



Vue du barrage des Trois-Gorges, en Chine.

L'énergie hydraulique à l'échelle mondiale

Potentiel, impacts environnementaux et perspectives | L'énergie hydraulique est efficace, flexible et respectueuse du climat. Si les lacs de retenue peuvent avoir un effet bénéfique en cas de précipitations extrêmes ou de sécheresse, les barrages peuvent aussi nuire à l'écologie des cours d'eau et les phénomènes météorologiques extrêmes mettent les installations à rude épreuve. Quel sera son rôle à l'avenir ?

JANOSCH DEEG

En Suisse, les barrages ne sont rien d'inhabituel. Après tout, près de 60 % de l'énergie produite dans le pays proviennent de l'énergie hydraulique. Les montagnes verdoyantes qui entourent l'ouvrage représenté ci-dessus semblent aussi familières. Seules les dimensions sont déconcertantes. Ce barrage fait plus de 2,3 km de long et est constitué de près de 30 millions de m³ de béton. Son lac de retenue atteint une longueur de 663 km et une superficie de plus de 1000 km². Sous l'eau: d'anciennes terres agricoles, des forêts et d'autres espaces naturels, ainsi que 13 villes et 1350 villages. Environ 1,3 million de personnes

ont dû être déplacées jusqu'à sa complète mise en service, en 2012. Cela n'a rien à voir avec quelque chose qui pourrait se passer en Suisse.

Bien sûr, le barrage décrit ici ne se trouve pas dans notre pays, mais en République populaire de Chine, le pays des superlatifs. Le barrage des Trois-Gorges, sur le Yang-Tsé-Kiang, est la centrale hydroélectrique la plus puissante au monde. Avec ses 22,5 GW, l'installation peut produire autant d'électricité que 20 centrales nucléaires de taille moyenne ou près de 4000 éoliennes modernes. À titre de comparaison: la centrale hydroélectrique la plus puissante de Suisse, celle

de Biudron, dans le canton du Valais, dispose d'une puissance maximale d'un peu plus de 1,2 GW.

Cette technologie est extrêmement efficace: elle peut convertir plus de 90 % de l'énergie hydraulique en électricité, ce qui en fait la forme la plus efficace de production d'énergie électrique. Elle constitue donc, en Chine aussi, un élément essentiel d'un approvisionnement énergétique à faible émission de CO₂. Mais cette installation gigantesque met aussi en évidence le dilemme de cette technologie: d'un côté, elle est efficace et respectueuse de l'environnement, de l'autre, elle a des répercussions considérables sur la

faune et la flore ainsi que sur les êtres humains. Les avis divergent donc sur son expansion.

Le potentiel encore inexploité de l'énergie hydraulique

Commençons par le plus évident : « La Suisse est le pays dont le taux d'utilisation de l'énergie hydraulique est le plus élevé », explique Robert Boes, professeur de génie hydraulique et directeur du Laboratoire d'hydraulique, d'hydrologie et de glaciologie (VAW) au sein du département de génie civil, environnement et géomatique de l'ETH Zurich. Selon cet expert, le potentiel du pays est largement exploité. « Il reste tout au plus 10 % », estime-t-il. À l'avenir, l'énergie solaire occupera une place de plus en plus importante, surtout pendant le semestre d'été. L'énergie hydraulique servira alors surtout à compenser les fluctuations du soleil et du vent. « C'est la raison pour laquelle nous développons en particulier les centrales à accumulation, afin de rendre notre système d'approvisionnement énergétique encore plus flexible », ajoute-t-il.

Pour Hans-Josef Fell, spécialiste en énergies renouvelables, cette flexibilité est, avec l'efficacité, l'un des arguments les plus importants en faveur du développement de l'hydroélectricité. « Lorsque l'ensoleillement est faible, nous avons besoin d'autres méthodes de production d'électricité qui puissent intervenir de manière flexible. C'est exactement ce que peut faire l'énergie hydraulique. » En effet, la quantité d'énergie produite peut être contrôlée de manière relativement précise grâce à la quantité d'eau extraite du lac de retenue pour alimenter les générateurs.

Hans-Josef Fell travaille dans le domaine des énergies renouvelables depuis 50 ans. En 2006, il a fondé le groupe de réflexion « Energy Watch Group », un réseau international de scientifiques et de parlementaires qui vise à réduire les émissions de CO₂ et à inverser le réchauffement de l'atmosphère aux niveaux mondial, national et communal. En collaboration avec son collègue Heinrich Strössenreuther, il a publié en 2024 une étude qui, selon ses propres termes, « détermine le potentiel de l'énergie hydraulique » [1]. Leur objectif consistait à accroître l'acceptation de cette technologie au sein de la population et, en particulier, dans le monde politique. « J'ai remarqué ces



Le grand barrage de la Renaissance, en construction depuis 2011 en Éthiopie, comprend un barrage-poids d'environ 2 km de long et de 145 m de haut. Sa construction devrait être achevée d'ici 2028.

dernières années une aversion croissante pour l'hydroélectricité et je voulais y remédier. »

Dans la plupart des pays européens, l'énergie hydraulique est déjà relativement bien exploitée. La Norvège se trouve en tête, avec plus de 90 % de son électricité produite grâce à cette technologie. Selon Hans-Josef Fell, il y a encore du potentiel dans des pays tels que la Suisse et l'Allemagne. « Il faudrait avant tout moderniser les centrales hydroélectriques existantes pour augmenter leur rendement », conseille-t-il. « Il serait ensuite aussi possible d'utiliser les bassins de rétention existants, qui servent à protéger contre les inondations, pour produire de l'électricité. » Il voit également un potentiel dans les voies navigables, où l'eau est retenue pour permettre aux bateaux de circuler.

Une étude chinoise de 2022 arrive à la conclusion qu'il existe encore, à l'échelle mondiale, un potentiel hydroélectrique inexploité et rentable d'environ 5270 TWh par an [2]. À titre de comparaison, environ 4200 TWh d'hydroélectricité sont actuellement produits chaque année [3]. Deux tiers du potentiel inexploité sont concentrés dans la région de l'Himalaya. La part inutilisée de l'Afrique s'élève, quant à elle, à 600 TWh par an, soit à environ quatre fois la quantité annuelle d'hydroélectricité produite actuellement par ce

continent. D'autres sources estiment que l'Afrique n'exploite même pas 10 % de la capacité totale disponible [4].

Pourtant, la part de l'énergie hydraulique dans la production d'électricité de certains pays africains, tels que l'Éthiopie, le Mozambique, l'Ouganda, la Zambie et la République démocratique du Congo, dépasse déjà les 80 % [5]. Cela n'a rien de surprenant si l'on considère que ces pays sont traversés par de grands fleuves, comme le Nil, le Niger, le Congo et le Zambèze. La centrale hydroélectrique du barrage de Cahora Bassa, sur le Zambèze, au Mozambique, a par exemple une puissance d'environ 2 GW, celle d'Assouan, sur le Nil, dans le sud de l'Égypte, est même un peu plus puissante. Et en Éthiopie, le grand barrage de la Renaissance, sur le Nil Bleu, est en cours de construction. Avec ses environ 6 GW, il s'agira de la centrale hydroélectrique la plus puissante du continent africain. Les premières turbines ont été mises en service en 2022, et l'installation devrait être achevée d'ici 2028. L'objectif consiste à alimenter la population croissante de l'Éthiopie en électricité.

Un avenir incertain

Mais cet objectif est-il vraiment réalisable ? Dans une étude menée en 2023, une équipe de chercheurs a analysé le



Prise d'eau en haute montagne de la centrale hydroélectrique de Gletsch-Oberwald. Cette centrale constitue un bon exemple de consensus combinant production d'énergie hydraulique et mesures environnementales de compensation : grâce aux mesures prises en matière de revitalisation, le Rhône a retrouvé, à Oberwald, son caractère original.

paysage énergétique africain de 2020 à 2050 [6]. Ils prévoient qu'au cours de cette période, la baisse des coûts des énergies éolienne et solaire aura pour conséquence qu'une grande partie des centrales hydroélectriques actuelles ne seront plus compétitives sur le plan économique. À cela s'ajoutent les aléas du changement climatique. Le continent enregistre déjà une augmentation des périodes de canicule et de sécheresse. Dans certaines villes du Mozambique, du Zimbabwe et du Ghana, des pénuries d'eau ont déjà été enregistrées ces dernières années. De plus, une ressource rare est source de conflits potentiels : l'Égypte et le Soudan s'inquiètent pour leur approvisionnement en eau en raison du grand barrage de la Renaissance éthiopien. De nombreux observateurs craignent une guerre de l'eau dans cette région [7].

En Europe aussi, des conflits d'intérêts sont envisageables en période de sécheresse : « L'agriculture, par exemple, aura besoin de plus d'eau. Et les défenseurs de l'environnement exigeront que l'on relâche plus d'eau des lacs de barrage pour éviter un assèchement des rivières et la mort des poissons. Enfin, il faudra de l'eau pour l'approvisionnement en eau potable de la population, car la production des sources d'eau sera moins abondante », explique Robert Boes en esquissant un

scénario possible. Il pourrait alors ne rester pratiquement plus d'eau pour l'approvisionnement énergétique.

Niveaux en baisse

Dans certaines régions du monde, ceci est déjà une réalité. Prenons l'exemple de la Californie. Là-bas, la part de l'énergie hydraulique dans la production totale d'électricité était de 19 % en 2021, mais elle a chuté à moins de la moitié en 2022 [8]. Les coupables : les sécheresses et périodes de canicule exceptionnellement longues qui ont fait chuter les niveaux des réservoirs à des niveaux historiquement bas. Un autre exemple : le Brésil. Depuis des années, toutes les rivières du bassin amazonien présentent des niveaux d'eau toujours plus critiques. Le Rio Negro, le sixième plus gros fleuve du monde en termes de débit, a atteint en 2024 à Manaus, la capitale de l'État de l'Amazonas, le niveau d'eau le plus bas jamais enregistré depuis le début des mesures, en 1902 [9]. Ceci n'est pas resté sans conséquences pour la production d'énergie : de nombreuses centrales électriques n'ont produit à certains moments qu'une fraction de leur capacité [10].

Hans-Josef Fell est également convaincu que le changement climatique peut conduire à de tels scénarios. Mais cela ne va pas à l'encontre de

l'énergie hydraulique, estime-t-il. « Dans les pays qui dépendent à 70 ou 80 % de l'hydroélectricité, le changement climatique peut devenir un véritable problème. Comme partout dans le monde, il faudrait donc aussi y développer davantage les énergies renouvelables telles que les énergies éolienne et solaire. » Selon lui, cela réduirait la dépendance à l'énergie hydraulique, et ce d'autant plus que, surtout en période de sécheresse, il y a généralement suffisamment de soleil.

En Europe centrale, l'énergie hydraulique pourrait même profiter du changement climatique. « Les modèles climatiques pour la Suisse montrent qu'à l'échelle annuelle, les précipitations restent à peu près les mêmes, mais que leur répartition au cours de l'année évolue : les étés sont plus secs et les hivers plus humides », explique Robert Boes. « Pendant les mois d'hiver, la neige retient beaucoup d'eau. Parallèlement, la demande en énergie est élevée, car le soleil fournit moins d'énergie. » Il serait donc positif, surtout pour les centrales hydroélectriques au fil de l'eau, qu'il pleuve davantage en hiver. « Dans l'ensemble, les modélisations montrent qu'en Suisse, l'énergie hydraulique sera encore rentable dans cent ans », ajoute-t-il.

Les conditions météorologiques extrêmes, un défi

Les phénomènes météorologiques extrêmes pourraient toutefois faire grimper les coûts de l'hydroélectricité. « Les fortes pluies entraînent beaucoup de sédiments, qui s'accumulent dans les lacs de retenue », explique Robert Boes. Par sédiments, on entend des galets, des pierres, du gravier, du sable et de la vase. D'une part, ces sédiments peuvent endommager les turbines des centrales électriques et, d'autre part, ils réduisent le volume réellement utilisable des réservoirs. Et comme le réchauffement climatique entraîne le recul des glaciers dans les Alpes, le problème s'aggrave. « Le sol autrefois recouvert de glace s'érode plus fortement, ce qui fait que davantage de sédiments se retrouvent dans les lacs de barrage. » Selon lui, cette évolution a déjà été observée au cours des dix ou vingt dernières années. Il est certes possible de résoudre techniquement le problème de l'envasement des réservoirs, mais cela coûte cher.

De plus, certains des barrages existants pourraient ne plus être en mesure de contenir les masses d'eau croissantes. Ainsi, lors des inondations catastrophiques de 2021 en Allemagne, un barrage près de Swisttal, en Rhénanie-du-Nord-Westphalie, a débordé. Les crues soudaines ont creusé des sillons de près de deux mètres de profondeur dans le barrage. Plusieurs villages situés en aval ont dû être évacués. Les mesures nécessaires en matière de rénovation augmentent à nouveau les coûts d'exploitation. Malgré cela, les barrages artificiels protègent généralement contre les inondations. «Les réservoirs des centrales hydroélectriques ne sont rien d'autre que des bassins de rétention», explique Hans-Josef Fell. «S'ils sont situés de manière décentralisée sur les cours supérieurs des rivières, ils constituent une protection efficace contre les inondations.»

De plus, de tels bassins seraient naturellement utiles non seulement en cas de fortes pluies, mais aussi en période de sécheresse. Et pas seulement pour l'eau à laquelle on pourrait avoir recours. «Lorsque l'on retient de l'eau, le niveau de la nappe phréatique augmente également. Et il y a davantage de formation de rosée dans les environs», explique Hans-Josef Fell. En période de sécheresse, cet effet est bénéfique pour la nature environnante. «Sans barrage, l'eau de pluie s'écoule, tout simplement.» Pour lui, les réservoirs des centrales hydroélectriques ne servent donc pas seulement à protéger contre les inondations, mais aussi à «prévenir les sécheresses». Il pense que les grands barrages joueront un rôle encore plus important dans le cadre du changement climatique. Robert Boes est du même avis; tous deux plaident donc en faveur d'une poursuite du développement de ces installations techniques de gestion de l'eau.

La petite hydraulique

Cela est-il aussi valable pour les petites centrales au fil de l'eau? La Suisse en compte tout de même un peu plus de 2100. Dans notre pays, on entend par petites centrales hydroélectriques toutes les installations d'une puissance inférieure à 10 MW. Cette limite est toutefois arbitraire; dans certains pays, elle est plus élevée, 25 MW en Chine, par exemple, ou plus basse, comme en

Allemagne où elle est fixée à 1 MW. Ici aussi, Hans-Josef Fell ne voit que des avantages. «Les petites centrales hydroélectriques décentralisent l'approvisionnement en énergie et soutiennent les réseaux dans les zones rurales. Elles assurent donc la stabilité du réseau», souligne-t-il. En Suisse, elles ne représentent cependant qu'environ 10 % de l'énergie hydraulique. Il en résulte donc approximativement que «90 % de l'électricité totale produite à partir de l'énergie hydraulique provient d'environ 10 % des installations», déclare Robert Boes. C'est pourquoi il considère les petites installations d'un œil un peu plus critique. «Les répercussions sur l'écologie aquatique sont disproportionnées par rapport à la quantité d'énergie produite.»

Les barrages au fil de l'eau empêchent le cours naturel des rivières. Les spécialistes parlent de fragmentation: le transport des sédiments et des nutriments entre les sections de la rivière en amont et en aval du barrage est fortement perturbé. Les poissons et autres organismes vivants ne peuvent pas non plus toujours traverser facilement les barrages transversaux et atteignent les turbines de la centrale hydroélectrique. Selon une étude menée à l'échelle mondiale par des chercheurs de l'Institut Leibniz d'écologie aquatique et de pêche dans les eaux intérieures (Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei, IGB), en Allemagne, plus d'un cinquième des poissons sont tués, ou du moins blessés de manière potentiellement mortelle, lorsqu'ils passent par une turbine [11].

Études d'impact sur les poissons

Comme la plupart des espèces de poissons d'eau douce doivent migrer sur de moyennes à longues distances pour atteindre les frayères, les habitats des jeunes poissons et les zones d'alimentation, les barrages peuvent mettre ces populations en danger. Outre la fragmentation, l'exploitation flexible des centrales hydroélectriques entraîne parfois des fluctuations inhabituelles et rapides de la quantité d'eau et de sa vitesse d'écoulement. Dans une étude de 2024, une équipe de chercheurs américains est arrivée à la conclusion que ceci a également des effets négatifs sur l'écosystème fluvial, par exemple

parce que les poissons s'échouent ou que l'ensemble de l'habitat est déstabilisé [12].

Une étude menée par une équipe dirigée par Jürgen Geist, professeur de biologie des systèmes aquatiques à la TUM School of Life Sciences de Munich, a montré que même les centrales hydroélectriques modernes, considérées comme respectueuses des poissons, posent problème [13]. Les chercheurs ont mesuré dans les turbines un taux de mortalité allant jusqu'à 44 %. Ce groupe de travail a également pu prouver que les cinq nouvelles installations réalisées en Bavière exercent un impact considérable sur l'écosystème fluvial. Pour leur étude, ils ont examiné non seulement les poissons, mais aussi et surtout les micro-organismes, les plantes aquatiques et la prolifération d'algues [14]. Après leur construction, des différences considérables ont été constatées dans la composition des communautés aquatiques entre les tronçons situés en amont et en aval des installations, et ce, sur tous les sites. Selon Jürgen Geist, la continuité écologique et la connexion entre les différents tronçons de rivière constituent des critères importants pour la santé des systèmes fluviaux.

Hans-Josef Fell critique la méthodologie insuffisante de telles études: «Des poissons d'élevage sont lâchés en masse juste devant les centrales hydroélectriques et sont à nouveau capturés après leur passage forcé à travers l'installation.» On en sait donc un peu plus sur les effets des turbines sur les poissons d'élevage, mais pas sur les populations sauvages. «Les poissons sont capables d'apprendre», dit-il. De plus, la technologie est si développée que les poissons peuvent passer sans danger. À son avis: «À l'exception des très grandes installations, des dispositifs de protection des poissons sont installés partout; des échelles à poissons sont construites, ou des vis d'Archimède lentes sont installées a posteriori à contre-courant, qui transportent les poissons vers le haut comme dans un ascenseur.» Son étude arrive à la conclusion suivante: «Au vu de l'état actuel de la technique, la mortalité des poissons due à l'hydroélectricité est une question négligeable.» Il défend même la position selon laquelle les barrages servent la protection de la nature, car ils permettent par exemple d'élever le niveau des nappes phréatiques et de

préservent les paysages alluviaux et fluviaux. Cela augmente la biodiversité et stabilise la faune et la flore autour des rivières. Les opinions divergent donc.

Ce dernier point peut également être observé dans le cadre d'un nouveau projet chinois pharaonique : sur le cours inférieur du fleuve Brahmapoutre, à l'extrémité orientale du plateau tibétain, la Chine prévoit actuellement de construire une centrale hydroélectrique dont la puissance devrait être trois fois plus élevée que celle du barrage des Trois-Gorges. Elle devrait aider le pays à atteindre la neutralité carbone, comme l'a rapporté le site Spiegel.de à la fin de l'année 2024 [15]. Mais les autorités restent muettes sur les effets de la construction sur l'écosystème local, qui compte parmi les plus riches et les plus diversifiés des hauts plateaux. L'Inde et le Bangladesh ont déjà exprimé leurs préoccupations concernant le barrage, car le projet

pourrait non seulement modifier la faune et la flore, mais aussi le courant et le cours du fleuve.

Références

- [1] Hans-Josef Fell, Heinrich Strössenreuther, « Wasserstrom – der neue Gamechanger für Klimavorsorge, Heimatenergien und Gewässernatur », une étude de l'Energy Watch Group, 2024.
- [2] Rongrong Xu et al., « A global-scale framework for hydropower development incorporating strict environmental constraints », Nature Water, Vol. 1, janvier 2023, p. 113-122, 2023. doi.org/10.1038/s44221-022-00004-1
- [3] de.statista.com/statistik/daten/studie/41998/umfrage/welt-insgesamt-verbrauch-an-wasserkraft-in-millionen-tonnen-oelaequivalent/
- [4] voith.com/corp-de/ueber-voith/maerkte-standorte/afrika/voith-hydro-in-afrika.html
- [5] www.iea.org/reports/climate-impacts-on-african-hydropower/climate-risks-to-african-hydropower#abstract
- [6] Angelo Carlino et al., « Declining cost of renewables and climate change curb the need for African hydropower expansion », Science, Vol. 381, Issue 6658, 11 août 2023. DOI: 10.1126/science.adf5848
- [7] www.t-online.de/nachrichten/ausland/internationale-politik/id_100551066/wasserkrise-um-nil-droht-aegypten-sudan-und-aethiopien-krieg.html
- [8] Erin Zimmerman, « Drought and heat stress California's infrastructure », San José Spotlight, 15 juin 2022.
- [9] « Dürre lässt Amazonas-Nebenfluss austrocknen », tagesschau.de, 5 octobre 2024.
- [10] Luz Adriana Cuartas et al., « Recent Hydrological Droughts in Brazil and Their Impact on Hydropower Generation », Water 14(4), 601, 16 février 2022. doi.org/10.3390/w14040601
- [11] Angelina Tittmann, « Jeder fünfte Fisch stirbt bei der Passage von Wasserkraftturbinen », Medienmitteilung IGB Berlin, 31 janvier 2022.
- [12] B. B. Bozeman et al., « The environmental impact of hydropower: a systematic review of the ecological effects of sub-daily flow variability on riverine fish », Rev Fish Biol Fisheries 35, p. 45-76, 2025. doi.org/10.1007/s11160-024-09909-4
- [13] Josef Knott et al., « Ecological assessment of the world's first shaft hydropower plant », Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 187, 113727, novembre 2023. doi.org/10.1016/j.rser.2023.113727
- [14] Josef Knott et al., « Habitat quality and biological community responses to innovative hydropower plant installations at transverse in-stream structures », Journal of Applied Ecology, Vol. 61, Issue 4, p. 606-620, 26 février 2024. doi.org/10.1111/1365-2664.14593
- [15] www.spiegel.de/wirtschaft/china-startet-bau-des-weltweit-groessten-wasserkraftwerks-a-bd4d872e-6bd6-4b91-a319-c719b669747b



Auteur

Dr. **Janosch Deeg** est physicien et journaliste scientifique indépendant.
→ Deschawi.de, DE-69221 Dossenheim
→ deeg@deschawi.de



Ihr Partner für Energie- und Kraftwerksdienstleistungen



Planung, Projektierung und Realisierung von Wasserkraftwerken



Betriebs- und Geschäftsführung der Wasserkraftwerke



Direktvermarktung und Kraftwerksoptimierung



Energiewirtschaft und Zertifikatehandel

energieuri.ch/kraftwerksbau