

Quand le solaire se met à flotter

Retour d'expérience après 4 ans d'exploitation de la première centrale photovoltaïque flottante en milieu alpin et perspectives d'avenir



Sommaire



01

Pourquoi faire une installation solaire sur l'eau ?

02

Une centrale solaire flottante en montagne, quel intérêt ?

03

A quoi le démonstrateur sur le lac des Toules ressemble-t-il ?

04

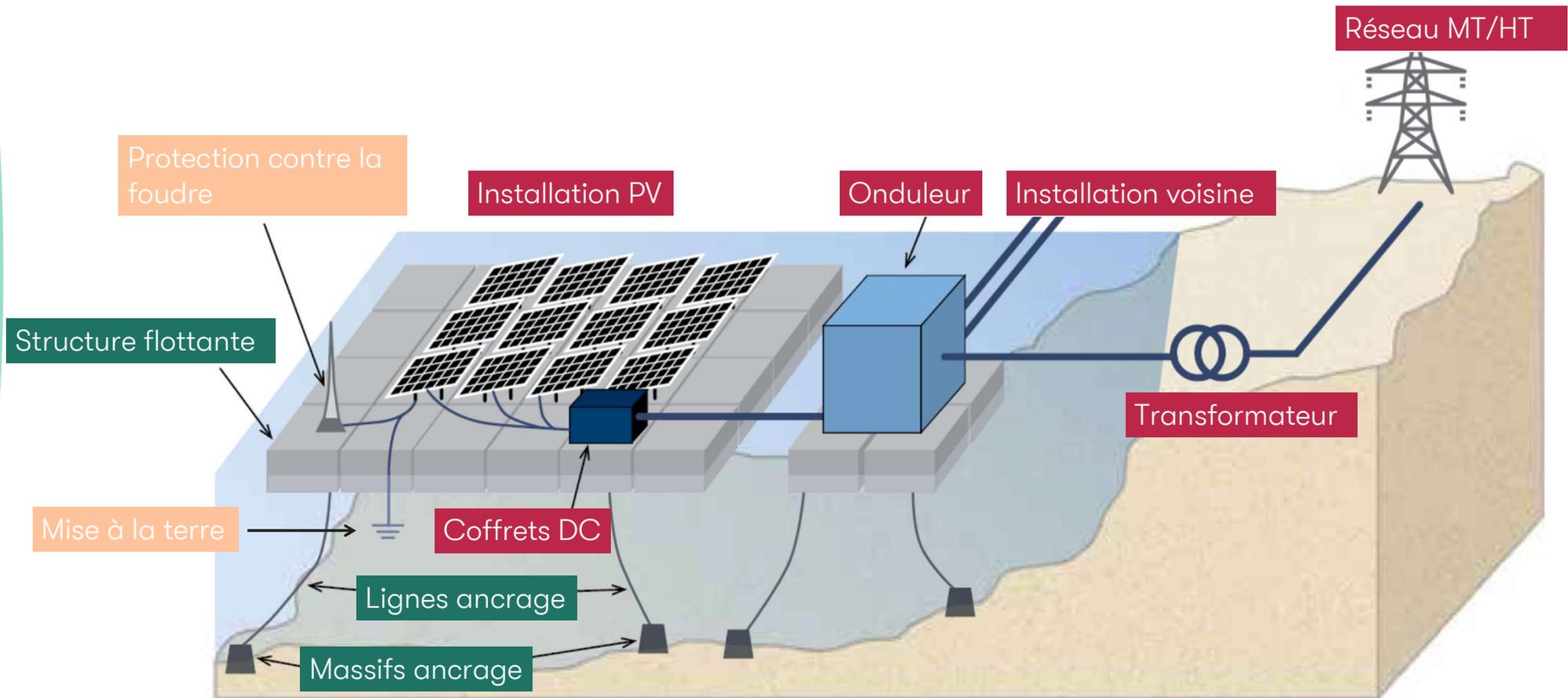
Quels sont les apprentissages du démonstrateur ?

05

Et l'avenir ?

**Pourquoi faire une installation
solaire sur l'eau ?**

Principe d'une centrale PV sur l'eau



Source: SERIS

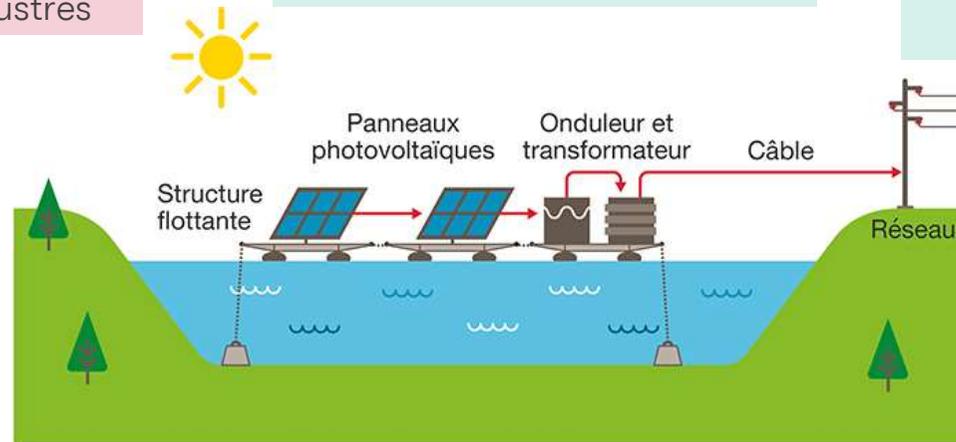
Les avantages/inconvénients du solaire flottant

Fientes d'oiseaux lacustres

Diminution de l'évaporation d'eau

Installations électriques MT* disponibles à proximité

Pas de conflit d'utilisation du sol (agriculture, constructions, forêts, ...)

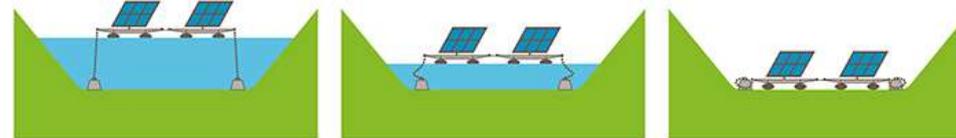


Sécurité des équipements électriques sur l'eau

Effet refroidissant de l'eau

Eau de nettoyage à disposition

Diminution du développement d'algues



Conception complexe des ancrages

Diminution luminosité sous l'eau = potentiels effets sur la biodiversité

Durée d'installation réduite

Maintenance des constructions au fond du lac

Peu ou pas de préparation du sol

* MT = moyenne tension

Comparaison entre les installations PV



	PV grandes toitures	PV sol	PV flottant
Taille installation	0.1 .. 5 MWc	5 .. 300 MWc	Limité par taille plan d'eau
Coût de construction	0.75 .. 1.40 EUR/Wc ²	0.53 .. 0.80 EUR/Wc ²	50 MWc → 0.8 .. 1.2 USD/Wc ¹
LCOE	5.5 .. 8.2 ctEUR/kWh ²	3.9 .. 5.0 ctEUR/kWh ²	50 MWc → 5.6 ctUSD/kWh ¹
Principales contraintes	Sécurité travail en hauteur Étanchéité toiture	Qualité mécanique du sol Raccordement électrique	Vent Ancrages Fatigue dans câbles Câblage sur l'eau et exposition UV
Maintenance	Sécurité travail en hauteur Accessibilité	Sans difficultés particulières	Accessibilité sur l'eau
Evacuation de l'énergie	Consommation locale (partielle)	Consommation locale ou réseau MT/HT	Réseau MT/HT Pompage-turbinage

¹ World Bank, «Where Sun Meets Water», 2018

² Fraunhofer ISE, Levelized cost of electricity, 06.2021

Solaire flottant dans le monde

Principales réalisations:

- 2007: 1^{ère} installation au Japon (prototype de 20kWc)
- 2008: 1^{ère} installation commerciale aux USA (175kWc)
- 2017: 1^{ère} installation sur un lac de barrage hydroélectrique (Alta Rabagao, Portugal, 220kWc)
- 2019: 1^{ère} installation en milieu alpin (Toules, 448kWc)
- 2022: 1^{ère} installation offshore en Corée du Sud (500kWc)
- 2022: Projet en développement en Corée du sud d'une installation de 2.1GWc

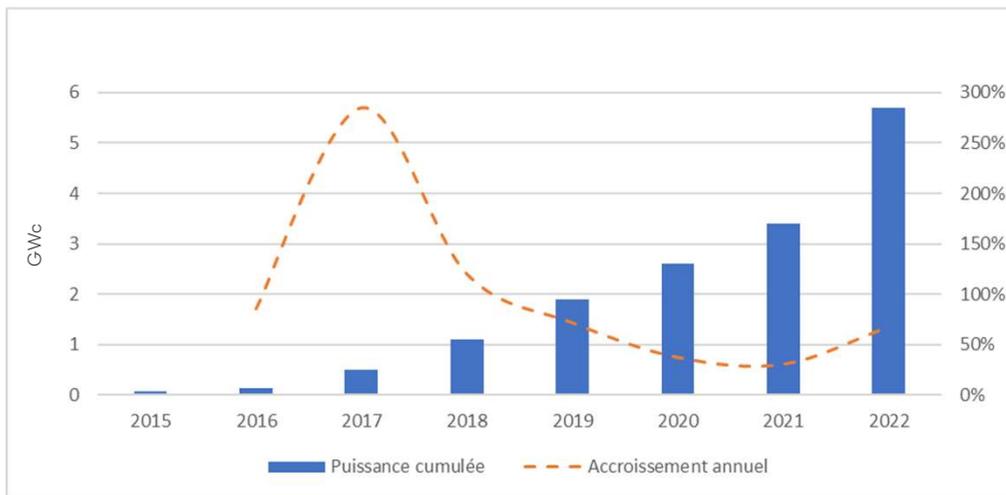
- 2022: Selon SolarPower Europe, la **puissance cumulée des installations FPV dans le monde atteint 5.7GWc**

- La majorité des grandes installations se situent en Asie du sud-est (Chine, Inde, Corée du sud, Japon, Malaisie, Vietnam)

- Axes de développements principaux:
 - Installations offshore, combinaison avec éolien offshore et centrale houlomotrice, production H₂
 - Installations sur des bassins d'eaux agressives
 - Développement de systèmes de tracking mono- et multi-axe

Solaire flottant dans le monde

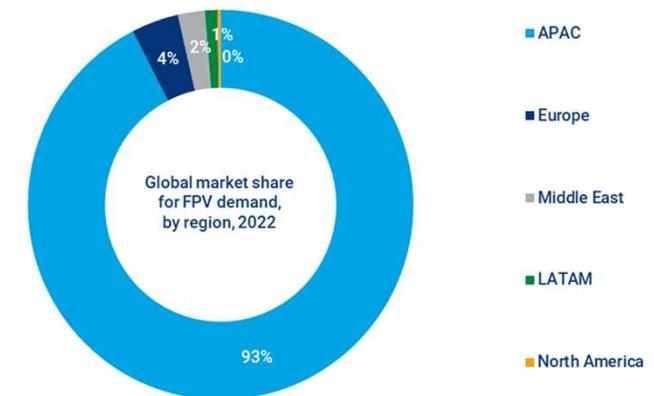
Déploiement du solaire flottant dans le monde



Source: SolarPower Europe

Répartition géographique dans le monde

Asia Pacific dominates floating solar installations in 2022



Source: Wood Mackenzie

Solaire flottant dans le monde



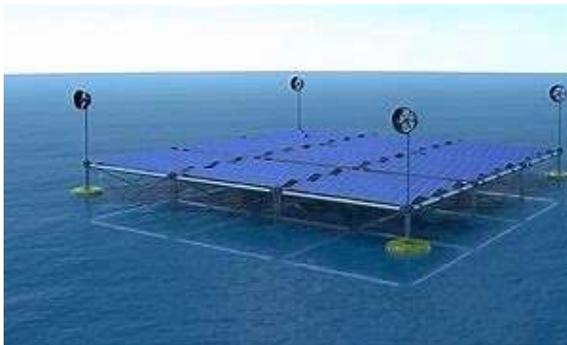
© Oceansun



© Ciel&Terre



FPV Dezhou, Chine, 320MWc (Sungrow)



© Sinpower



© Zimmermann



FPV Hapcheon, Corée du Sud, 41MWc

**Une centrale solaire flottante en
montagne, quel intérêt ?**

Contraintes principales

L'environnement alpin est plus exigeant:

- Plus de vent, rafales plus intenses
- Neige et glace
- Dangers naturels (avalanches, laves torrentielles, torrents alpins, chutes de bloc, orages, crues, ...)
- Accessibilité en période hivernale limitée (construction et exploitation)

Cumulé aux complexités d'un aménagement hydroélectrique:

- Cycle de remplissage (essentiellement stockage saisonnier)
- Importantes variations du niveau d'eau, vidange pour maintenance
- Transport sédimentaire
- Impacts sur la production hydroélectrique
- Sécurité de l'ouvrage d'accumulation à garantir



Avantages principaux

En plus des avantages déjà cités pour des installations solaires flottantes, on peut mentionner:

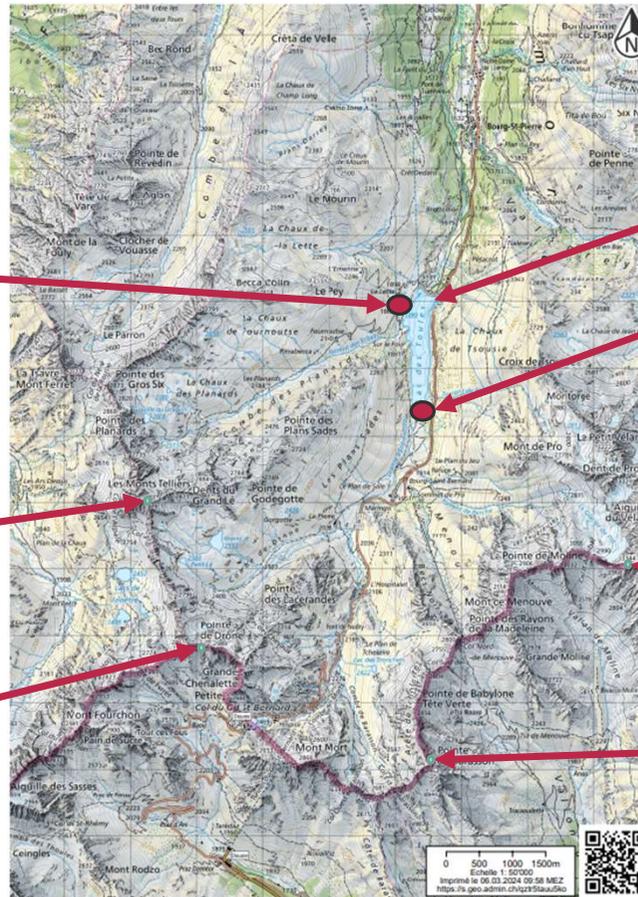
- Surface à faible potentiel écologique, absence d'écosystèmes de valeur
- Site préalablement artificialisé, pas de perte d'espaces naturels
- Accessibilité au site
- Disponibilité du réseau électrique
- Disponibilité d'une grande surface sans concurrence (agriculture, forêt, construction, ...)
- Synergies pour la surveillance et la maintenance de l'installation par l'exploitant de l'aménagement hydro-électrique

La production solaire en montagne est plus élevée qu'en plaine:

- Moins d'atmosphère et pollution, meilleure irradiance
- Température plus faible
- Exploitation de l'effet d'albedo, surtout en hiver et/ou lorsque la structure est échouée



Localisation des installations aux Toules



Structure pilote – installation à terre

Barrage des Toules (1810m)

Démonstrateur – installation solaire flottante

Les monts Telliers (2951m)

Aiguilles du Déjeuner (3344m)
S'étendant à l'est jusqu'à 3700 m d'altitude

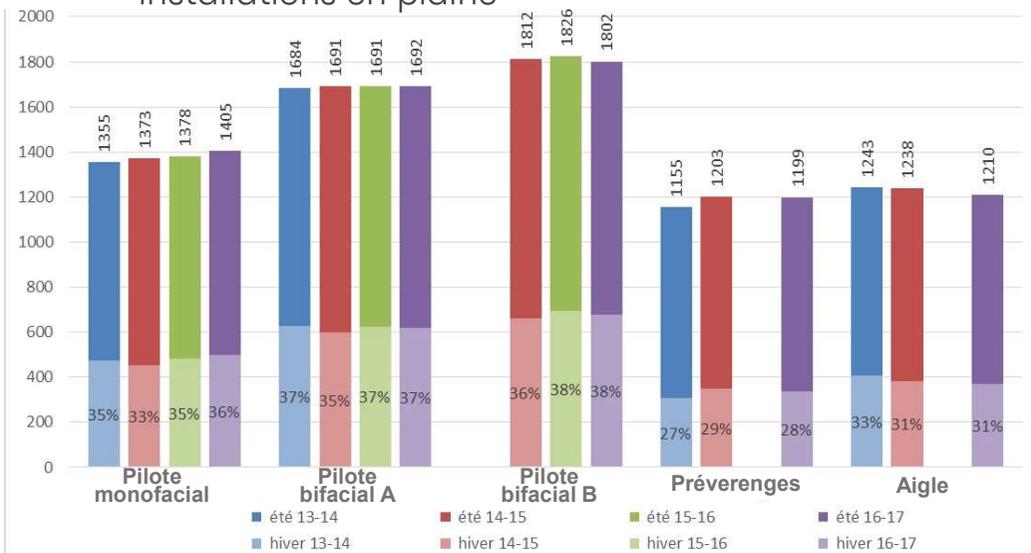
Pointe de Drône (2949m)

Pointe de Barasson (2962m)

Installation pilote

Construction dès 2013 d'une structure pilote au-dessus du barrage des Toules, dont les résultats principaux sont:

- Productible annuel mesuré >1800 kWh/kWc, \cong +50% par rapport aux stations en plaine
- Inclinaison à 30° = meilleur compromis entre capacité d'auto-déneigement et productible annuel
- Mise en évidence du bénéfice des modules bifaciaux sur l'auto-déneigement
- Aucun vieillissement accéléré par rapport aux installations en plaine



25 modules

3 inclinaisons

Mesure d'irradiance et température

Evaluation du lien entre inclinaison, production PV et évacuation de la neige

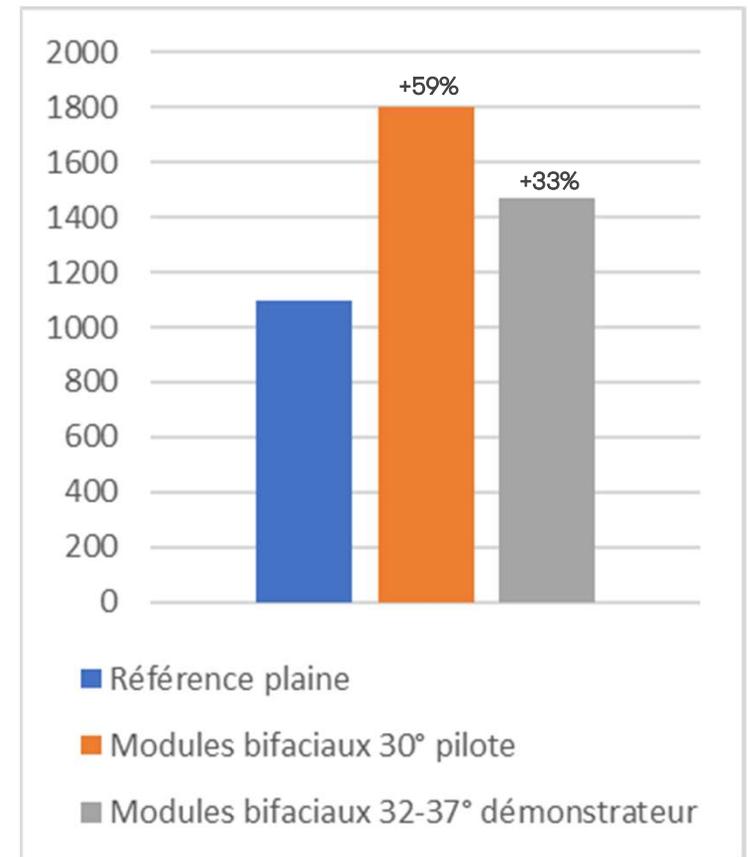
Simulations production du démonstrateur

Avant la construction du démonstrateur, des simulations PVsyst ont été réalisées, afin d'identifier les différences entre les deux emplacements.

Entre autre, ont été considérés:

- Ombrage lointain (-6.8%) et ombrage proche (-5.0%);
- Albedo (-4.0%), dû aux mois durant lesquels le démonstrateur est sur l'eau;
- Absence d'optimiseurs sur le démonstrateur

→ Productible escompté pour le démonstrateur de 1'470 kWh/kWc

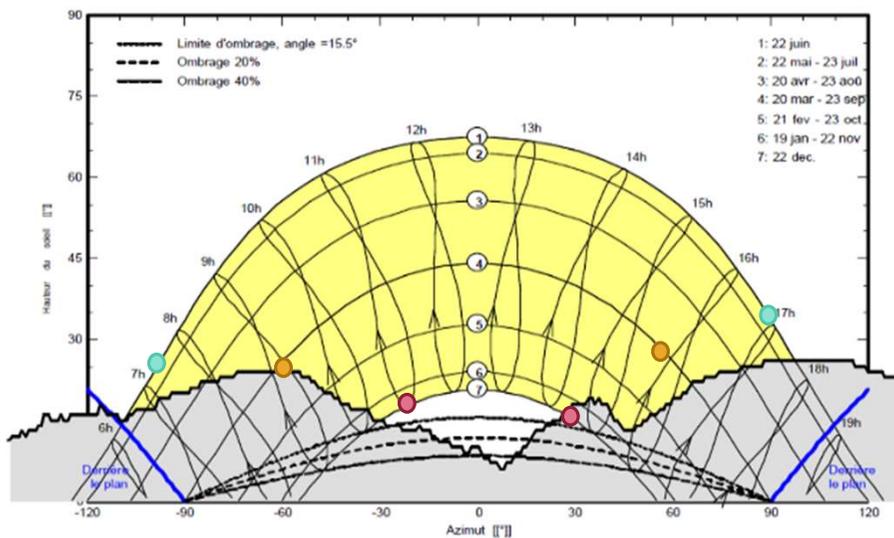


Productible escompté pour le démonstrateur

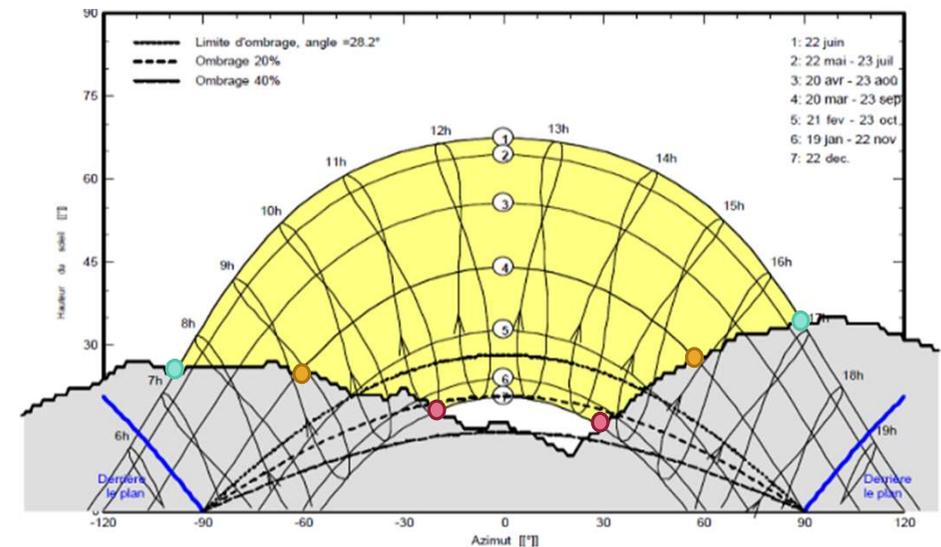
Simulation de l'impact de l'ombrage

- Le démonstrateur est situé 2km plus au sud, plus proche de la montagne, réduisant l'ensoleillement d'environ 40min par jour
- Il est échoué entre janvier et avril, réduisant le tilt de 37° à 32°
- Réduction des espaces inter-rangées (pitch) de 3m sur la structure pilote à 1.94m sur le démonstrateur

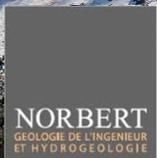
Horizon lointain du **pilote**



Horizon lointain du **démonstrateur**

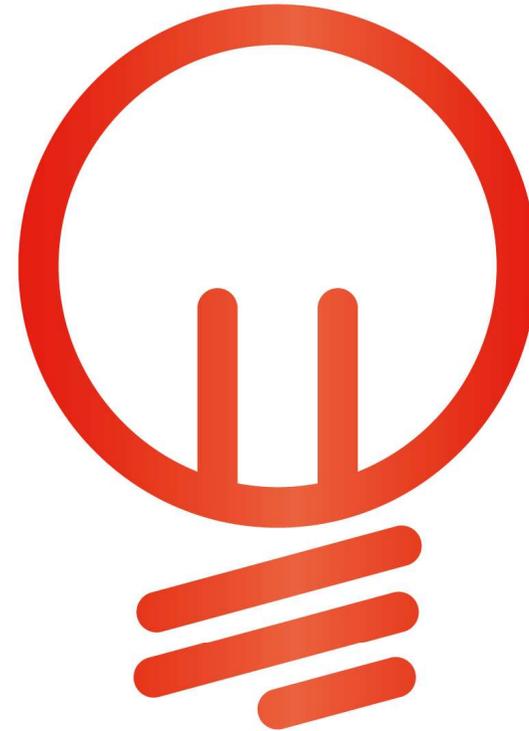


**Il ressemble à quoi le démonstrateur
sur le lac des Toules ?**



LAURÉAT DU

**watt
d'or
2021**



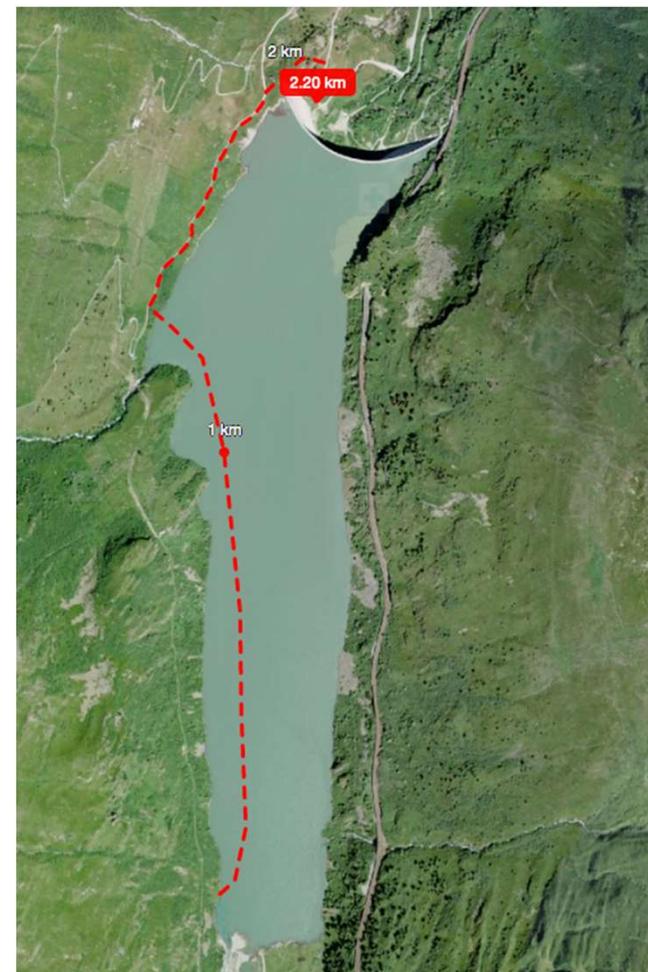
LA DISTINCTION POUR LES MEILLEURES PERFORMANCES
ÉNERGÉTIQUES SOUS L'ÉGIDE DE L'OFFICE FÉDÉRAL DE
L'ÉNERGIE

Caractéristiques principales

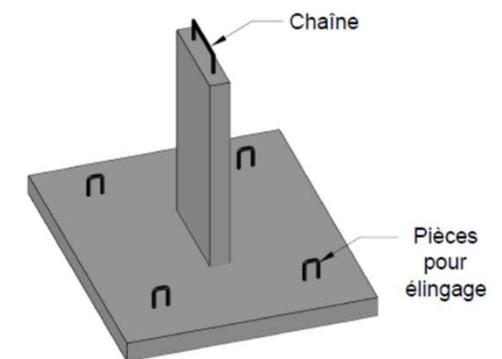
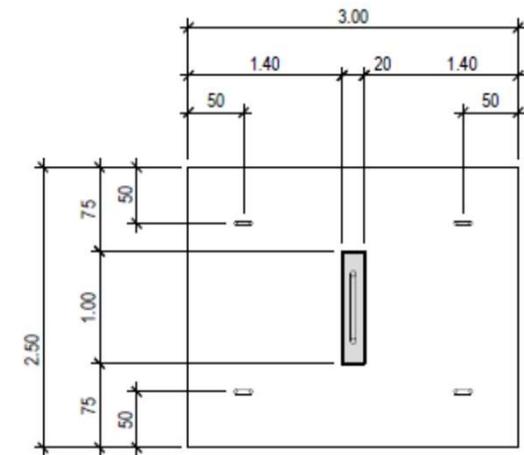
- 35 structures flottantes, supportant chacune 40 modules PV bifaciaux de 320Wc, sans cadre
- 1 plateforme flottante pour les installations électriques, avec 3 onduleurs 175kW, 1 transformateur 0.8/20kV 630 kVA) et 1 station météo

- Surface totale: 2'240 m² (panneaux PV) / 6'100 m² (installation flottante)
- Marnage: max. 17 m
- Puissance installée: 448 kWc
- Production annuelle: 630 MWh (250 ménages)
dont 40% durant le semestre d'hiver, selon exigence VS
- Tilt: 37° en flottant, 32° en échoué
- Pitch: 1.95m (compromis entre ombrage proche et coût de structure)
- Terrasse d'échouage: Création d'une plateforme d'environ 7'500m²
Pente longitudinale de la plateforme de 5°
- Ancrage: 32 corps-mort enfouis en périphérie de la plateforme

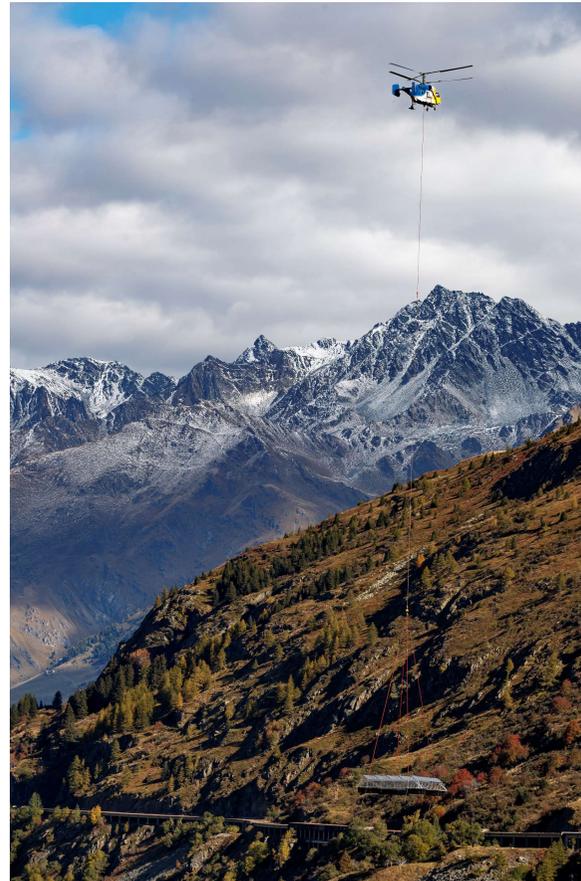
Raccordement électrique



Plateforme d'échouage et massif d'ancrage



Montage et mise en place du démonstrateur



**Quels sont les apprentissages du
démonstrateur ?**

Productible démonstrateur

+29% → 1'420 kWh/kWc

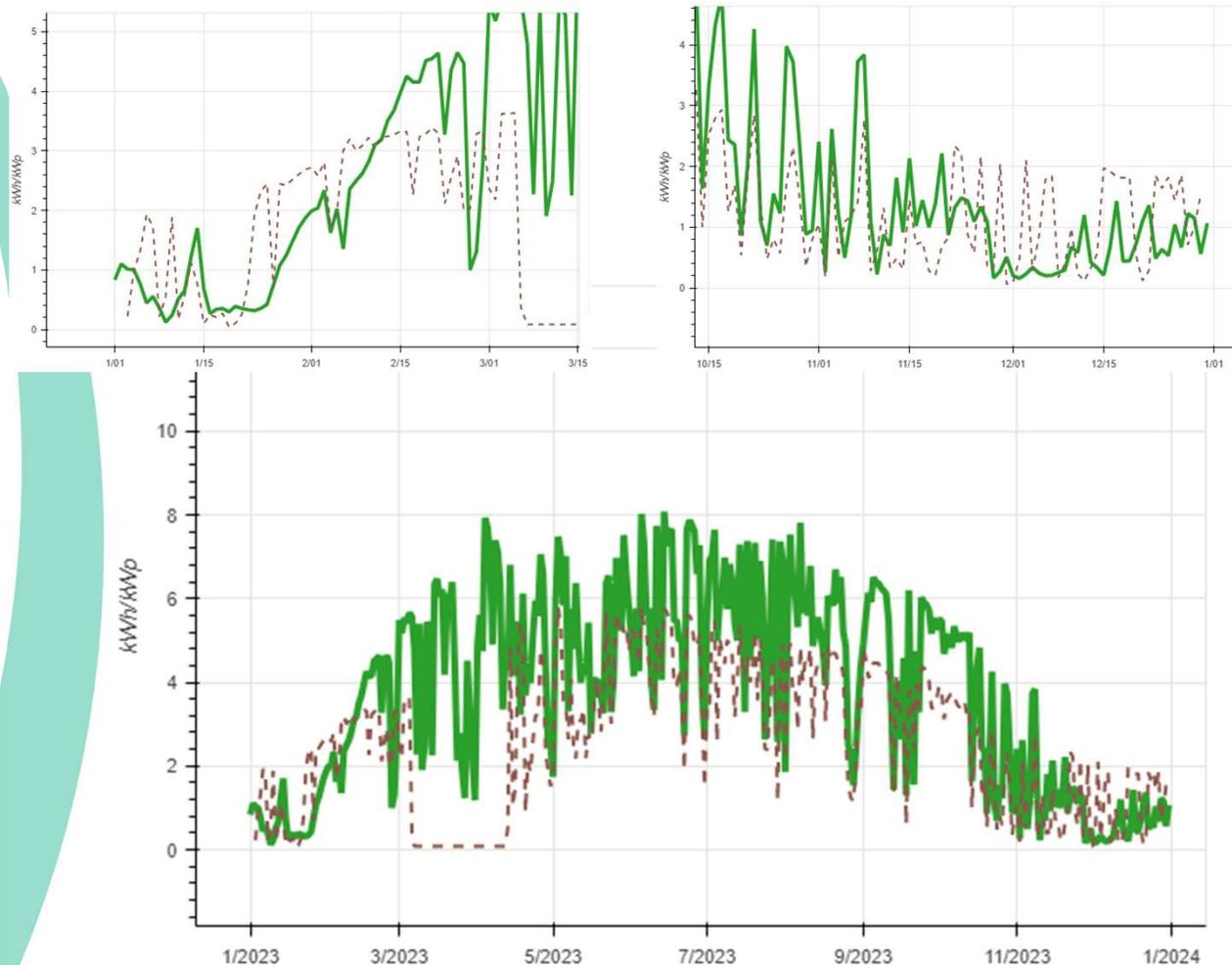
Accroissement du productible par rapport aux station de référence en plaine
soit 3.5% de moins que les projections basées sur le pilote (prévu 1'470 kWh/kWc).

Courbes de production PV

Comparaison entre la production
aux Toules (2023: 1'389 kWh/kWc) et
à Aigle (2023: 1'060 kWh/kWc)

→ +31%

Janvier et décembre impacté par
des chutes de neiges.



Analyse de la production

Principales différences entre les simulations et le réel:

- Persistance de neige sur les modules, en particulier autour du solstice (-1.5% à -4%)
- Formation de congères → dégâts sur les modules (-3% à -4%)

Période	Quantité de neige fraîche cumulée [cm]	Indisponibilité des modules du démonstrateur [jours]	Indisponibilité des modules du pilote [jours]
2019 – 2020	150	19	4
2020 – 2021	420	44	16
2021 – 2022	325	34	8

Pertes liées à la neige

Enneigement

Même avec une faible irradiation, l'évacuation de la neige fonctionne comme prévu.



30.03.2020, 9h10



30.03.2020, 10h30



30.03.2020, 11h10

Congères

Certaines zones préférentielles sont soumises à d'importants dépôts de neige soufflée.



07.03.2020



19.03.2020



Basculement d'un module dû à une surcharge de neige soufflée

Divers constats structurels

Plateforme d'échouage

- Erosions internes dues aux infiltrations d'eaux de surface
- Perte d'appuis sous les plateformes flottantes induits des efforts importants dans la structure alu

Système d'ancrage

- Concept nécessitant une très grande surface
- Inadapté pour une hauteur de marnage au-delà de 20m

Mise à la terre

- Variation entre états flottants et échoués
- Mouvements dans la glace → arrachement de composants pour la mise à terre

Affluents

- Nécessite une conception robuste des berges des affluents
- Gestion des crues à lac vide (fonte des neiges) et transport sédimentaire



Autres développements en cours

PV

- Tests en cours avec optimiseurs
- Essais prévu pour intégrer un onduleur mono-MPPT
- Recâblage des strings pour éviter le mismatch MPP

Structure

- Etude d'un système de tracking → mise en sécurité des modules en cas de vent, déneigement, optimisation de l'exposition
- Etude du déplacement de l'installation → libérer la surface en vue du projet d'extension
- Test d'efficacité d'une barrière anti-congères

Et l'avenir ?

Potentiel solaire flottant en Suisse

En 2022, la VAW de l'ETHZ (laboratoire hydraulique, hydrologie et glaciologie) a mené une étude de potentiel sur les installations solaires flottantes en Suisse, sur les lacs de barrages alpin. Sous réserves de certaines hypothèses (restriction sur l'échouage, raccordement au réseau MT), le potentiel a été évalué à

370 à 490 GWh/an

Romande Energie a également procédé à une analyse de potentiel sur 25 lacs d'accumulations. Parmi ceux-ci, 11 présentent une faisabilité économique favorable, pour un potentiel théorique:

500 à 550 GWh/an

360 à 400 MWc

Contexte légal

Lors de la session d'automne 2022, en prévision d'une crise énergétique hivernale, le parlement fédéral a mis en vigueur une loi urgente visant à produire rapidement de l'énergie hivernale (art.71a LEne). En résumé, l'article prévoit:

- Nécessité démontrée, intérêt national et implantation imposée par leur destination;
- Suppression de l'obligation d'aménager le territoire;
- **Mise en service partielle d'ici à la fin de l'année 2025 (10% de la production attendue);**
- Mise en service complète au plus tard d'ici à la fin de l'année 2030;
- Production minimale annuelle de 10GWh
- **Productible hivernal minimal de 500kWh/kWc (entre début octobre et fin mars);**
- L'installation doit être complètement démantelée lors de la mise hors service.

→ Si ces conditions sont respectées, l'installation peut être subventionnée par la Confédération à hauteur de **maximum 60% des coûts non-couverts**.

Une **étude d'impact environnemental (EIE)** reste néanmoins obligatoire pour de telles installations. Elles ne peuvent être érigées dans des marais, biotopes d'importance nationale et réserves d'oiseaux migrateurs.

Projet d'extension lac des Toules

Depuis 2019, Romande Energie étudie un projet d'extension sur le lac des Toules, basé sur les retours d'expériences acquis. La structure flottante a été totalement revue, aussi eu égard aux contraintes légales.

A ce stade, l'installation prévue se caractérise ainsi:

- Puissance installée: 13.5MWc
- Production annuelle: 20.9GWh
- Production hivernale: 8.3GWh
- Durée de vie: 60 ans, avec repowering PV à 30 ans
- Développement d'un système de tracking pour la mise en sécurité de l'installation en cas de tempête

Procédure d'approbation

Le projet d'extension a été mis en circulation préliminaire auprès du Canton du Valais:

- L'ensemble des services du Canton a émis un préavis favorable;
- La population de la Commune de Bourg-St-Pierre a accepté le projet à l'unanimité;
- Les associations environnementales, pour autant que le projet soit équilibré, soutiennent cette extension;
- L'OFEN, section surveillance des barrages, n'est aujourd'hui pas en mesure d'émettre de préavis positif, en l'absence de base technique et de retour d'expérience international. La durée nécessaire à l'établissement de cette base technique a été estimée par l'OFEN entre 2 et 3 ans.

→ Le projet est actuellement bloqué, en attente de la base technique à établir par l'OFEN

Informations complémentaires

L'installation pilote au-dessus du barrage tout comme le démonstrateur ont fait l'objet d'études publiées par l'OFEN. Pour plus d'information:

PValps – Performances de modules photovoltaïques en haute altitude après 5 ans (Planair, 2018)

<https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=50395&Load=true>

Centrale photovoltaïque flottante de démonstration au lac de barrage des Toules (Romande Energie, 2023)

<https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=70270&Load=true>

Merci de votre attention



Andy Kaufmann

Resp. de projet énergies renouvelables

andy.kaufmann@romande-energie.ch

+41 79 436 34 99