

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 115 (2023)
Heft: 3

Artikel: Barrages et centrales photovoltaïques : l'expérience suisse
Autor: Rossetti, Enea / Maggetti, Damodar / Balestra, Andrea
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1050004>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 12.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Barrages et centrales photovoltaïques – L'expérience suisse

Enea Rossetti, Damodar Maggetti, Andrea Balestra

Résumé

De nos jours, la transition énergétique est un thème de plus en plus fréquemment abordé par de nombreux acteurs appartenant à des secteurs variés, qu'il s'agisse d'institutions privées ou gouvernementales. L'objectif principal est généralement de promouvoir la transition des combustibles fossiles vers les sources d'énergie renouvelables. Ce défi est abordé de différentes manières, également en fonction des frontières administratives considérées, et va de solutions plus locales à des solutions continentales et mondiales.

Par exemple, en Suisse, en 2017, les électeurs ont accepté la loi fédérale sur l'énergie révisée (connue sous le nom de Stratégie énergétique 2050). Cette modification favorise la transition énergétique, en posant les bases pour accroître la durabilité et l'efficacité de la production d'énergie.

Dans ce contexte, l'exploitation de l'énergie solaire en tant que ressource renouvelable joue un rôle important. Cependant, les limitations topographiques génériques peuvent représenter une restriction importante pour l'extension de ces installations. Avec un modèle de production qui s'accorde bien avec la flexibilité de l'hydroélectricité, des solutions innovantes, telles que la possibilité de placer des panneaux photovoltaïques (PV) sur la face aval des barrages (photovoltaïque monté sur barrage, DMPV) ou au-dessus de grands réservoirs (photovoltaïque flottant, FPV), peuvent représenter un tournant dans la promotion de la production d'énergie solaire.

Dans cet article, de telles solutions pionnières sont exploitées, avec un regard particulier sur la zone alpine suisse. Les auteurs ont également rapporté quatre exemples d'installation de panneaux photovoltaïques dans cette région géographique, ce qui souligne l'importance et le potentiel de ces solutions pour promouvoir la diffusion de la production d'énergie solaire.

Zusammenfassung

Die Energiewende ist heutzutage ein immer häufigeres Thema, mit dem sich viele Akteure aus unterschiedlichen Sektoren befassen, von privaten bis hin zu staatlichen Institutionen. Im Allgemeinen besteht das Hauptziel darin, den Übergang von fossilen Brennstoffen zu erneuerbaren Energiequellen zu fördern. Diese Herausforderung wird auf vielfältige Weise angegangen, abhängig auch von den jeweiligen Verwaltungsgrenzen, und reicht von vermehrt lokalen über kontinentale bis hin zu globalen Lösungen.

In der Schweiz beispielsweise nahm das Schweizer Elektorat im Jahr 2017 das revidierte Bundesgesetz über die Energieversorgung (bekannt als Energiestrategie 2050) an. Diese Änderung fördert die Energiewende und schafft die Grundlage für eine nachhaltigere und effizientere Energieerzeugung.

In diesem Zusammenhang spielt die Nutzung der Sonnenenergie als erneuerbare Ressource eine wichtige Rolle. Allerdings können die allgemeinen topografischen Beschränkungen eine wichtige Einschränkung für die Ausbreitung solcher Anlagen darstellen. Mit einem Produktionsmuster, das sich gut mit der Flexibilität der Wasserkraft vereinbaren lässt, können innovative Lösungen wie die Möglichkeit, Photovoltaik (PV)-Paneele an der Staumauerluftseite (an Talsperren montierte Photovoltaikanlagen, DMPV) oder auf grossen Stauseen (schwimmende Photovoltaikanlagen, FPV) anzubringen, einen Wendepunkt zur Förderung der Solarenergieerzeugung darstellen.

In diesem Artikel werden solche bahnbrechenden Lösungen mit besonderem Blick auf den Schweizer Alpenraum vorgestellt. Die Autoren berichten auch über vier Beispiele für die Installation von PV-Paneeelen in einer solchen geografischen Region, was die Bedeutung und das Potenzial dieser Lösungen zur Förderung der Verbreitung der Solarenergieproduktion hervorhebt.

1. Introduction

La Suisse, en 2017, a adopté la nouvelle loi sur l'énergie connue sous le nom de Stratégie énergétique 2050 (dans la suite ES2050). Cette loi impose une transition progressive du nucléaire et des énergies fossiles en favorisant les énergies renouvelables. La question se pose donc de remplacer ces vecteurs énergétiques par la construction de nouvelles centrales solaires, éoliennes et hydroélectriques et d'exploiter tout autre mode de production renouvelable.

Il est notamment possible de construire des systèmes photovoltaïques sur presque tous les types de surface, des simples toits et façades de maisons aux grandes zones industrielles, aux parkings, aux autoroutes et aux champs solaires alpins. Les objectifs de la stratégie ES2050 sont très ambitieux et stimulent le progrès technologique et la recherche. Pour le photovoltaïque, l'objectif est de passer d'une production d'énergie de 2,9 TWh/an (2021) à 34 TWh/an à l'avenir. Le nombre d'installations photovoltaïques augmente rapide-

ment, mais de grandes surfaces sont nécessaires pour atteindre les objectifs de la stratégie ES2050. De bonnes opportunités peuvent être trouvées en altitude, où certains aspects avantageux peuvent influencer positivement la production photovoltaïque. Un module solaire en montagne devrait produire plus que le même module en plaine et, surtout, transfère la majeure partie de sa production vers l'hiver (même plus de +50% par rapport à la plaine), qui est la période de l'année où l'on a le plus besoin d'électricité; ces com-



pensations peuvent être réduites avec les systèmes photovoltaïques alpins. Cet effet positif est dû à la réduction du flou de l'air (nuages et brouillard), à une atmosphère moins filtrante, à une plus grande efficacité des panneaux à basse température et à l'effet d'albédo. Ce dernier consiste en une exposition accrue des panneaux due à la réflexion de la neige, ce qui augmente la quantité d'énergie solaire atteignant la surface couverte par les installations.

2. Installations DMPV et FPV

Cet article traite de l'énergie solaire en examinant deux types de systèmes photovoltaïques, avec un accent particulier sur le contexte suisse. Le premier concerne l'installation de panneaux sur les barrages (Dam Mounted Photovoltaics, DMPV), tandis que le second implique la construction de plates-formes flottantes sur les lacs alpins (Floating Photovoltaics, FPV).

En ce qui concerne les installations DMPV, les aspects positifs sont principalement la simplicité de l'installation sur une structure existante et l'impact environnemental réduit, en profitant d'une zone déjà anthropisée. D'un autre côté, il existe certaines limitations, telles que l'exposition au soleil du barrage en fonction de sa position et de son orientation, la pente des parements qui n'est pas très adaptable, et la forme du barrage (courbure).

En raison de la plus grande surface d'installation possible sur le réservoir par rapport à la surface du barrage, les installations FPV ont un potentiel de production d'énergie plus important que les installations DMPV. De plus, l'alignement des systèmes FPV peut être choisi à volonté et n'est pas dicté par le barrage. D'autre part, l'impact d'un système DMPV sur le paysage est plus faible et l'effort d'installation est moins important, ce qui facilite la mise en œuvre.

3. Méthodologie d'évaluation possible du potentiel suisse

Dans le cadre de deux thèses de Master à l'ETH Zurich, une méthode d'évaluation a été développée et le potentiel et l'adéquation des systèmes FPV et DMPV pour 23 des plus grands réservoirs et barrages de la Suisse ont été examinés (Rytz, 2020; Maddalena, 2021). Deux matrices d'évaluation ont été développées, l'une pour les systèmes FPV et l'autre pour les systèmes DMPV, qui ont été divisées en trois catégories principales: «Acceptation», «Énergie et potentiel» et «Économie». La pondéra-

tion a été déterminée à la discréption des auteurs et s'est basée sur des études potentielles sur l'expansion de l'hydroélectricité (Ehrbar et al., 2019; Felix et al., 2020). La production potentielle estimée pour les barrages et réservoirs étudiés varie pour les FPV de 350 à 450 GWh/an et pour les DMPV de 11,5 à 14,5 GWh/an. En appliquant la méthode à toutes les installations de stockage en Suisse, on estime que le potentiel pourrait se situer entre 500–1000 GWh/a pour les FPV et 15–20 GWh/a pour les DMPV (Maddalena et al., 2022).

4. Études de cas

4.1 Installation FPV sur le lac des Toules

Sur le lac des Toules, dans le canton du Valais, un prototype d'installation FPV alpine a été mis en place en 2019. La plateforme, située à 1810 m d'altitude, se compose de 35 éléments flottants portant un réseau de panneaux bifaciaux de 2240 m² et d'une capacité installée de quelque 426 kilowatt-crête (kWc), qui devrait produire environ 800 MWh/an (Romande Energie, 2019).

L'objectif de cette installation, qui précède l'installation à grande échelle, était de vérifier la faisabilité technique et financière du projet. Les essais pilotes réalisés entre 2013 et 2019 ont permis de constater une augmentation de 50% de la production d'électricité par rapport aux niveaux du plateau. À partir de ces données, le rendement annuel a été estimé à 1800 kWh par kWc installé. Le résultat réel a été en moyenne de 1400 kWh, soit une augmentation de seulement 30% (Romande Energie, 2023). Cette différence peut s'expliquer par le fait que la centrale flottante a été conçue pour maximiser la production hivernale avec une plus grande inclinaison des pan-

neaux, au détriment de la production totale d'énergie; pour des raisons techniques, elle était également située plus au sud et donc plus près des montagnes que la structure au sol testée lors des études de faisabilité, ce qui a entraîné un ombrage supplémentaire, conduisant à une perte d'une heure d'ensoleillement par jour environ. En outre, la neige, et plus particulièrement la neige poudreuse, entraînait quelques jours d'arrêt par an et endommageait une dizaine de panneaux photovoltaïques (PV).

Le prototype est actuellement en cours d'adaptation pour empêcher l'accumulation de neige grâce à l'installation de brise-vent. Plusieurs défis techniques ont également été affrontés: il a fallu ancrer le FPV au fond du réservoir, ce qui a permis à la structure de résister théoriquement à des rafales de vent allant jusqu'à 120 km/h, à des couches de glace allant jusqu'à 60 cm et à des températures de -25 à 30 °C.

L'expérience acquise au cours de la phase de prototypage permettra à Romande Energie de développer une installation à grande échelle plus efficace. À l'avenir, cette centrale devrait être agrandie; en effet, l'ambition du développeur est d'ajouter des éléments flottants pour atteindre une production d'environ 22 GWh/an (ce qui devrait être le potentiel maximum disponible pour ce réservoir, c'est-à-dire assez pour 6200 ménages).

4.2 Installation du DMPV sur le barrage de Muttsee

Sur le barrage de Muttsee, dans le canton de Glaris, une centrale DMPV pionnière d'une puissance totale de 2,2 MW a été installée entre 2021 et 2022 par les entreprises Axpo et IWB. Sa production attendue est d'environ 3,3 GWh/an (la demande annuelle de 950 ménages). Cette quantité d'énergie annuelle est produite à 2500 m



Figure 1: Installation pilote FPV sur le lac des Toules (© Romande Energie).



Figure 2: Centrale DMPV sur le barrage de Muttsee
(© AlpinSolar).

d'altitude par environ 5000 panneaux montés sur une surface de barrage d'environ 10000 m². Environ 50% de la production est générée en hiver en raison des conditions favorables dues à l'altitude. Les coûts d'investissement s'élèvent à environ 8 millions de francs suisses (*Heierli, 2022; Maggetti et al, 2023*) et sont principalement liés aux coûts logistiques élevés.

4.3. Installation de DMPV sur le barrage d'Albigna

Un autre exemple peut être trouvé à Albigna, dans le canton des Grisons, où ewz (Elektrizitätswerk der Stadt Zürich) a installé en été 2020 une centrale DMPV sur 670 m de la face amont du barrage pour une capacité de 410 kWc. La centrale, située à 2165 m d'altitude, exploite la réflexion des rayons du soleil sur le lac (en plus de l'incidence directe) pour amplifier la production d'énergie et parvient à équilibrer l'énergie entre l'été et l'hiver, ce qui représente au total environ 500 MWh/an (les besoins annuels de 210 ménages). Le coût d'investissement est d'environ 700 000 CHF (ewz, 2020).

Lors de la construction et de l'exploitation de la centrale, diverses synergies ont été prises en compte:

- Le raccordement au réseau du barrage d'Albigna était déjà en place.



Figure 3: Centrale DMPV sur le barrage d'Albigna (© ewz).



Figure 4: Centrale DMPV sur le barrage de Valle di Lei
(© ewz).

- La plupart des travaux d'installation ont été réalisés par les employés d'ewz, qui ont déjà lancé le projet pilote.
- La disponibilité du propre personnel tout au long de l'année simplifie également les travaux d'entretien.

4.4 Installation de DMPV sur le barrage de Valle di Lei

Très similaire à l'installation d'Albigna, celle du barrage voûte de Valle di Lei, dans les Grisons, provient également d'ewz. Mise en service en septembre 2022, la centrale, également située sur la crête amont du barrage, mesure 550 m de long et se trouve à une altitude légèrement inférieure à 2000 m au-dessus du niveau de la mer, ce qui lui permet d'avoir un rendement accru d'environ 25% par rapport au plateau. La puissance installée de la centrale est de 343 kWc pour une production d'environ 380 MWh/an (consommation annuelle de 110 ménages). Le coût d'investissement est d'environ 800 000 CHF (ewz, 2022).

5. Implications pour la sécurité des barrages - l'expérience de Muttsee

En ce qui concerne la sécurité du barrage de Muttsee, l'autorité de surveillance (sec-

tion des barrages, OFEN) a formulé plusieurs exigences à respecter:

- Stabilité: Vérification de la stabilité en raison des changements de température du béton provoqués par la mise en place des modules solaires. En fait, le mur du barrage subit une distribution de température différente en raison du recouvrement par les panneaux solaires. Une analyse par éléments finis (FE) a permis de prouver que ces changements de température n'entraînent qu'un changement très insignifiant du comportement du barrage sous la forme de déformations supplémentaires du côté de la vallée de <2 mm. Ces déformations supplémentaires mineures n'affectent pas la stabilité globale du barrage.
- Sécurité en cas de crue: Vérification de la sécurité par l'installation des modules solaires dans le déversoir. La distance généreusement choisie entre les panneaux solaires et la crête du déversoir (environ 7 m) permet de garantir le fonctionnement du déversoir et d'éviter toute interférence due aux panneaux solaires.
- Ancrages dans le parement du barrage: Spécification du nombre et de la conception détaillée, des forces maximales introduites ainsi que de la représentation du système d'ancrage de la structure de support. Avec une spécification de l'ancrage utilisé et une profondeur d'ancrage qui n'est pas critique pour la barrière, cette vérification a pu être fournie sans problème.
- Inspection visuelle: Démonstration, à l'aide d'un concept de « walk-on », de la manière dont l'inspection visuelle peut être effectuée rapidement et facilement sous les modules solaires. Une passerelle entre le parement et les panneaux solaires (distance de 1,5 m) permet une inspection visuelle de la surface en béton à tout moment. En outre, les joints des blocs individuels ont été maintenus libres par un espace de 0,5 m entre les blocs des panneaux.



- Équipement de mesure existant:
Preuve que la surveillance du barrage de Muttsee n'est pas affectée par la construction ou l'exploitation de la centrale solaire. Il a été vérifié et prouvé que toutes les visières pour les mesures géodésiques restent libres et que les autres équipements de mesure ne sont pas limités dans leur fonction par la centrale photovoltaïque.

6. Vue d'ensemble et perspectives

6.1 Vue d'ensemble

Le tableau 1 à droite donne une vue d'ensemble des installations FPV/DMPV suisses existantes et établit une comparaison avec une installation de référence du Swiss Plateau sur le toit de la ville de Zurich, calculée à l'aide d'un outil Internet (*Energie Suisse*, 2022).

À titre de comparaison, le coût d'investissement total mondial moyen d'un système FPV en 2018 variait entre 0,8 USD/Wc et 1,2/Wc, en fonction de la taille et de l'emplacement du système. Le CAPEX (dépense d'investissement) des projets FPV à grande échelle mais relativement peu complexes (environ 50 MWc) était compris entre 0,7 et 0,8 USD/Wc aux troisième et quatrième trimestres 2018, en fonction de l'emplacement et du type de modules impliqués (*Groupe de la Banque mondiale, ESMAP et SERIS*. 2019).

6.2 Perspectives

Les objectifs ES2050 de 34 TWh/a à partir du photovoltaïque restent ambitieux, d'autant plus qu'en 2021, le photovoltaïque en Suisse avait une capacité installée d'environ

| PV – Nom de la centrale | Les Toules | AlpinSolar Muttsee | Albigna Solar | Lago di Lei Solar | Référence Centrale photovoltaïque à Zürich |
|---|---|--------------------|---------------|-------------------|--|
| Type | FPV | DMPV | DMPV | DMPV | Toit |
| Mise en service | 2019 | 2022 | 2020 | 2022 | — |
| Altitude [m asl] | 1810 | 2474 | 2165 | 2000 | 500 |
| Surface [m ²] | 2240 | 10000 | | | |
| Capacité [kWc] | Environ 400 | 2184 | 410 | 343 | 150 |
| Production annuelle attendue [MWh/an] | 530 | 3300 | 500 | 380 | 150 |
| Rendement spécifique [kWh/kWc] | 1400 | 1500 | 1200 | 1000 | 1000 |
| Coût de l'investissement [millions CHF] | Projet pilote, non directement comparable | Environ 8 | 0,7 | 0,8 | 0,2 |
| Coût spécifique [CHF/Wc] | | 3,70 | 1,70 | 2,30 | 1,40 |

Tableau 1: Vue d'ensemble des installations FPV et DMPV suisses.

ron 3,6 GW qui produisait 2,9 TWh. En 29 ans, la production actuelle aurait donc plus que déculpé. Cependant, une tendance très positive pour le secteur photovoltaïque se dessine à partir de 2019, puisque chaque année la puissance installée a augmenté d'environ 40% par rapport à l'année précédente (+43% entre 2020 et 2021).

L'ES2050 pose plusieurs défis technologiques qui ne peuvent être relevés que par des solutions interdisciplinaires. Parmi celles-ci, l'énergie solaire jouera un rôle clé, et les installations dans les contextes alpins se révèlent intéressantes et de plus en plus compétitives. L'installation de panneaux photovoltaïques sur les barrages et les réservoirs correspondants est une solution à envisager, notamment en raison de l'impact réduit sur le paysage, de la rapidité d'installation et de déploiement (en particulier pour les DMPV) et de la possibilité d'équilibrer la production entre l'été et l'hiver.

Les DMPV seront probablement l'exception, mais les centrales hydroélectriques ont un potentiel considérable pour l'hybridation avec nouvelles installations photovoltaïques alpines en raison de leur infrastructure existante.

Une méthodologie a été proposée pour évaluer l'adéquation des deux variantes photovoltaïques discutées en Suisse et le potentiel a été évalué. Des analyses multicritères approfondies devraient permettre d'identifier les meilleures alternatives et de poursuivre la démarche.

Il existe des cas d'école en Suisse et des leçons utiles peuvent déjà être tirées pour d'autres installations.

Remerciements

Les auteurs remercient *Rico Senti*, d'*Axpo Power AG*, pour sa contribution concernant la sécurité du barrage de Muttsee.

Références:

- Ehrbar, D.; Schmocke, L.; Vetsch, D.; Boes, R. (2019). Wasserkraftpotenzial in Gletscherrückzugsgebieten der Schweiz. *Wasser Energie Luft* 111(4): 205–212.
- Suisse énergétique (2022). Simulation von Energiesystemen mit dem Tachion-Simulation-Framework, Benutzerdokumentation, Oktober 2022. Disponible à l'adresse (consulté le 29 mai, 2023).
- ÖFEV (2022) Stratégie énergétique 2050. Disponible à l'adresse : www.uvek.admin.ch/uvek/en/home/energy/energy-strategy-2050.html (consulté le 26 mai, 2023).
- Ewz (2020), Albigna Solar – Erste hochalpine Solar-Grossanlage, Factsheet, disponible à l'adresse : www.ewz.ch/de/ueber-ewz/newsroom/medienmitteilungen/Solar-Albigna-produziert-ab-September.html (consulté le 29 mai, 2023).
- Ewz (2022), Lago di Lei Solar – Hochalpine Solargrossanlage auf der Staumauer Valle di Lei, Factsheet, disponible à l'adresse : www.ewz.ch/de/ueber-ewz/newsroom/medienmitteilungen/LagodiLei-Solar.html (consulté le 29 mai, 2023).
- Felix, D., Müller-Hagmann, M., Boes, R. (2020) Ausbaupotential der bestehenden Speicherseen in der Schweiz; *Wasser Energie Luft* 112(1): 1–10.
- Heierli, C., 2022, A new Swiss partnership. *Waterpower Magazine*, novembre 2022: 16–17.
- Romande Energie (2019). Le premier parc solaire flottant en milieu alpin est en service; Communiqué de presse du 16.12.2019, Disponible sur: <https://www.solaireflottant-lestoules.ch/> (consulté le 29 mai, 2023).
- Romande Energie (2023). First ever high-altitude solar farm delivers initial findings; Press release 27.04.2023, disponible sur: <https://www.solaireflottant-lestoules.ch/> (consulté le 29 mai, 2023).
- Rytz, S. (2021). Photovoltaics and hydropower reservoirs in Switzerland – Synergies and potential. Mémoire de master, Laboratoire d'hydraulique, d'hydrologie et de glaciologie (VAW), ETH Zürich.
- World Bank Group, ESMAP and SERIS. 2019. Where Sun Meets Water: Floating Solar Handbook for Practitioners. Washington, DC : Banque mondiale. Disponible à l'adresse : www.worldbank.org/en/topic/energy/publication/where-sun-meets-water (consulté le 29 mai, 2023).
- Maggetti, D., Maugliani, F., Korell, A., Balestra, A., (2023). Photovoltaic on dams – Engineering challenges. Proc. ICOLD European Club Symposium «Role of dams and reservoirs in a successful energy transition» (Boes, R.M., Droz, P. & Leroy, R., eds.), Taylor & Francis, London.

Auteurs:

- Enea Rossetti, Lombardi Engineering Ltd, Suisse
 Damodar Maggetti, Lombardi Engineering Ltd, Suisse
 Andrea Balestra, Lombardi Engineering Ltd, Suisse

