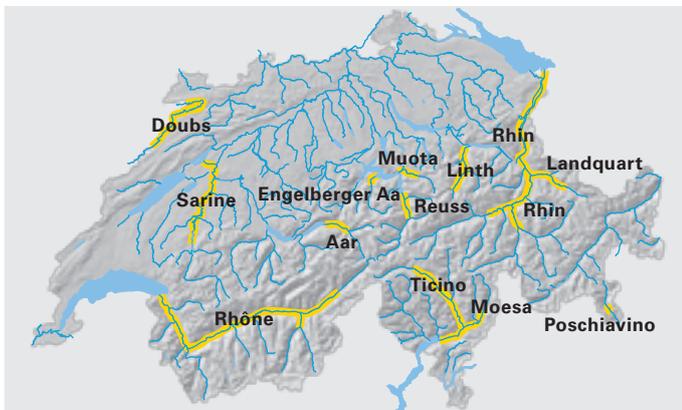
Fig. 2 : Débits de l'Hasli-Aare présentant un régime d'éclusées typique avec un rapport de 10:1 entre le débit d'éclusée et le débit plancher. Les conditions sont en général meilleures en été suite à un débit naturellement plus élevé.



peu à peu. En défavorisant ces organismes fragiles de façon récurrente, les éclusées peuvent donc modifier la composition faunistique des écosystèmes affectés (Tab. 2). Lorsque le niveau de l'eau redescend après la période de turbinage, de nombreux organismes et en particulier des poissons peuvent s'échouer ou

Tab. 2 : Effets des éclusées hydroélectriques.

	Phénomène	Impact direct
<b>Montée subite des eaux (éclusée)</b>	Augmentation subite de la vitesse du courant	<ul style="list-style-type: none"> <li>► Dérive des organismes d'eau courante (dépassant les apports venant de l'aval)</li> <li>► Fuite vers les zones de moindre courant</li> <li>► Entraînement de la matière organique (ressource nutritive)</li> </ul>
	Mobilisation des matériaux de fond	<ul style="list-style-type: none"> <li>► Dégradation mécanique</li> <li>► Dérive d'organismes benthiques</li> <li>► Entraînement des sédiments fins</li> <li>► Augmentation de la turbidité</li> </ul>
	Apport et transport de matières en suspension	<ul style="list-style-type: none"> <li>► Augmentation de la turbidité</li> <li>► Augmentation du stress physiologique</li> <li>► Blessures (peau et branchies)</li> <li>► Abrasion des organismes</li> <li>► Réduction de la photosynthèse</li> </ul>
<b>Phase de haut débit</b>	Déplacement de la charge de fond	<ul style="list-style-type: none"> <li>► Endommagement mécanique des organismes benthiques</li> <li>► Réduction du colmatage du fond</li> </ul>
	Modifications de la température de l'eau	<ul style="list-style-type: none"> <li>► Dérive d'organismes d'eau courante</li> <li>► Augmentation d'activité</li> </ul>
	Modification de la composition géochimique de l'eau	<ul style="list-style-type: none"> <li>► Exposition des organismes à des concentrations variables d'oxygène, de nutriments et de matière organique et inorganique</li> </ul>
<b>Baisse subite des eaux (stockage)</b>	Réduction de la surface mouillée	<ul style="list-style-type: none"> <li>► Echouage des organismes (mise à sec, gel des habitats et des frayères)</li> <li>► Blocage des organismes dans des habitats inadaptés</li> </ul>
	Baisse subite de la vitesse du courant	<ul style="list-style-type: none"> <li>► Sédimentation des particules en suspension</li> <li>► Colmatage du fond</li> </ul>
<b>Phase de faible débit</b>	Faible surface mouillée, faible hauteur d'eau	<ul style="list-style-type: none"> <li>► Problèmes classiques des tronçons court-circuités: Modifications de la qualité de l'eau (manque d'habitats et de continuité écologique, problèmes thermiques)</li> </ul>
<b>Variabilité des débits élevée</b>	Régime d'écoulement artificiel	<ul style="list-style-type: none"> <li>► Altérations morphologiques</li> <li>► Perturbations du comportement des poissons et du macrozoobenthos</li> </ul>



Source : Association suisse pour l'aménagement des eaux

Fig. 3: Carte des principaux secteurs de cours d'eau fortement influencés par les éclusées. Leur fréquence est particulièrement élevée en amont immédiat des lacs périalpins. Le Rhône en amont du Léman, le Rhin alpin en amont du lac de Constance, le Ticino, la Sarine et le Doubs sont particulièrement touchés.

être piégés dans des mares provisoires. La succession rapide et incessante de ces phases de turbinage et de stockage a de multiples effets sur l'écologie des cours d'eau et en particulier sur leur biocénose [5], les poissons et les invertébrés étant tout particulièrement affectés par les variations subites de débit. Les centrales à pompage-turbinage, au contraire, ne posent pas ce genre de problèmes puisque les échanges entre le bassin supérieur et le bassin inférieur se font indépendamment des cours d'eau.

**Atténuation des effets écologiques des éclusées.** Les cours d'eau influencés par les éclusées se rencontrent dans tout l'arc alpin mais c'est en Suisse, en amont des lacs périalpins, que leur fréquence est particulièrement frappante (Fig. 3). Dans la révision de la loi fédérale sur la protection des eaux de 2010, le Parlement a décidé, les effets néfastes des éclusées hydroélectriques devaient dorénavant être éliminés ou atténués. Les nouveaux objectifs doivent être atteints par le biais d'aménagements hydrauliques éventuellement accompagnés de modifications volontaires

Fig. 4: Modèle d'un petit bassin de compensation [8]. L'image est traversée au premier plan par l'Aar qui s'écoule de haut en bas et de droite à gauche et reçoit la Gadmerwasser à droite du bassin. Un bassin d'environ 50000 m<sup>3</sup> permettrait de ramener le rapport débit d'éclusée/ débit plancher de 8:1 à 5:1.



de la gestion des ouvrages. Les autorités cantonales travaillent actuellement à la planification stratégique des assainissements qui doivent être coordonnés avec les autres actions prévues dans le bassin versant (revitalisations) et ordonneront ensuite la réalisation des aménagements.

Les bassins de compensation font partie des aménagements envisageables pour réduire les effets des éclusées hydroélectriques (Fig. 4). Les petits bassins de compensation peuvent ralentir les variations de débit mais ne modifient pas le débit maximal tandis que des bassins de compensation de grand volume peuvent absorber les fluctuations journalières voire hebdomadaires et réduire ainsi les minima et les maxima. Une étude a été réalisée sur mandat de l'Association pour l'aménagement des eaux pour estimer les volumes qui seraient nécessaires [6]: Pour ramener le rapport entre le débit d'éclusée et le débit plancher à 5:1, des bassins de quelques centaines de milliers à plusieurs millions de mètres cubes devraient être créés pour le Rhin, le Rhône, la Reuss, l'Aar, le Ticino et l'Inn. La surface occupée serait plus ou moins importante selon la périodicité des fluctuations à compenser et pourrait atteindre plusieurs dizaines d'hectares.

Les bassins de compensation pourraient également servir de petits bassins inférieurs pour de centrales à pompage-turbinage et pourraient ainsi contribuer à la gestion de la production stochastique venant des nouvelles énergies renouvelables. La construction de bassins de compensation suffisamment grands permettrait de stocker les excédents de l'éolien et du photovoltaïque pendant plusieurs heures dans des lacs de retenue plus en amont. En raison des espaces qu'il faudrait leur sacrifier, de tels projets risquent fort de rencontrer une vive opposition. Ce serait cependant un mal nécessaire si la capacité de turbinage des installations restituant en cours d'eau devait être augmentée.

**Le pompage-turbinage pour compenser les fluctuations de grande périodicité.** En plus de la construction de bassins de compensation équipés de systèmes de pompage, celle de nouvelles centrales à pompage-turbinage doit être envisagée pour compenser les fluctuations de production des nouvelles énergies renouvelables. La Suisse dispose aujourd'hui de 14 centrales de ce type, généralement petites, totalisant une puissance installée de pompage de 1,4 GW (Tab. 3). Par rapport aux fluctuations stochastiques qui, selon nos estimations, attendent le réseau européen, cette capacité est insignifiante. C'est pourquoi de nombreux projets sont actuellement à l'étude en Suisse. Trois grands chantiers ont déjà été lancés.

Le pompage-turbinage sur des lacs de haute montagne représente-t-il la solution la plus éco compatible? Les transferts entre barrages existants ou l'utilisation d'un très grand lac périalpin comme bassin inférieur auraient un impact assez faible sur les milieux naturels à condition que les installations de pompage soient conçues de manière à ne pas happer les poissons. Nous pouvons sur ce point tirer les enseignements des effets désastreux de certaines centrales comme celle de Geesthacht sur l'Elbe. Un des dangers des transferts entre lacs peut encore être la mise en contact écologique et hydrologique de bassins versants différents. Pour des raisons écologiques (marnage, effets thermiques

Existantes		Total 1460	
Grimsel 2	352	12 autres	852
Hongrin-Léman	256		
En construction		Total 2140	
Hongrin-Léman/Veytaux II, 2015	240	Nant de Drance/Emosson, 2017	900
Linth-Limmern/Muttsee, 2015	1000		
Procédure d'autorisation en cours		Total 1630	
Lagobianco (Val Poschiavo)	1000	Grimsel 3 (KWO Plus)	630

Tab. 3: Centrales à pompage-turbinage existantes ou en projet en Suisse. Puissance en MW.

et modifications de la turbidité), les petits lacs ne devraient pas être utilisés pour le pompage-turbinage. Les dimensions du lac de Poschiavo dans le Puschlav sont considérées comme le minimum acceptable [7]. Le grand avantage écologique du pompage-turbinage est de pouvoir accroître la production de pointe sans aggraver les problèmes liés aux éclusées.

D'après le tableau 3, la Suisse pourrait disposer d'une puissance de pompage d'environ 6 GW au moment de l'arrêt de la filière électronucléaire, ce qui devrait être suffisant pour absorber les fluctuations journalières et hebdomadaires des productions stochastiques et offrirait des réserves intéressantes aux producteurs européens. Cette capacité est toutefois encore trop faible pour assurer la stabilité du réseau pendant des périodes prolongées de grand froid, de canicule ou de sécheresse ou encore pour absorber les fluctuations saisonnières. En livrant une telle prestation, la filière hydraulique pourrait pourtant s'assurer de gains considérables qu'elle pourrait en partie réinvestir dans les compensations écologiques nécessaires.

### L'hydraulique pour compenser les fluctuations saisonnières ?

Si on considère que le déficit de production électrique occasionné en Suisse par l'abandon du nucléaire sera principalement compensé par une production photovoltaïque, la question se pose de savoir si le parc hydroélectrique (actuel) sera également en mesure de compenser les fluctuations saisonnières. L'expérience de nos voisins allemands montre que 50 pour cent de la production photovoltaïque annuelle s'effectue au printemps et à l'automne, 40 pour cent en été et 10 pour cent en hiver. Ramenés à l'échelle de la Suisse, ces chiffres indiquent que cette filière produirait un excédent estival de 4 à 5 TWh qui manquerait ensuite en hiver. Il paraît utopique de stocker une telle quantité d'énergie avec les volumes existants étant donné qu'ils sont déjà utilisés pour compenser les fluctuations saisonnières actuelles. Les estimations indiquent qu'un volume supplémentaire d'environ un kilomètre cube serait nécessaire pour stocker les excédents saisonniers, ce qui correspond *grosso modo* à la capacité totale du canton du Valais avec ses immenses barrages de la Grande Dixence, de Mauvoisin et d'Emosson. Même si une partie du volume peut être gagnée en surélevant les murs existants, il est évident que les projets de construction de nouveaux barrages d'un tel ordre de grandeur se heurtent à une forte opposition.

**Questions de gestion durable.** Ces perspectives de développement de l'hydraulique suscitent des interrogations très concrètes sur les conditions dans lesquelles la production de pointe et le stockage doivent s'effectuer pour être écologiquement acceptables: Quelles modifications des débits et de la contrainte exercée sur le fond des rivières doit-on atteindre dans le cadre de l'assainissement des secteurs influencés par les éclusées? Comment les bassins de régulation et de compensation doivent-ils être conçus pour que le pompage-turbinage et la compensation des fluctuations hebdomadaires soient efficaces? Quelles sont les exigences à respecter dans les lacs inférieurs en matière de température, de turbidité, de marnage et d'habitats piscicoles? Un calendrier doit être très prochainement mis en place pour étudier ces questions fondamentales (voir page 26).

**Conclusion.** En assurant une fonction de production de pointe et de pompage-turbinage, l'hydraulique suisse peut apporter une contribution décisive et constructive à l'intégration du courant produit de façon stochastique dans le réseau européen. La transition énergétique et l'adaptation du parc hydroélectrique qui pourrait être bénéfique sur bien des plans, demanderont à la Suisse des investissements très importants: (1) pour le développement de l'énergie solaire et (2) des capacités du réseau, (3) pour la construction de nouvelles centrales de pompage-turbinage et (4) la construction ou l'agrandissement des réservoirs alpins et enfin (5) pour l'aménagement de bassins de compensation. Alors que les aménagements nécessaires à la compensation des fluctuations journalières et hebdomadaires de l'offre et de la demande de courant semblent raisonnables et réalisables, la gestion des fluctuations saisonnières exigerait la construction de nouveaux grands barrages-réservoirs en haute montagne. Si un tel projet s'avérait inacceptable pour la population, il faudrait recourir pour l'hiver aux énergies fossiles ou à une extension de l'éolien à l'étranger. ○ ○ ○

- [1] ETH Zürich (2011): Energiezukunft Schweiz, Studie vom November 2011.
- [2] Bundesamt für Energie (2011): Energieperspektiven 2050. Abschätzung des Ausbaupotenzials der Wasserkraftnutzung unter neuen Rahmenbedingungen.
- [3] Pfammatter R. (2012): Wasserkraftpotenzial der Schweiz – eine Auslegeordnung. Wasser Energie Luft 104 (1).
- [4] European Energy Exchange AG, Leipzig, [www.transparency.eex.com](http://www.transparency.eex.com)
- [5] Baumann P., Klaus I. (2003): Conséquences écologiques des éclusées – Etude bibliographique. Informations concernant la pêche 75, Office fédéral de l'environnement.
- [6] Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband (2006): Kraftwerksbedingter Schwall und Sunk. Eine Standortbestimmung. Studie von VAW/ETHZ und LCH/EPFL.
- [7] Bonalumi M., Anselmetti F.S., Wüest A., Schmid M. (2012): Modeling of temperature and turbidity in a natural lake and a reservoir connected by pumped-storage operations. Water Resources Research. accepté.
- [8] Kraftwerke Oberhasli (2011): Aufwertung der Kraftwerke Handeck 2 und Innertkirchen 1: Das Wasser effizienter nutzen. Informationsbroschüre, KWO, Innertkirchen.