

Photovoltaïque

Adaptation de la publication :

Nobre R., Boulêtreau S., Colas F., Azemar F., Tudesque L., Parthuisot N., Favriou P., Cucherousset J. (2023). Potential ecological impacts of floating photovoltaics on lake biodiversity and ecosystem functioning. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 188:113851.

N°56

● Introduction	2
● Effets du PVF induits par la réduction de la lumière incidente	4
● Impact du PVF induit par une modification de la température de l'eau	5
● Effets du PVF induits par l'altération du vent à la surface	7
● Interactions entre effets thermiques, lumineux et du vent	8
● Implications du PVF des gènes à l'échelle des méta-socio-écosystèmes	12
● Le rôle de la structure physique du PVF	12
● Conclusions	13

flottant : quels impacts potentiels sur la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes lacustres ?

La nécessité d'atténuer les effets du changement climatique accélère le développement de nouvelles technologies telles que le photovoltaïque flottant (PVF). Il est primordial de s'assurer que ce développement ne cause pas d'impacts écologiques négatifs inattendus. Le PVF pourrait, en effet, affecter les écosystèmes lacustres, en altérant la pénétration de la lumière et du vent à la surface du lac et en modifiant la température de l'eau. Malgré un déploiement du PVF en expansion à l'échelle du globe, et alors que les études relatives à la conception et aux performances des panneaux photovoltaïques flottants se multiplient, notre compréhension de leurs impacts écologiques reste limitée. Ce document présente une synthèse des impacts potentiels du PVF sur la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes lacustres, fondée sur les concepts d'écologie théorique et les résultats de la littérature existante sur les effets de la lumière, de la température et du vent. À ce jour, les travaux de modélisation prédisent une réduction de l'arrivée de la lumière, de la vitesse du vent et de la température de l'eau avec l'augmentation de la surface de recouvrement par les panneaux. Les changements de lumière et de température de l'eau sont susceptibles d'altérer les taux métaboliques individuels (par exemple, photosynthétique) et d'affecter la production primaire et le transfert d'énergie au sein des chaînes trophiques des lacs équipés. Le PVF modifie probablement aussi le fonctionnement thermique et l'oxygénation de la colonne d'eau et fournit de nouveaux habitats, artificiels, pour les organismes. Ces modifications pourraient non seulement affecter le comportement individuel et l'histoire de vie des organismes (comme, par exemple, leur phénologie ou leur capacité de dispersion), mais aussi la composition des communautés végétales et animales, les interactions trophiques, le métabolisme et l'équilibre des gaz à effet de serre au sein des lacs. À plus large échelle, le déploiement du PVF pourrait perturber les activités socio-économiques associées aux usages des lacs (comme les loisirs de randonnée ou de pêche) et affecter les pressions humaines qui s'exercent à l'échelle des méta-écosystèmes. Nous prévoyons des impacts écologiques du PVF très largement contextuels, variables selon les conditions environnementales et le contexte industriel, comme le taux de recouvrement ou le type de panneaux installés. Le déploiement rapide de cette technologie et ses implications écologiques et socio-économiques potentielles exigent une évaluation empirique urgente de ses impacts, fondée sur des designs expérimentaux robustes.

Introduction

Causé par les émissions de gaz à effet de serre, le changement climatique impacte fortement la biodiversité et les écosystèmes terrestres, avec des conséquences critiques pour la vie humaine. Le secteur de l'énergie (électricité, chauffage, et transport) est à lui seul responsable de 75 % des émissions de gaz à effet de serre¹. La demande énergétique accrue, couplée à l'urgence d'atténuer le changement climatique, accélèrent le développement des énergies renouvelables². Les stratégies d'atténuation basées sur le développement des énergies renouvelables peuvent néanmoins avoir des impacts contreproductifs sur la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes³. En cela, le déploiement des énergies renouvelables soulèverait un défi. Une de ces stratégies consiste à utiliser l'énergie photovoltaïque (PV). Grâce aux avancées technologiques et aux réductions de coûts qui favorisent l'exploration de solutions innovantes, l'industrie du PV évolue rapidement. Les systèmes photovoltaïques flottants (PVF), réseaux de panneaux photovoltaïques disposés sur des supports flottants, le plus souvent à la surface de masses d'eau artificielles (réservoirs, lacs de barrage, gravières, mares), constituent une solution prometteuse pour le secteur du PV.

Avec plus de 643 aménagements fonctionnels et de très nombreux projets à venir, le marché du PVF se développe largement sur le globe⁴, notamment en

1 - Ritchie & Roser, 2020.

2 - Olabi & Abdelkareem, 2022.

3 - Gibson, Wilman & Laurance, 2017.

4 - Nobre *et al.*, 2024.

Asie, Australie et Europe. Plusieurs avantages motivent l'installation de centrales flottantes en sus des centrales-terrestres : l'occupation de surfaces aquatiques diminue la pression foncière sur les terres agricoles déjà utilisées pour la production de nourriture ; le refroidissement par l'eau assure un gain de performance du flottant par rapport au terrestre⁵. Les bénéfices écologiques du PVF pourraient cependant être contrebalancés par des impacts écologiques négatifs sur les écosystèmes d'eau douce équipés.

Les écosystèmes d'eau douce rendent de nombreux services aux sociétés. Ils ont une valeur utilitaire, comme l'approvisionnement en eau potable et l'installation de pêcheries par exemple. Ils jouent également un rôle inestimable dans la régulation du climat, le maintien de la biodiversité, ainsi qu'un rôle culturel en lien avec le bien-être et l'esthétique. Pourtant, les écosystèmes d'eau douce sont parmi les écosystèmes de la planète les plus menacés et dégradés par les activités anthropiques (par exemple, la dégradation des habitats ou la pollution). Ce constat est particulièrement vrai pour les lacs, réceptacles des perturbations humaines à l'échelle des bassins versants et de l'atmosphère, avec une incidence sur les qualités de l'eau et de l'air. Le déploiement du PVF dans les lacs est susceptible d'affecter directement leur fonctionnement et les services écologiques qu'ils rendent, via des changements brutaux des conditions environnementales, mais l'évaluation de ces impacts reste à faire.

5 - Kumar, Mohammed Niyaz & Gupta, 2021.



Photo aérienne d'une gravière équipée d'une centrale photovoltaïque flottante dans la vallée de la Garonne (centrale développée par Akuo).

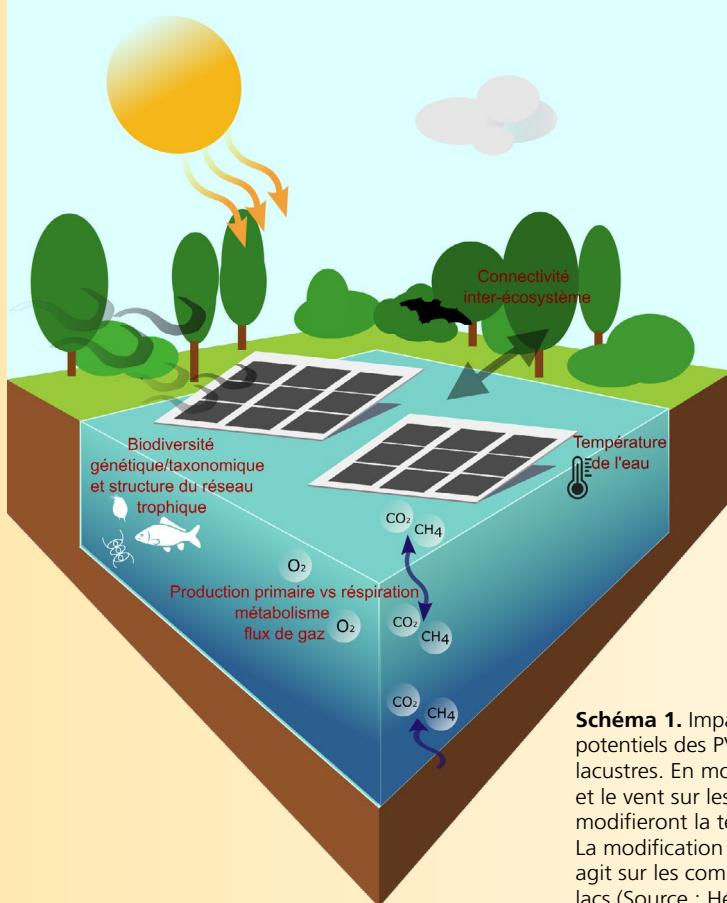


Schéma 1. Impacts écologiques potentiels des PVF sur les écosystèmes lacustres. En modifiant la luminosité et le vent sur les lacs, les PVF modifieront la température de l'eau. La modification des facteurs abiotiques agit sur les composantes biotiques des lacs (Source : Héctor Rodriguez Pérez).

Si la littérature technique qui traite du PVF (sa rentabilité économique, ses effets physiques sur l'eau, etc.) est en développement, les impacts écologiques qui y sont estimés pour prédire les changements potentiels des propriétés physiques des lacs sont principalement issus de la modélisation. Ces modèles prédisent une diminution de l'évaporation⁶, de la concentration en oxygène dissous⁷ et une modification de la température et des patrons de stratification^{8 9}. Ces travaux suggèrent, de manière préliminaire, comment la présence de panneaux solaires sur l'eau pourrait modifier la pénétration du vent et du rayonnement solaire et donc la température de l'eau, altérer les échanges air-eau et la météorologie de surface des masses d'eau^{8 9}. Ils anticipent de probables conséquences sur la biodiversité et le fonctionnement de ces écosystèmes (Schéma 1). Ces prédictions sont cependant très dépendantes du contexte, comme, par exemple, la surface de recouvrement du lac par les panneaux.

Comme le PVF risque d'affecter un grand nombre de paramètres écologiques des lacs à plusieurs niveaux d'organisation biologique, il est difficile de prédire le résultat de tant d'interactions. Le déploiement du PVF pose donc de nombreuses questions quant à ses

conséquences écologiques, qu'elles soient positives ou négatives¹⁰. Ces questionnements se traduisent par l'absence d'une politique de régulation claire sur le développement du PVF, alors que les gestionnaires (industriels, managers de la biodiversité ou services gouvernementaux) ont besoin de connaissances scientifiques robustes sur lesquelles s'appuyer pour encadrer l'utilisation de cette technologie prometteuse.

Dans ce contexte, notre objectif est de fournir une synthèse des connaissances sur les impacts écologiques potentiels des panneaux photovoltaïques flottants sur les écosystèmes d'eau douce en utilisant les connaissances actuelles et de référence. Ainsi, à partir des travaux consacrés à l'écologie théorique et aux effets de la lumière, de la température et du vent en eau douce, nous avons répertorié et explicité les conséquences écologiques potentielles des structures de PVF sur les écosystèmes lacustres. Ces derniers étant extrêmement complexes, nous n'avons pas cherché à fournir une liste exhaustive de tous les impacts. De ce fait, ce document vise principalement à apporter un éclairage sur la manière dont les principaux changements, directs et indirects, de paramètres abiotiques clés causés par le déploiement des PVF (à savoir la lumière, le vent et la température¹¹) pourraient affecter la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes lacustres (Schéma 1).

6 - Taboada *et al.*, 2017.

7 - Château *et al.*, 2019.

8 - Armstrong *et al.*, 2020.

9 - Exley *et al.*, 2021a.

10 - Haas *et al.*, 2020.

11 - Exley *et al.*, 2021b.

1. Effets du PVF induits par la réduction de la lumière incidente

Pour maximiser la production énergétique, les panneaux PV peuvent recouvrir une large proportion de la surface de l'eau (jusqu'à 74 %¹²). La présence physique des panneaux sur le lac peut fortement limiter l'arrivée de la lumière et du rayonnement photosynthétiquement actif. La disponibilité de lumière est l'un des principaux facteurs limitants de la production primaire, à la base du flux d'énergie dans les écosystèmes¹³. La réduction de la pénétration de la lumière affectera directement la production primaire phytoplanctonique, macrophytique et benthique, et modifiera probablement la distribution de la biomasse des communautés autotrophes¹⁴ et la dynamique de la matière organique¹⁵. De plus, elle risque d'influencer la diversité des consommateurs et le cycle des nutriments¹⁶.

Les études antérieures ont démontré que la disponibilité de la lumière et la production primaire diminuent avec l'augmentation de la couverture naturelle (par la canopée) ou artificielle (infrastructures humaines) à la surface de l'eau¹⁷. Selon les prédictions des modèles, l'augmentation du taux de recouvrement par les panneaux entraînerait une baisse de la croissance algale et de la concentration en chlorophylle a (chl-a). Château *et al.* (2019) estiment par modélisation qu'un recouvrement de 40 % dans un étang de pisciculture taïwanais réduirait la concentration moyenne en chl-a de 1,61 à 1,06 mg/L en hiver et de 1,06 à 0,86 mg/L en été. La réponse des producteurs primaires dépendra néanmoins du taux de recouvrement. Les simulations suggèrent que les réductions significatives de la biomasse algale se produiraient lorsque le taux de recouvrement dépasse 40 %¹⁸. Concrètement, la diminution de la croissance algale peut être perçue comme un impact positif du PVF, si cela améliore la qualité de l'eau dans les lacs eutrophes. Une faible luminosité pourrait aussi paradoxalement conduire à une plus forte abondance phytoplanctonique en raison des interactions entre espèces. En effet, les interactions compétitives entre les producteurs primaires pélagiques et benthiques sont conditionnées par le contexte lumineux (et nutritif), et le phytoplancton et le périphyton sont de meilleurs compétiteurs pour la lumière que les macrophytes. Ainsi,



© Héctor Rodriguez Pérez

Potamogeton sp. colonisé par le périphyton et avec un développement des algues filamenteuses. Le développement des producteurs primaires, dont les macrophytes et les microalgues, est conditionné par l'accès à la lumière.

des bascules du fonctionnement global de l'écosystème peuvent opérer si des changements de luminosité drastiques ont lieu¹⁹.

La lumière peut aussi influencer la composition spécifique, en agissant comme un filtre environnemental qui sélectionne les espèces ayant des traits fonctionnels associés à l'utilisation de la lumière, comme cela a été démontré pour le phytoplancton²⁰. Une synthèse des relations croissance-rayonnement pour le phytoplancton d'eau douce suggère que les cyanobactéries sont plus adaptées aux environnements faiblement lumineux, car elles disposent de stratégies adaptatives telles que la capacité à maintenir des taux photosynthétiques élevés à faible luminosité²¹. De plus, les espèces mixotrophes sont capables de basculer leur mode trophique et passer alors de l'autotrophie à l'hétérotrophie pour compenser le manque de lumière ou de nutriments. Ainsi, les modifications de la disponibilité des ressources fondamentales induites par le PVF pourraient modifier les processus qui régulent l'assemblage des communautés et stabilisent la coexistence des espèces, tels que la compétition intra- et interspécifique.

12 - Exley *et al.*, 2021b.

13 - Karlsson *et al.*, 2009.

14 - Vadeboncoeur, Vander Zanden & Lodge, 2002.

15 - Larson *et al.*, 2007.

16 - Mokany, Wood & Cunningham, 2008.

17 - Karlsson *et al.*, 2009.

18 - Haas *et al.*, 2020.

19 - Sand-Jensen & Borum, 1991.

20 - Flöder, Urabe & Kawabata, 2002.

21 - Paerl & Otten, 2013.

La lumière conditionne le devenir des rencontres proies-prédateurs dans les lacs, car les patrons journaliers d'activité du phytoplancton, du zooplancton et des poissons sont contrôlés par l'intensité lumineuse, qui elle-même influence le risque d'être prédaté²². Comme de nombreux poissons prédateurs utilisent préférentiellement la vue, la baisse de l'intensité lumineuse pourrait perturber la détection des proies et le succès des prédateurs dans la recherche de nourriture. Les faibles luminosités sont connues pour affecter la détection visuelle des proies en réduisant la distance de réactivité des poissons planctonivores, le taux d'attaque et le taux de capture.

À terme, cela pourrait entraîner des changements évolutifs, en particulier des modifications phénotypiques, comme cela a été observé chez la perche, un poisson prédateur, chez qui la taille de l'œil a augmenté suite à une détérioration des conditions visuelles (concentration élevée en carbone organique dissous, COD).

Il est également attendu que l'ombrage induit par le PVF réduise la biomasse des consommateurs via une diminution de l'efficacité de transfert²³. En effet, lorsque la lumière est limitante (par exemple, dans le cas d'une forte concentration en COD), la diminution de la production primaire benthique peut induire une baisse de la production et de la biomasse des niveaux trophiques supérieurs, tels que les invertébrés et poissons benthiques²⁴. La limitation de la lumière peut aussi avoir des effets positifs sur la biomasse des consommateurs, lorsque la disponibilité en nutriments est limitante²⁵. En effet, à faible lumière, les taux photosynthétiques nets sont réduits, ce qui diminue le ratio carbone-azote des producteurs primaires (meilleure qualité nutritive)

et réduit le déséquilibre élémentaire qui existe entre les producteurs primaires et les herbivores. Par conséquent, les impacts du PVF sur l'efficacité de transfert dépendront fortement de l'interaction entre de multiples facteurs tels que l'intensité lumineuse et la disponibilité en nutriments.

Le PVF affectera d'autres paramètres environnementaux, comme la concentration en oxygène dissous (OD), un paramètre essentiel pour la qualité de l'eau. L'OD pourrait être influencé par le PVF directement, via la réduction du contact air-eau et des échanges gazeux avec l'atmosphère, et indirectement, via la diminution de l'incidence lumineuse. La concentration en OD et la productivité primaire sont fortement couplées, notamment au fond de l'eau, où la réduction de luminosité limite l'activité phototrophe et la production d'OD. La diminution d'OD sous les panneaux photovoltaïques flottants a été modélisée²⁶ et mesurée *in situ*²⁶. Château *et al.* (2019) estiment la réduction de l'OD à 0,80 mg/L pour un recouvrement par les panneaux de 40 %. En comparant les concentrations en OD sous les structures photovoltaïques flottantes avec celles d'un point de référence non recouvert, de Lima *et al.* (2021) trouvent des concentrations inférieures sous les panneaux (4,6 mg/L contre à 6,0 mg/L au point de référence non recouvert). Or, les faibles teneurs en OD pourraient altérer la distribution des organismes en induisant un déplacement depuis les eaux hypoxiques vers les eaux oxygénées, voire être létales à un certain nombre d'organismes, pour qui la migration est impossible ou en cas d'anoxie complète de l'écosystème. Concrètement, l'anoxie est identifiée comme l'une des conséquences négatives potentielles principales du déploiement du PVF²⁷ (voir section 4.3, p. 10).

2. Impact du PVF induit par une modification de la température de l'eau

Le PVF bloquera physiquement le rayonnement solaire (de courtes longueurs d'onde), réduisant le réchauffement de surface et rafraîchissant probablement l'eau de surface²⁸. Le PVF risque aussi de modifier la variabilité journalière de la température de l'eau, car le réchauffement par les panneaux au cours de la journée et la restitution de cette chaleur pendant la nuit diminuent

les variations nyctémérales de l'eau de surface. Il a été estimé qu'un fort taux de recouvrement de la surface d'un lac par le PVF (> ~50 %) conduirait à une réduction significative de la température de l'eau²⁷. Château *et al.* (2019) estiment par modélisation qu'un recouvrement de 40 % d'un étang de pisciculture réduit en moyenne la température de l'eau de 20,99 à 20,22°C en hiver et de 31,03 à 29,60°C en été. Or, la température régule un grand nombre de caractéristiques physiques et chimiques de l'eau, déterminantes pour les processus

22 - Cerri, 1983.

23 - Château *et al.*, 2019.

24 - Karlsson *et al.*, 2009.

25 - Urabe *et al.*, 2002.

28 - Château *et al.*, 2019.

26 - de Lima *et al.*, 2021.

27 - Exley *et al.*, 2021b.

écologiques. Par exemple, la température conditionne la solubilité de l'oxygène, qui baisse lorsque la température s'élève. La température de l'eau affecte aussi la viscosité et la densité de l'eau, qui conditionnent les taux de sédimentation du phytoplancton et donc sa survie et ses conditions de suspension. Enfin, la température de l'eau modifie les patrons de stratification thermique de la masse d'eau et les conditions chimiques et biologiques de l'écosystème d'eau douce (voir section 4.1, p. 9).

D'après la théorie métabolique de l'écologie, les processus écologiques dépendent des taux métaboliques qui, dans la gamme thermique physiologique des organismes, augmentent exponentiellement avec la température²⁹. Chez les plantes comme chez les animaux, en-deçà d'un optimum thermique, l'augmentation de la température se traduit communément par une augmentation des taux physiologiques et métaboliques (photosynthèse, respiration, croissance, assimilation des nutriments) alors qu'au-delà de l'optimum, les taux diminuent, car les enzymes se dégradent. Tous les organismes sont caractérisés par une niche thermique. Leurs tolérances thermiques spécifiques définissent la distribution des organismes et la composition des communautés. Par exemple, les températures élevées pouvant être létales, les organismes meurent ou se réfugient dans des eaux adjacentes plus fraîches³⁰.

Sur le long terme, la température de l'eau joue aussi un rôle important sur les traits d'histoire de vie tels que la taille du corps, la durée de vie, le mode d'alimentation et le comportement³¹. La température de l'eau est un facteur clé de la phénologie des organismes, puisqu'elle régule, par exemple, la reproduction des poissons³² et l'émergence des insectes³³. Plus généralement, ce questionnement rejoint la problématique très actuelle du changement climatique, de ses effets sur le réchauffement de surface des lacs et de ses conséquences en écologie lacustre (phénologie, biodiversité, processus biogéochimiques). La température de surface des lacs a augmenté globalement, en moyenne de 0,34 °C par décennie³⁴. Il a d'ailleurs été suggéré que le PVF puisse être utilisé comme un outil pour tamponner les effets du changement climatique sur le réchauffement de l'eau³⁵.

De manière générale, les températures plus chaudes favorisent la proportion d'organismes de petite taille,



© Rosalie Bruel

Exemple de dispositif de suivi de la température d'un plan d'eau sur le lac de Padula (Réseau national de thermie). En haut à droite, exemples de différents montages des parties submergées du dispositif.

au sein et entre espèces, des bactéries aux poissons. La taille du corps est un trait biologique et écologique central qui conditionne de très nombreux processus, aussi bien moléculaires qu'évolutifs³⁶. La taille du corps est non seulement corrélée à la *fitness* de l'individu et la croissance de la population, mais elle contrôle aussi la prédation et affecte en cascade la dynamique des populations et communautés. En mésocosmes, les chironomidés, souvent abondants et avec un temps de génération court, sont plus petits lorsque la température augmente. La diminution de leur taille peut altérer leur valeur nutritive et modifier les taux d'attaque et le temps nécessaire au prédateur pour les capturer et les consommer. Elle induit donc des risques pour les autres espèces de l'écosystème prédatrices des chironomidés³⁷.

La température module la longueur et la stabilité des relations trophiques dans les réseaux trophiques aquatiques de manières variée et indirecte. La température stimule davantage la respiration que la production primaire brute, car la dépendance de la respiration vis-à-vis de la température est supérieure à celle de la photosynthèse, ce qui affecte l'équilibre métabolique

29 - Brown *et al.*, 2004.

30 - Gvoždík, 2018.

31 - Jeppesen *et al.*, 2010.

32 - Gillet & Dubois, 2007.

33 - Ivković *et al.*, 2013.

34 - Woolway *et al.*, 2020.

35 - Exley *et al.*, 2021a.

36 - Hildrew, Raffaelli & Edmonds-Brown, 2007.

37 - Wonglersak *et al.*, 2021.

du système³⁸. Le fait que les consommateurs seront probablement plus sensibles aux changements de température que les producteurs risque de renforcer le contrôle *top-down* des chaînes alimentaires, par augmentation du broutage avec l'augmentation de la température³⁹. Dans le scénario d'une diminution de température par le PVF, la tendance inverse est attendue, avec un contrôle *top-down* et une pression de broutage moindres.

En outre, les modifications phénologiques associées aux changements de température peuvent conduire à un décalage trophique entre proies et prédateurs et ainsi affecter le flux d'énergie dans le réseau trophique aquatique³⁹. Par exemple, il a été bien démontré que l'élévation de température avance le développement des *blooms* phytoplanctoniques au printemps. Ce type d'asynchronies entre niveaux trophiques découpe la disponibilité de la ressource et les besoins des consommateurs^{40 41}. La hausse de température peut aussi modifier le régime alimentaire du consommateur, avec une augmentation de l'herbivorie et de la pression de prédation sur les producteurs primaires. Si le déploiement du PVF s'accompagne d'une diminution de la température de l'eau, cela pourrait stimuler les organismes ectothermes omnivores à consommer moins de plantes et davantage de ressources d'origine animale, plus faciles à digérer à faible température et plus nutritives.

La température influence fortement les activités biologiques et donc les processus écosystémiques qui en dépendent. Des températures élevées peuvent

augmenter les taux physiologiques, comme l'excrétion par les poissons. Via l'excrétion, les poissons peuvent ainsi modifier significativement l'apport en nutriments et soutenir une forte proportion de la production primaire⁴². La température de l'eau modifie aussi les taux de décomposition de la matière organique. Ceci est notamment lié au fait que les taux de transformation du carbone, sa séquestration et sa minéralisation dans l'eau et les sédiments dépendent de l'activité microbienne, contrôlée directement par la température. La faible température de l'eau est souvent associée à une diminution des taux de décomposition et donc des taux de minéralisation, du fait probable de la réduction de l'activité métabolique des bactéries, décomposeurs et charognards. Si le déploiement du PVF diminue la température de l'eau, la baisse de la minéralisation du carbone organique pourrait conduire à une accumulation du carbone organique dans le sédiment et une altération du cycle du C⁴³.

Comme les changements de température affectent une grande variété de processus physiologiques et biologiques associés au métabolisme individuel, des variations, même faibles, pourraient entraîner en cascade des impacts visibles sur les organismes, du niveau individuel jusqu'au réseau trophique entier. La réponse des écosystèmes aux changements de température dépendra ainsi de la complexité du réseau d'interactions et des rétroactions entre processus physiques et biologiques.

3. Effets du PVF induits par l'altération du vent à la surface

La présence de panneaux crée des zones abritées à la surface du lac, où la diminution du contact air-eau et l'augmentation de la rugosité de surface réduisent la vitesse du vent. Néanmoins, l'intensité de ces effets est difficile à prédire, car elle est dépendante de la combinaison de facteurs tels que le taux de recouvrement par les panneaux, la conception du système, les caractéristiques du lac et du paysage environnant (par exemple, la morphométrie du lac ou la présence de végétation en berge). Des petites variations d'intensité du vent à la surface de l'eau peuvent avoir des conséquences significatives sur l'écologie

du lac^{44 45}. Le vent a un rôle central dans le fonctionnement des écosystèmes d'eau douce, puisqu'il affecte directement le brassage de l'eau, la dynamique thermique du lac, les flux de gaz à l'interface air-eau, la remise en suspension des sédiments et la distribution des nutriments dans la colonne d'eau. La réduction de la vitesse du vent peut, par exemple, diminuer la concentration en OD, car les échanges gazeux à l'interface sont fonction de la vitesse du vent et de la concentration en gaz.

38 - Yvon-Durocher *et al.*, 2010.

39 - He *et al.*, 2020.

40 - Peeters *et al.*, 2007.

41 - He *et al.*, 2020.

42 - Vanni, 2002.

43 - Gudasz *et al.*, 2010.

44 - Armstrong *et al.*, 2020.

45 - Exley *et al.*, 2021a.

La diminution du vent pourrait aussi produire des effets indirects sur la libération des nutriments et donc l'eutrophisation des lacs peu profonds. En effet, la réduction de la vitesse du vent et l'augmentation de la durée des périodes de faible vent risquent de rallonger les phases de stabilité et de basse concentration en OD au fond du lac (hypoxie). De plus, elles pourraient favoriser le relargage du phosphore par le sédiment et la production algale. Le vent fort est souvent associé à un relargage des nutriments par le sédiment par remise en suspension, notamment dans les lacs peu profonds. Ainsi, le déploiement du PVF pourrait réduire la remise en suspension des sédiments causée par la diminution de la vitesse du vent sous les panneaux solaires. Mais du fait de l'hypoxie à l'interface eau-sédiment, il pourrait aussi augmenter le relargage de nutriments en provenance du sédiment. De plus, la réduction de l'intensité du vent pourrait modifier le déplacement vertical et la dispersion horizontale passive et changer les patrons de distribution des organismes aquatiques. Lorsque le vent est faible, la turbulence n'est pas suffisante pour mélanger ni remettre en suspension le phytoplancton dans la colonne d'eau, ce qui permet aux espèces de petite taille capables de flotter de rester en surface⁴⁶. Les mouvements d'eau



© Jan Van IJken - OFB

Copépode portant de diatomées. La répartition des organismes planctoniques dans un plan d'eau dépend en partie des mouvements des masses d'eau, le vent étant leur principal moteur.

induits par le vent peuvent également affecter la distribution horizontale du zooplancton, en favorisant l'accumulation des organismes de plus grande taille en fonction de la direction du vent. Il est donc probable que le déploiement du PVF ait des conséquences sur les patrons spatiaux de distribution des espèces.

4. Interactions entre effets thermiques, lumineux et du vent

4.1. Effets du PVF sur les patrons de stratification et ses implications

Les panneaux protègent l'eau du rayonnement solaire et du vent et modifient la température de l'eau, ce qui pourrait conduire à des modifications des patrons de

stratification thermique du lac. Alors que la température et le vent sont des facteurs physiques du brassage vertical, leurs effets sont différents : la diminution du vent



© Héctor Rodríguez Pérez

Une installation photovoltaïque flottante dans la vallée de la Durance.

tend à supprimer la stratification et le mélange, alors que la baisse de température tend à favoriser ce dernier. Les simulations effectuées par Exley *et al.* (2021a) prédisent qu'un recouvrement supérieur à 50 % pourrait conduire à des changements importants de température et de périodicité de stratification. Les réponses les plus probables seraient la diminution de la température de l'eau, de la période de stratification et de la profondeur de mélange, même si, pour des scénarios avec des faibles recouvrements par les panneaux, la stratification pourrait être prolongée⁴⁷.

Comprendre comment le design des panneaux PVF modifie l'intensité et la phénologie de la stratification est donc de première importance. La stratification détermine de nombreux processus physiques, chimiques et biologiques au sein du lac, dont la dynamique des populations et les interactions spécifiques, et influence les échanges en oxygène, nutriments et carbone entre

la surface et le fond du lac. Les modifications temporelles du début de stratification peuvent générer des décalages dans l'apparition des blooms phytoplanctoniques et conduire à des altérations à la base du réseau trophique⁴⁸. De plus, des stratifications plus longues sont souvent associées à des anoxies dans l'hypolimnion dues à une baisse du brassage vertical de l'oxygène de surface. À leur tour, les conditions anoxiques au fond du lac entraînent une reminéralisation des nutriments (comme le relargage du phosphore) et favorisent les émissions de méthane par méthanogenèse. Le CH₄ est un puissant gaz à effet de serre par rapport au CO₂, donc, si le PVF rallonge les périodes de stratification et d'anoxie du fond, cela pourrait avoir des conséquences néfastes contreproductives en augmentant la contribution des lacs au réchauffement global via l'augmentation des émissions de CH₄.

4.2. Effets du PVF sur l'évaporation et la dynamique saisonnière

L'évaporation de l'eau est un paramètre physique essentiel du fonctionnement des lacs qui régule la température de surface de l'eau, la stratification, les flux de gaz à l'interface air-eau et les niveaux de l'eau⁴⁹. Le taux d'évaporation est très dépendant de la température. On estime que les taux d'évaporation moyens annuels dans les lacs vont augmenter de 16 % d'ici 2100 en raison du changement climatique⁴⁹. Les températures élevées étant corrélées aux changements des cycles saisonniers du niveau d'eau, des taux d'évaporation estivaux plus précoces diminuent le niveau de l'eau des lacs plus intensément. En induisant des changements de régime hydrique, la baisse du niveau d'eau met non seulement en péril la quantité d'eau⁵⁰, mais aussi la qualité de l'eau et conduit à des bascules trophiques.

Les effets combinés du PVF sur la vitesse du vent et la température de l'eau devraient réduire les pertes d'eau par évaporation⁵¹. Une étude utilisant des couvertures flottantes a démontré que la diminution du rayonnement solaire, de la ventilation à l'interface eau-air et le blocage de la vapeur d'eau engendrés par l'augmentation du recouvrement de l'eau pourrait réduire jusqu'à 96,8 % l'évaporation de l'eau⁵². Dans un test en pilote (bassin de 2 m x 2 m x 1 m), l'installation de panneaux

PVF contribue à une diminution de l'évaporation de 60 %⁵³. Même si les études empiriques sont limitées, les modèles prédisent une réduction de l'évaporation allant de 50 à 90 %. Dans un contexte où le changement climatique limite la disponibilité en eau et cause des sécheresses plus fréquentes et plus longues, le développement du PVF pourrait permettre d'économiser l'eau. Cependant, ce bénéfice supposé dépend certainement très fortement du contexte, du taux de recouvrement et des conditions météorologiques locales telles que l'humidité relative, la vitesse du vent et la température.

En affectant les propriétés fondamentales des lacs, comme la température, la disponibilité en lumière et le brassage de l'eau, le PVF pourrait potentiellement impacter les dynamiques spatiale et saisonnière des lacs (par exemple, la dynamique saisonnière du niveau d'eau). Elles régissent la non-concordance temporelle des interactions trophiques, ce qui pourrait impacter la structure des réseaux trophiques et les flux d'énergie et engendrer ainsi des bascules sévères de régime trophique⁵⁴.

47 - Exley *et al.*, 2021a.

49 - Woolway *et al.*, 2020.

50 - Shalaby, Nassar & Abdallah, 2021.

51 - Taboada *et al.*, 2017.

52 - Shalaby *et al.*, 2021.

48 - Winder & Schindler, 2004.

53 - Abdelal, 2021.

54 - Scheffer *et al.*, 2001.

4.3. Influence du PVF sur le métabolisme et les flux de gaz dans les lacs

Le métabolisme d'un lac repose sur un équilibre entre la respiration (R) et la production primaire brute (PPB), deux processus fondamentaux du fonctionnement des écosystèmes. La PPB correspond à l'assimilation et la transformation de carbone inorganique en biomasse organique végétale et la production d' O_2 par photosynthèse, dépendante de la lumière. La respiration, quant à elle, associée aux transformations biochimiques du carbone organique (CO), consomme l' O_2 et rejette du CO₂ et du CH₄. À l'échelle globale, le ratio PPB:R définit le statut d'un écosystème en tant que source ou puits de C. De même, la productivité lacustre est aussi un moteur important des taux d'émission des lacs.

La PPB et la R sont très sensibles à la luminosité et la température. Par conséquent, les PVF peuvent affecter le métabolisme et les émissions de gaz dans les lacs de multiples façons et selon différentes interactions/combinaisons (par exemple, lumière et production primaire, température et taux respiratoires, vent et apport de nutriments). Si, par exemple, en raison de la baisse de luminosité et de température, les PVF provoquaient la mortalité du phytoplancton et des macrophytes, réduisant ainsi la production primaire et les taux métaboliques, l'écosystème pourrait se transformer en une source de CO₂. Cela pourrait entraîner une exportation

de matière organique vers le sédiment, favorable à l'émission de CH₄ dans l'atmosphère.

La production de gaz à effet de serre (GES) par les lacs pourrait aussi être stimulée par le PVF, si la réduction du vent diminue la concentration en OD ou rallonge les périodes de stratification et soutient ainsi l'hypoxie. Les faibles concentrations en oxygène et les conditions anoxiques favorisent généralement l'utilisation d'accepteurs d'électrons alternatifs à l'oxygène, comme le carbone (pour la méthanogenèse) et les nitrates (dénitrification), avec pour produits finaux N₂O et CH₄, des GES plus impactants que le CO₂.

À plus long terme, les lacs pourraient subir un processus d'oligotrophisation du fait de la diminution de la biomasse des producteurs primaires. Cela devrait diminuer la disponibilité en MO, ainsi que la production et l'émission de GES. Cette dynamique dépendra de la température, des conditions d'oxygénation et de la disponibilité en nutriments. Alors que les effets du PVF sur le métabolisme de l'écosystème sont difficiles à prévoir⁵⁵, il est de première importance de les comprendre pour assurer que le PVF n'indue pas d'impacts non souhaitables sur les émissions de GES.

5. Implications du PVF des gènes à l'échelle des méta-socio-écosystèmes

Les organismes peuvent répondre à des modifications de leur environnement selon plusieurs processus :

- l'adaptation génétique, comme la sélection de souches adaptées à des variations de luminosité ;
- la plasticité phénotypique, comme l'altération des traits photosynthétiques adaptés à un environnement faiblement lumineux ;
- le *species sorting* avec la sélection d'espèces adaptées à des variations de luminosité.

Par exemple, des espèces phytoplanctoniques issues de groupes fonctionnels différents, exposés à des conditions de faible intensité lumineuse, sont capables d'augmenter leur variabilité phénotypique pour réduire la compétition interspécifique et optimiser leur succès individuel. Les poissons peuvent aussi répondre rapidement (en quelques générations) à des pressions environnementales comme des changements de température.

En utilisant des modèles, Château *et al.* (2019) prédisent que le refroidissement de l'eau généré par un recouvrement de 60 % par les PVF réduirait l'appétit des poissons et, par conséquent, la production piscicole. Le temps de génération d'une espèce va influencer la dynamique temporelle de sa réponse au PVF, les réponses les plus rapides et intenses concerneront très probablement les espèces ayant des temps de génération courts. C'est particulièrement vrai pour le phytoplancton, qui est abondant et dont le court temps de génération et la forte diversité phénotypique peuvent faciliter une évolution rapide des traits en réponse à de fortes pressions de sélection. Il est donc très probable que les changements rapides associés au PVF (de température ou de lumière) induisent une réponse rapide de ces organismes et des effets décalés sur ceux des niveaux trophiques supérieurs, comme les poissons à forte longévité.

55 - Armstrong *et al.*, 2020.

La présence de panneaux PVF peut aussi interférer sur les processus qui se produisent à l'interface eau-terre. Les flux de matière, d'organismes et d'énergie entre écosystèmes sont omniprésents, les écosystèmes étant connectés entre eux par des apports réciproques. Par conséquent, des perturbations qui concernent un habitat peuvent avoir, en cascade, des conséquences inattendues dans l'écosystème adjacent. La matière organique allochtonne terrestre constitue une ressource importante des réseaux trophiques aquatiques, qui affecte le bilan carbone du lac. Le bilan carbone des écosystèmes aquatiques dépend fortement des apports de carbone organique dissous (COD) et particulaire (COP) terrestres, les feuilles d'arbre étant le principal contributeur de COP terrestre. Le PVF pourrait affecter l'arrivée de matière organique terrestre de plusieurs manières :

- la construction des installations du PVF peut entraîner la suppression de la végétation environnante, ce qui réduirait l'apport de COP terrestre (les feuilles) ;
- les panneaux peuvent empêcher les feuilles de tomber dans l'eau ;
- la disposition spatiale des panneaux peut aussi modifier le devenir des feuilles en suspension et leur sédimentation, en limitant leur dérive.

Ainsi, le PVF modulera la disponibilité et la distribution spatiale du COP, avec des conséquences importantes sur la biochimie et le fonctionnement de l'écosystème (Meyer *et al.* 1998).

Les insectes émergents sont également un lien entre l'écosystème d'eau douce et l'écosystème terrestre adjacent. Dans certaines zones environnantes de grands lacs, l'émergence peut dépasser la production secondaire terrestre d'un facteur 100 voire plus⁵⁶. Or, les insectes aquatiques représentent une ressource significative pour les consommateurs terrestres, comme les oiseaux, reptiles et araignées. La lumière et la température déclenchent l'émergence des insectes, qui est plus précoce en cas de températures plus chaudes et de photopériode plus longue. Le PVF pourrait donc altérer la phénologie d'émergence des insectes aquatiques et les échanges de nutriments entre écosystèmes, à l'origine d'un décalage trophique avec les consommateurs terrestres.

Les organismes mobiles, tels que les oiseaux, jouent un rôle moteur sur le flux de nutriments entre écosystèmes et le fonctionnement des écosystèmes à large échelle spatiale, via leurs déplacements entre zones

de nourrissage et d'excrétion. Le PVF peut modifier l'utilisation de l'habitat et le comportement des oiseaux piscivores, en impactant ainsi ce flux des nutriments entre écosystèmes. Les panneaux peuvent attirer certaines espèces d'avifaune, dont la présence n'est pas toujours désirée, car l'accumulation de fientes sur les panneaux solaires peut réduire la production d'énergie. Si les fientes constituent un apport naturel de nutriments dans les lacs, leur concentration à la surface des panneaux, puis leur chasse ponctuelle vers l'eau, pendant le nettoyage ou au cours de pluies, entraînent un apport conséquent et pulsé de nutriments, susceptible d'affecter la qualité de l'eau⁵⁷.

Le déploiement du PVF peut également influencer les mouvements des organismes et de la matière au sein du réseau de lacs à l'échelle du paysage. Le vent qui balaie la surface du lac peut extraire les cellules végétatives de l'eau et transporter le phytoplancton. L'anémochorie est aussi une voie significative de dispersion du zooplancton entre écosystèmes d'eau douce. Le déploiement du PVF pourrait favoriser les processus de goulot d'étranglement génétique et de consanguinité et conduire, ainsi, au déclin des diversités intra- et interspécifiques du fait de la limitation des capacités de dispersion des organismes, et de la pression de sélection par la limitation de la lumière, en tant que ressource. En ce sens, le PVF pourrait agir sur les patrons locaux et régionaux de biodiversité.

Le flux de matière et d'énergie entre écosystèmes est aussi fortement impacté par les actions humaines. Les lacs sont des écosystèmes reconnus pour leurs multiples usages, comme l'approvisionnement en eau potable ou les activités récréatives et culturelles (par exemple, pêche, course à pied, promenade du chien, appréciation du paysage). Pour des raisons d'exploitation, de maintenance ou de sécurité, l'installation du PVF pourrait diminuer ou empêcher complètement ces autres activités humaines. Par exemple, la pratique de la pêche sera rendue impossible en cas d'interdiction d'accès au site ou, si le site reste accessible, limitée à certaines zones pour garantir l'intégrité de la structure flottante. La pêche récréative pourrait aussi être impactée via le changement de comportement des poissons, préférentiellement cachés sous les panneaux, donc dans des zones où la pêche n'est pas autorisée. Ces changements devront alors être compensés par des modifications de pratiques de gestion piscicole. L'interdiction au public pourrait donc fortement limiter les mouvements humains dans le paysage, en réduisant

ainsi un important vecteur d'introduction d'espèces non-natives. La réduction (ou la disparition complète) de la pêche pourrait également drastiquement modifier la pression de sélection qu'elle induit sur les poissons et conduire à de nouvelles trajectoires évolutives dans les lacs non pêchés. Enfin, l'installation de PVF risque de modifier aussi la perception visuelle des lacs, ainsi que des zones rivulaires (du fait, par exemple, de l'arrachage de la végétation en berge pendant la construction ou l'exploitation, pour éviter l'ombrage sur les panneaux. Ces aménagements pourraient susciter des potentiels

conflits d'usage au sein de la population locale et compromettre les bénéfices psychologiques immatériels que ces écosystèmes d'eau douce apportent en tant que patrimoine esthétique. Par ailleurs, d'autres activités industrielles peuvent elles aussi être touchées par l'installation des PVF. Ainsi, le déploiement du PVF doit être pensé dans un contexte de méta-socio-écosystèmes, car leur installation risque d'impacter les autres activités humaines que ces écosystèmes d'eau douce soutiennent.

6. Le rôle de la structure physique du PVF

Les panneaux PVF devraient améliorer la complexité de structure du lac, en fournissant un nouvel habitat dans la zone pélagique. Les pontons flottants à la base de la structure délimitent un nouvel espace dans la zone photique, qui apporte des conditions favorables au *biofouling* et un habitat pour les espèces sessiles en zone pélagique. De Lima *et al.* (2021) ont montré que, neuf mois après l'installation, la plupart de la surface des structures flottantes était recouverte de petits bivalves et de biofilm. Même si les preuves empiriques des effets écologiques des structures PVF n'existent pas, les études sur le rôle des récifs artificiels montrent que l'augmentation de l'hétérogénéité des habitats, associée à la présence de structures artificielles, est corrélée avec l'augmentation de l'abondance et de la diversité des macro-invertébrés. Les poissons sont aussi attirés par les structures artificielles, parce que la complexification de l'habitat fournit une protection, en créant des refuges à la prédation, ce qui augmente la survie des juvéniles et fournit un substrat favorable à la reproduction. Il a été effectivement montré que la partie inférieure des panneaux flottants pouvait être utilisée comme site de repos et de nidification par les oiseaux et les poissons⁵⁸. Rosa-Clot (2020) ont observé que, dans les lacs recouverts de panneaux PVF, les carpes avaient tendance à rester sous les plateformes flottantes pour profiter de l'ombre et de la présence d'algues fixées.

Les structures PVF peuvent aussi réduire la pression de prédation par les oiseaux piscivores, parce que :

- l'eau, et donc la zone de prédation, est moins accessible du fait de la présence des panneaux ;
- les proies se cachent sous les panneaux pour échapper à la prédation ;
- les matériaux qui composent la structure peuvent être répulsifs.

Les pontons flottants sur lesquels sont installés les panneaux peuvent donc être utilisés comme support ou comme refuge par divers organismes aquatiques et terrestres.

58 - de Lima *et al.*, 2021.

Conclusions

Le PVF pourrait entraîner une myriade d'impacts écologiques sur les écosystèmes aquatiques et les écosystèmes terrestres qui les environnent, et cela, à différents niveaux d'organisation biologique (Schéma 2). Même s'il est encore difficile de prévoir l'issue de ces multiples effets, parfois opposés, certaines conséquences pourraient compromettre le maintien des nombreux services que ces écosystèmes d'eau douce rendent aux sociétés, comme l'approvisionnement en eau potable et la régulation du climat.

Sur la base des études d'écologie théorique et des travaux sur les effets écologiques des paramètres physiques, très probablement impactés par les panneaux (lumière, température, vent), nous estimons que les effets écologiques seront fortement dépendants des contextes environnementaux (comme le statut trophique du lac, le type d'assemblage des communautés, le climat

local) et industriels (tels que le taux de recouvrement par les panneaux, le design de la structure flottante) et donc très variables d'un écosystème à l'autre. Par conséquent, quantifier les impacts positifs ou négatifs et comprendre la réponse des écosystèmes constituent un réel défi. Cela exige d'effectuer des suivis *in situ* en continu et de long terme, avant et après l'installation des panneaux, et de combiner des méthodes variées permettant de quantifier la biodiversité aquatique, la structure des réseaux trophiques et les fonctions de l'écosystème. Des études empiriques, menées *in situ* et en conditions contrôlées, sont essentielles pour améliorer la connaissance fondamentale de la réponse des écosystèmes aux changements environnementaux brutaux et pour s'assurer que le PVF remplit son objectif premier de technologie durable.

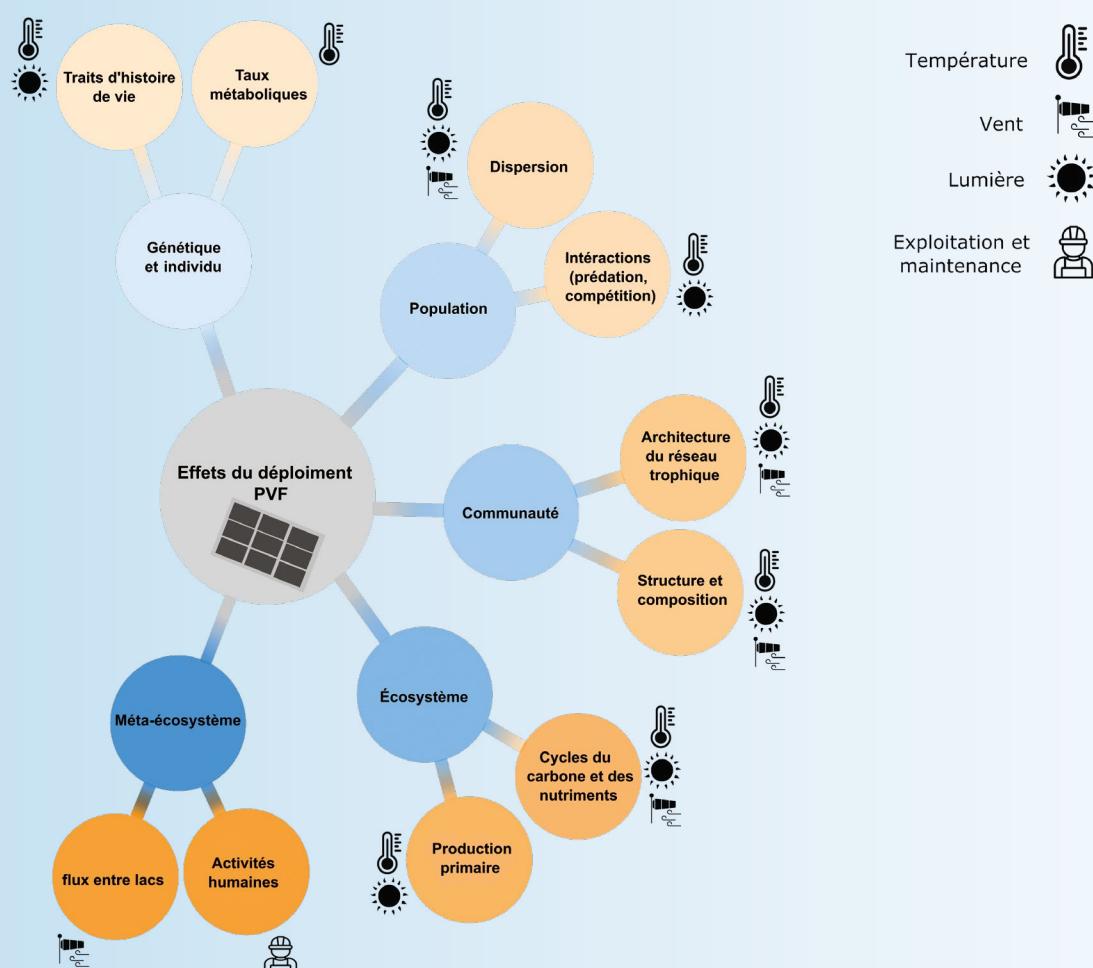


Schéma 2. Impacts écologiques potentiels des PVF à différents niveaux d'organisation biologique, de la génétique et de l'individu jusqu'aux métacommunautés (d'après Nobre *et al.*, 2023).

Bibliographie sélective

- Abdelal Q. (2021). Floating PV; an assessment of water quality and evaporation reduction in semi-arid regions. *International Journal of Low-Carbon Technologies* 16, 732-739.
- Armstrong A., Page T., Thackeray S.J., Hernandez R.R. & Jones I.D. (2020). Integrating environmental understanding into freshwater floatovoltaic deployment using an effects hierarchy and decision trees. *Environmental Research Letters* 15, 114055.
- Bartrons M., Papeš M., Diebel M.W., Gratton C. & Vander Zanden M.J. (2013). Regional-level inputs of emergent aquatic insects from water to land. *Ecosystems* 16, 1353-1363.
- Brown J.H., Gillooly J.F., Allen A.P., Savage V.M. & West G.B. (2004). Toward a metabolic theory of ecology. *Ecology* 85, 1771-1789.
- Cerri R.D. (1983). The effect of light intensity on predator and prey behaviour in cyprinid fish: Factors that influence prey risk. *Animal Behaviour* 31, 736-742.
- Château P.-A., Wunderlich R.F., Wang T.-W., Lai H.-T., Chen C.-C. & Chang F.-J. (2019). Mathematical modeling suggests high potential for the deployment of floating photovoltaic on fish ponds. *Science of The Total Environment* 687, 654-666.
- Exley G., Armstrong A., Page T. & Jones I.D. (2021a). Floating photovoltaics could mitigate climate change impacts on water body temperature and stratification. *Solar Energy* 219, 24-33.
- Exley G., Hernandez R. R., Page T., Chipps M., Gambro S., Hersey M., et al. (2021b). Scientific and stakeholder evidence-based assessment: Ecosystem response to floating solar photovoltaics and implications for sustainability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 152, 111639.
- Flöder S., Urabe J. & Kawabata Z. (2002). The influence of fluctuating light intensities on species composition and diversity of natural phytoplankton communities. *Oecologia* 133, 395-401.
- Gibson L., Wilman E.N. & Laurance W.F. (2017). How green is 'green' energy? *Trends in Ecology & Evolution* 32, 922-935.
- Gillet C. & Dubois J.P. (2007). Effect of water temperature and size of females on the timing of spawning of perch *Perca fluviatilis* L. in Lake Geneva from 1984 to 2003. *Journal of Fish Biology* 70, 1001-1014.
- Gudasz C., Bastviken D., Steger K., Premke K., Sobek S. & Tranvik L.J. (2010). Temperature- controlled organic carbon mineralization in lake sediments. *Nature* 466, 478-481.
- Gvoždík L. (2018). Just what is the thermal niche? *Oikos* 127, 1701-1710.
- Haas J., Khalighi J., de la Fuente A., Gerbersdorf S.U., Nowak W. & Chen P.-J. (2020). Floating photovoltaic plants: Ecological impacts versus hydropower operation flexibility. *Energy Conversion and Management* 206, 112414.
- He H., Li Q., Li J., Han Y., Cao Y., Liu W., et al. (2020). Turning up the heat: warming influences plankton biomass and spring phenology in subtropical waters characterized by extensive fish omnivory. *Oecologia* 194, 251-265.
- Hildrew A.G., Raffaelli D.G. & Edmonds-Brown R. eds (2007). *Body Size: The Structure and Function of Aquatic Ecosystems: The Structure and Function of Aquatic Ecosystems*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Ivković M., Miliša M., Previšić A., Popijač A. & Mihaljević Z. (2013). Environmental control of emergence patterns: Case study of changes in hourly and daily emergence of aquatic insects at constant and variable water temperatures: Changes in daily emergence of aquatic insects. *International Review of Hydrobiology* 98, 104-115.
- Jeppesen E., Meerhoff M., Holmgren K., González-Bergonzi I., Teixeira-de Mello F., Declerck S.A.J., et al. (2010). Impacts of climate warming on lake fish community structure and potential effects on ecosystem function. *Hydrobiologia* 646, 73-90.
- Karlsson J., Byström P., Ask J., Ask P., Persson L. & Jansson M. (2009). Light limitation of nutrient-poor lake ecosystems. *Nature* 460, 506-509.
- Kumar M., Mohammed Niyaz H. & Gupta R. (2021). Challenges and opportunities towards the development of floating photovoltaic systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 233, 111408.
- Larson J.H., Frost P.C., Lodge D.M. & Lamberti G.A. (2007). Photodegradation of dissolved organic matter in forested streams of the northern Great Lakes region. *Journal of the North American Benthological Society* 26, 416-425.
- de Lima R.L.P., Paxinou K., Boogaard F.C., Akkerman O. & Lin F.-Y. (2021). In-situ water quality observations under a large-scale floating solar farm using sensors and underwater drones. *Sustainability* 13, 6421.
- Mokany A., Wood J.T. & Cunningham S.A. (2008). Effect of shade and shading history on species abundances and ecosystem processes in temporary ponds. *Freshwater Biology* 53, 1917-1928.
- Nobre R.L.G., Midaur Rocha S., Healing S., Ji Q., Boulêtreau S., Armstrong A. & Cucherousset J. (2024). A glgal study of freshwater coverage by floating photovoltaics. *Solar Energy* 267, 112244.
- Olabi A.G. & Abdelkareem M.A. (2022). *Renewable energy and climate change. Renewable and Sustainable Energy Reviews* 158, 112111.
- Paerl H.W. & Otten T.G. (2013). Harmful cyanobacterial blooms: Causes, consequences, and controls. *Microbial Ecology* 65, 995-1010.
- Peeters F., Straile D., Lorke A. & Livingstone D.M. (2007). Earlier onset of the spring phytoplankton bloom in lakes of the temperate zone in a warmer climate. *Global Change Biology* 13, 1898-1909.
- Ritchie H. & Roser M. (2020). CO₂ and Greenhouse Gas Emissions. *Our World in Data* Rosa-Clot P. (2020). FPV

and Environmental Compatibility. In: *Floating PV Plants*. pp. 101-118. Elsevier.

- Sand-Jensen K. & Borum J. (1991). Interactions among phytoplankton, periphyton, and macrophytes in temperate freshwaters and estuaries. *Aquatic Botany* 41, 137-175.
- Scheffer M., Straile D., van Nes E.H. & Hosper H. (2001). Climatic warming causes regime shifts in lake food webs. *Limnology and Oceanography* 46, 1780-1783.
- Shalaby M.M., Nassar I.N. & Abdallah A.M. (2021). Evaporation suppression from open water surface using various floating covers with consideration of water ecology. *Journal of Hydrology* 598, 126482.
- Taboada M.E., Cáceres L., Gruber T.A., Galleguillos H.R., Cabeza L.F. & Rojas R. (2017). Solar water heating system and photovoltaic floating cover to reduce evaporation: Experimental results and modeling. *Renewable Energy* 105, 601-615.
- Urabe J. & Sterner R.W. (1996). Regulation of herbivore growth by the balance of light and nutrients. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 93, 8465-8469.
- Vadeboncoeur Y., Vander Zanden M.J. & Lodge D.M. (2002). Putting the Lake Back Together: Reintegrating Benthic Pathways into Lake Food Web Models. *BioScience* 52, 44.
- Vanni M.J. (2002). Nutrient cycling by animals in freshwater ecosystems. *Annual Review of Ecology and Systematics* 33, 341-370.
- Webster I.T. & Hutchinson P.A. (1994). Effect of wind on the distribution of phytoplankton cells in lakes revisited. *Limnology and Oceanography* 39, 365-373.
- Winder M. & Schindler D.E. (2004). Climate change uncouples trophic interactions in an aquatic ecosystem. *Ecology* 85, 2100-2106.

■ Wonglersak R., Fenberg P.B., Langdon P.G., Brooks S.J. & Price B.W. (2021). Insect body size changes under future warming projections: a case study of Chironomidae (Insecta: Diptera). *Hydrobiologia* 848, 2785-2796.

■ Woolway R.I., Kraemer B.M., Lengers J.D., Merchant C.J., O'Reilly C.M. & Sharma S. (2020). Global lake responses to climate change. *Nature Reviews Earth & Environment* 1, 388-403.

■ Xiao K., Griffis T.J., Baker J.M., Bolstad P.V., Erickson M.D., Lee X., et al. (2018). Evaporation from a temperate closed-basin lake and its impact on present, past, and future water level. *Journal of Hydrology* 561, 59-75.

■ Yvon-Durocher G., Jones J.I., Trimmer M., Woodward G. & Montoya J.M. (2010). Warming alters the metabolic balance of ecosystems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 365, 2117-2126.

**Pour consulter la bibliographie intégrale,
se rapporter à la publication d'origine :**

Nobre R., Boulêtreau S., Colas F., Azemar F., Tudesque L., Parthuisot N., Favriou P., Cucherousset J. (2023). Potential ecological impacts of floating photovoltaics on lake biodiversity and ecosystem functioning. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 188:113851.



● Rédaction

Régina Nobre, Stéphanie Boulêtreau, Frédéric Azemar, Loïc Tudesque, Nathalie Parthuisot, Pierre Favriou, Julien Cucherousset (Centre de recherche sur la biodiversité et l'environnement, Université Toulouse-III-Paul-Sabatier – CNRS – INP Toulouse – IRD)

Fanny Colas (Laboratoire d'écologie des hydrosystèmes naturels et anthropisés, Université Claude-Bernard-Lyon-1 – CNRS – ENTPE)

● Coordination

Héctor Rodríguez-Pérez, Jean-Marc Baudouin (OFB – Pôle R&D Ecla)

● Édition

Daria Khliustova (OFB)

● Création et mise en forme graphiques

Béatrice Saurel (saurelb@free.fr) - Opixido

● Citation

Nobre R. *et al.*, 2025. Photovoltaïque flottant : quels impacts potentiels sur la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes lacustres ? Office français de la biodiversité. Collection *Comprendre pour agir*. 16 pages.

● Contact

hector.rodriguez-perez@ofb.gouv.fr

La collection **Comprendre pour agir** accueille des ouvrages issus de travaux de recherche et d'expertise mis à la disposition des enseignants, formateurs, étudiants, scientifiques, ingénieurs et des gestionnaires concernés par la biodiversité.

Derniers numéros parus

- 44 – Micropolluants émis par le secteur de la santé : prendre soin aussi de l'eau – Retours d'expériences et recommandations à l'intention des acteurs hospitaliers et de la santé (avril 2022).
- 45 – Les espèces exotiques envahissantes : connaissances pratiques et expériences de gestion (ter). Volume 4 (mai 2022).
- 46 – La marque Esprit parc national – Synthèse de l'étude évaluative (juin 2022).
- 47 – Empreinte biodiversité importée de la France : état de l'art (septembre 2022).
- 48 – Le génie végétal sur les berges de cours d'eau : des techniques aux multiples bénéfices (octobre 2022).
- 49 – L'intégration de la biodiversité dans les formations des sports de nature : un levier d'action essentiel à la préservation des milieux (décembre 2022).
- 50 – Évaluation de la gestion d'aires protégées. Retour d'expérience sur 3 aires protégées gérées par l'Office français de la biodiversité (avril 2023).
- 51 – E Mufre di Corsica – Les Mouflons de Corse – *Ovis gmelini musimon var. corsicana* – 50 ans de travaux de recherches et d'actions de conservation (mars 2024).
- 52 – L'essentiel sur la haie (novembre 2023).
- 53 – Répartition communale de la petite faune de montagne en France : bilan de la décennie 2010-2019 et évolution depuis 1950 (juillet 2024).
- 54 – La gestion collective des ressources naturelles en France – Analyse comparée de la gestion des eaux souterraines et des pêcheries maritimes (décembre 2024).

<https://professionnels.ofb.fr/fr/doc-comprendre-agir>

● Mentions légales

Éditeur : Office français de la biodiversité (OFB)
12, cours Lumière – 94300 Vincennes



Imprimeur : Estimprim

Gratuit

Achevé d'imprimer en juin 2025
Dépôt légal à parution
ISBN web : 978-2-38170-215-5
ISBN print : 978-2-38170-216-2

La reproduction à des fins non commerciales, notamment éducatives, est permise sans autorisation écrite, à condition que la source soit dûment citée. La reproduction à des fins commerciales, et notamment en vue de la vente, est interdite sans permission écrite préalable.