



# Prospective scientifique sur les impacts des installations de production d'énergie renouvelables sur la biodiversité et lacunes de connaissances

---



## AVANT PROPOS

Le présent travail réalisé par la FRB à destination de TotalEnergies répond à l'urgence de la transition énergétique face au défi croissant que représente le changement climatique. Les modèles élaborés à la fin du siècle dernier anticipaient assez bien l'évolution du climat observé ces dernières années, renforçant l'enjeu autour de la décarbonation de l'économie et notamment de la production énergétique.

Que cela soit pour elle-même ou bien par les fonctions qu'elle assure et les services qu'elle apporte, la biodiversité est à la fois l'objet d'impacts, mais aussi un réservoir de solutions dans la crise que nous traversons. Il apparaît donc essentiel que cette transition du secteur énergétique ne se fasse pas au détriment de la biodiversité, comme certaines stratégies de captation de carbone par afforestation et son piégeage dans des couches géologiques le laissent craindre. Il est donc nécessaire d'intégrer les enjeux de biodiversité dans la mise en place de cette transition qui se fait au travers du développement à grande échelle de solutions technologiques dont on connaît encore mal les impacts sur la biodiversité.

Les énergies renouvelables permettent de sortir de l'utilisation de carbone comme source d'énergie, en se basant sur l'énergie solaire ou éolienne, ou d'éviter l'utilisation de stocks de carbone fossile (hydrocarbures, charbon) qui s'accumulerait dans l'atmosphère par le recours à de la biomasse renouvelable, ré-injectant le carbone dans les cycles biogéochimiques. Toutefois, les technologies employées ne sont pas sans impacts sur la biodiversité, que cela soit au moment de la fabrication des équipements associés à ces technologies, de leur installation dans les territoires ou au cours de leur exploitation.

A titre d'illustration, la région Grand-Est et la LPO ont décliné le plan national d'actions pour le milan royal dans la région dans laquelle il apparaît que l'éolien constitue après l'empoisonnement la deuxième cause de mortalité pour l'espèce. On dénombre ainsi 69 éoliennes, majoritairement en Lorraine, situées à moins de deux km d'un nid sans qu'aucune mesure de protection particulière n'ait été mise en place. La pression qu'exerce les éoliennes va de plus d'augmenter de façon importante d'ici 2023 car, après avoir équipé les zones les moins problématiques pour le milan, les développeurs se concentrent désormais sur le reste du territoire incluant des zones à forte sensibilité environnementale avec risques accrus pour la biodiversité<sup>1</sup>.

Le présent document se base sur une synthèse bibliographique réalisée par la FRB portant sur l'analyse de 388 articles récents de la littérature sur le sujet des impacts des énergies renouvelables sur la biodiversité, dans le périmètre des technologies identifiées par TotalEnergies. Il présente notamment les principales pressions et impacts pesant sur la biodiversité par la mise en place de ces technologies dans les territoires, au cours des différentes phases de ces projets, relève des solutions afin d'éviter, réduire ou compenser ces impacts, et propose des pistes de recherche pour combler les lacunes dans les connaissances qu'il reste à acquérir afin de mieux comprendre et répondre à ces enjeux.

Hélène SOUBELET  
Jean-François SILVAIN  
Robin GOFFAUX  
FRB

---

<sup>1</sup> <https://www.lpo.fr/actualites/rapaces-de-france-n-21-parution-debut-novembre-dp1>

## CONTRIBUTEURS

### COORDINATION ET REDACTION

Hélène SOUBELET, Jean-François SILVAIN, Robin GOFFAUX

### REMERCIEMENTS :

La FRB remercie Sylvie VANPEENE (INRAE), Eric GUINARD (Cerema) mobilisés pour l'élaboration de ce document.

## Table des matières

Sommaire .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Principe et contenu .....	5
Introduction .....	6
Installations photovoltaïques au sol .....	7
Panneaux solaires intégrés aux bâtis (toitures) et agriphotovoltaïque (AgriPV) .....	11
Photovoltaïques flottants .....	11
Énergie éolienne terrestre .....	17
Energie marine, éolienne et dispositifs marémoteurs .....	26
Hydrogène et batterie Li-ion .....	32
Conclusion générale .....	34

## PRINCIPE ET CONTENU

Le présent document constitue une synthèse préliminaire des connaissances de l'incidence des infrastructures de production d'énergies renouvelables sur la biodiversité.

La synthèse se base sur les éléments rassemblés dans le travail de revue de la littérature scientifique et de consultation d'experts réalisés par la FRB d'août 2020 à mai 2021. A la demande du commanditaire, la revue s'est concentrée sur les technologies suivantes :

- L'éolien, et particulièrement l'éolien offshore ;
- Le photovoltaïque (centrales au sol, toitures commerciales et industrielles), avec un focus sur l'application du photovoltaïque flottant (lacs et bord de mer) et l'application agri-photovoltaïque (ou agri PV)
- Le biogaz, incluant les intrants (matières premières) et les effluents (résidus) ;
- L'hydrogène et batteries Li-ion (hors impact minier).

La revue a porté sur les pressions exercées par les installations et leurs impacts directs et indirects sur la biodiversité à l'échelle du seul site de production. Notons que pour une vision exhaustive des impacts, il est nécessaire de prendre en compte les impacts sur l'ensemble du cycle de vie, en amont (production des composants et infrastructures des sites notamment), et en aval (retraitement des déchets, état du site/réhabilitation notamment).

Les pressions se réfèrent à celles identifiées par l'Ipbes en 2019 : changement d'occupation des terres, exploitation des espèces, pollutions, changement climatique et espèces exotiques envahissantes. Les impacts sur la biodiversité sont caractérisés dans cette synthèse par les effets sur les individus (blessures, mort, changement de comportement, perte de capacités), les populations (réduction du nombre d'individus), les espèces (extinction) et les communautés (modifications et déséquilibres).

Elle présente également des éléments pour identifier les lacunes de connaissance sur lesquelles il serait pertinent de lancer des projets de recherche, ainsi que des éléments d'évitement, réduction et compensation des impacts des projets d'énergie renouvelables.

## INTRODUCTION

Les impacts des installations d'énergie renouvelables sont variés et déjà relativement bien qualifiés, mais ils seront d'autant plus importants que ces solutions énergétiques seront déployées à grande échelle pour permettre une transition rapide vers une économie verte. Si ces pressions varient considérablement entre les différentes filières et les contextes environnementaux dans lesquels elles opèrent, les pressions majeures pour la majorité des filières sont le changement d'usage des sols, entraînant la perte ou la modification des habitats, la pollution, la modification des dynamiques hydriques. D'autres pressions existent comme l'émission de gaz à effets de serre, la modification des microclimats locaux ou les invasions biologiques. Les impacts sur la biodiversité les plus courants sont les traumatismes parfois mortels, ainsi que l'induction de comportement d'évitement.

Un tour d'horizon des impacts par filière montre que les installations de productions d'énergie renouvelables n'exercent pas toute la même pression sur la biodiversité, les plus impactantes quantitativement étant celles qui génèrent la destruction ou le déséquilibre d'écosystèmes entiers comme les fermes solaires photovoltaïques, l'exploitation intensive de la biomasse ou les dispositifs de production d'hydroélectricité (qui peuvent rompre les continuités écologiques et constituer des barrières infranchissables pour les espèces). D'autres présentent également des impacts inquiétants qualitativement, et potentiellement quantitativement, en provoquant des impacts avec des individus de certaines espèces.

Des lacunes de connaissances ont été relevées dans la littérature consultée pour chaque type d'énergie considéré. Elles peuvent constituer des pistes de recherche et développement pour améliorer l'intégration des enjeux de biodiversité dans ces installations. Ces éléments doivent néanmoins être replacés dans des approches plus globales, comme l'analyse du cycle de vie et la séquence éviter, réduire, compenser (ERC) (voir annexe) ; certaines publications traitant des forts impacts sur la biodiversité, en amont lors de la fabrication des composants de ces installations.

De façon globale, la revue de la littérature indique des manques de données sur les espèces les plus impactées : qui sont-elles, pourquoi et à quelle phase de développement sont-elles touchées, quels sont les niveaux de menaces pesant sur les individus et sur les espèces, ainsi que de leurs niveaux de vulnérabilité face à ces impacts ; quels sont leurs seuils de tolérance, d'accoutumance et de sensibilité. Il reste également des connaissances à acquérir pour mieux caractériser les pressions notamment les interactions physico-biologiques des installations, les niveaux d'exposition (aigus ou chroniques) des individus et des espèces à ces perturbations et les effets environnementaux à long terme et la meilleure caractérisation de certaines pressions comme l'effet récifal des éoliennes marines, ou les effets îlots de chaleurs, ainsi que les autres effets microclimatiques à long terme.

Enfin, il manque des connaissances sur les effets cascade et les impacts cumulés des installations et notamment : au niveau du site (diversité d'espèces impactées, effet d'échelle des sites complets versus structures individuelles) ; au niveau des populations d'espèces impactées (menaces sur la survie de l'espèce, effets de déplacement ou d'évitement) : à l'échelle d'ensembles de sites, sur des aires de répartition d'espèces cibles, sur des bassins versants, ou autre territoire ou région à signification écologique.

# INSTALLATIONS PHOTOVOLTAÏQUES AU SOL

Les grandes fermes solaires ont plusieurs effets négatifs sur la biodiversité, la perte ou la fragmentation des habitats : c'est l'effet sur la biodiversité le mieux documenté, la mortalité directe par collision des oiseaux avec les installations ou par brûlures occasionnées par les flux solaires intenses, la troisième pression est la pollution des masses d'eau à partir de produits chimiques toxiques utilisés pour le traitement des panneaux solaires et des sols (herbicides) et la quatrième pression considérée est la perturbation du microclimat local.

D'autres catégories de pressions sont liées à l'utilisation croissante de l'eau (en particulier dans les déserts) :

- Attraction et désorientation des insectes et des oiseaux causés par une lumière intense ou polarisée
- Piège écologique en raison de mécanismes attracteurs cumulatifs

Il existe aussi des effets positifs possibles pour la biodiversité et notamment la fourniture de zones de couverture ou d'habitat et d'alimentation (par exemple, pâturages dans les installations agriphotovoltaïques, voir partie II) pour certains animaux.

## LE CHANGEMENT D'AFFECTATION DES SOLS INDUISANT LA PERTE OU LA MODIFICATION DES HABITATS POUR LA BIODIVERSITE EST LA PRESSION QUI GENERE LE PLUS D'IMPACTS NEGATIFS

L'impact de l'utilisation des terres sur les écosystèmes naturels dépend de facteurs spécifiques tels que la topographie du paysage, la taille de la centrale solaire, le type de terrain, la distance par rapport aux écosystèmes sensibles, et la biodiversité (Hernandez *et al.*, 2015 ; Turney & Fthenakis, 2011).

Les projets solaires au sol nécessitent généralement une grande surface de terrain pour la construction (Bukhary *et al.*, 2018 ; De Marco *et al.*, 2014 ; Hernandez *et al.*, 2015), ils exacerbent la fragmentation de l'habitat (Cameron *et al.*, 2012 ; Turney & Fthenakis, 2011), ce qui entraîne des conséquences écologiques directes et indirectes (Hernandez *et al.*, 2015 ; De Marco *et al.*, 2014), notamment :

- Effets sur la végétation indigène et la disponibilité de la nourriture (Bukhary *et al.*, 2018 ; Cameron *et al.*, 2012 ; Turney & Fthenakis, 2011), en particulier du fait du défrichage et de l'enlèvement des couches supérieures du sol.
- Déplacement des espèces de chiroptères forestiers (DREAL, 2010) en raison de la déforestation lors de l'installation des centrales photovoltaïques dans des zones naturelles (milieu boisé, prairies, etc.) qui diminue fortement la disponibilité des gîtes et habitats.
- Réduction de la richesse et de la densité des espèces d'oiseaux dans l'installation photovoltaïque ainsi que dans la zone environnante (DeVault *et al.*, 2014 ; Visser *et al.*, 2019) consécutivement au défrichage de la zone d'implantation
- Perturbation des corridors de la faune par les infrastructures routières ce qui entraîne des freins au déplacement des espèces (Cameron *et al.*, 2012 ; Guerin, 2017), notamment un allongement des temps de déplacement quotidien des espèces mobiles et donc une perte d'énergie (DREAL, 2010), voire une impossibilité de déplacement (par exemple : clôture de sécurité) (Guerin, 2017 ; DREAL, 2010) et donc un isolement accru des populations d'espèces et une réduction du flux génétique (Thomas *et al.*, 2018 ; Turney & Fthenakis, 2011) avec à termes des vortex d'extinction
- Invasions d'espèces non indigènes, via les infrastructures routières qui servent de voies d'accès aux plantes envahissantes qui peuvent faire disparaître de façon compétitive les espèces indigènes.
- Modification de la qualité de l'habitat et des voies de migration (Turney & Fthenakis, 2011)
- Un déclin des pollinisateurs et de leurs habitats (Walston *et al.*, 2018).

**Question de recherche** : Bien que la plupart des recherches effectuées à ce jour ont porté sur les collisions avec les oiseaux (par exemple (Jeal *et al.*, 2019; Visser *et al.*, 2019; Walston *et al.*, 2016) et qu'elles démontrent un risque avéré, peu d'études quantifient les impacts des installations photovoltaïques à l'échelle industrielle en lien avec le changement d'usage des terres ou les zones

protégées (Hernandez *et al.*, 2015) et peu de données empiriques existent sur la mortalité aviaire dans ces installations (Walston *et al.*, 2016).

## LA SECONDE PRESSION LA PLUS IMPORTANTE POUR CE TYPE D'ENERGIE EST LA MORTALITE DIRECTE

Par collision avec l'infrastructure : ceci est particulièrement vrai pour les oiseaux. En outre, les insectes peuvent également être attirés par les installations photovoltaïques, ce qui peut augmenter la probabilité de collision des oiseaux (Horváth *et al.*, 2010). L'hypothèse de l'"effet de lac" suggère que les espèces dépendantes de l'eau (huards, grèbes, râles, foulques, oiseaux de rivage, oiseaux aquatiques et sauvagine) confondent de grandes étendues de panneaux solaires avec des plans d'eau, entrant en collision avec l'infrastructure lorsqu'ils tentent d'atterrir (Walston *et al.*, 2015; Visser *et al.*, 2019). Il existe aussi des collisions avec les véhicules via le développement des réseaux routiers desservant les installations, c'est notamment le cas pour les chauves-souris pendant la nuit (DREAL, 2010). Cela pourrait soit entraîner une mortalité directe, soit laisser des individus blessés ou échoués, les rendant ainsi vulnérables aux prédateurs (Walston *et al.*, 2015; Visser *et al.*, 2019).

Par électrocution par les lignes électriques, un risque accru a été démontré pour les oiseaux (Thomas *et al.*, 2018 ; Marques *et al.*, 2014).

Par brûlure due au flux solaire ou à la lumière solaire concentrée, ce qui entraîne :

- une mortalité directe ou indirecte par perte de la capacité de vol (lorsque les plumes sont brûlées)
- une réduction de la capacité à se nourrir ou à éviter les prédateurs,
- une famine ou la prédation de l'individu (Walston *et al.*, 2016).

Ces brûlures provoquées par ces installations pourraient occasionner la mort de plusieurs milliers ou dizaines de milliers d'oiseaux par année aux États-Unis (Walston *et al.*, 2016).

**Question de recherche** : des recherches plus poussées sur les effets d'attraction des insectes et des oiseaux permettraient de mieux comprendre les mécanismes en cours et amener vers des pistes et solutions d'évitement

## LA TROISIEME PRESSION EST LA POLLUTION PHYSIQUE, CHIMIQUE ET LUMINEUSE

Les travaux de terrassement occasionnent des émissions de poussières diffuses notamment par temps sec (MEDDAAT, 2009) avec :

- Effet sur la disponibilité en ressources alimentaires pour les chauves-souris (DREAL, 2010) par dépôt de poussière sur les feuillages et sur les insectes
- Réduction de la production primaire des plantes due aux dommages physiologiques et physiques induites par les émissions de poussières.

Cependant, ces nuisances sont limitées dans le temps et l'espace et peuvent être prévenues par des mesures courantes, comme l'arrosage des voies d'accès et du site (MEDDAAT, 2009).

Les activités de construction peuvent également détériorer temporairement la qualité des eaux souterraines et de surface, entraînant une augmentation de la turbidité ainsi que la charge sédimentaire et l'eutrophisation des cours d'eau à proximité avec des répercussions sur l'environnement aquatique (Turney & Fthenakis, 2011).

Une grande quantité de dépolviers, de produits chimiques et d'eau sont généralement appliqués pour nettoyer les panneaux en phase d'exploitation et empêcher la production de poussière (Bukhary *et al.*, 2018 ; Pimentel Da Silva & Branco, 2018). Ceci peut entraîner une contamination des eaux souterraines et de surface (Bukhary *et al.*, 2018 ; Pimentel Da Silva & Branco, 2018). Les produits chimiques utilisés sont extrêmement toxiques pour l'environnement et pourraient causer de nombreux impacts négatifs sur la faune et la flore à long terme (Pimentel Da Silva & Branco, 2018).

Par exemple, les surpresseurs utilisés pour nettoyer les panneaux constitués de sels, de lignine, d'additifs à base d'argile, de saumures, de polymères synthétiques et de sulfonate peuvent contaminer les eaux de surfaces et entraîner à court terme :

- la mortalité de poissons et d'autres animaux (amphibiens, invertébrés aquatiques...)
- la croissance d'algues qui induisent une réduction de l'oxygène dissous et l'augmentation de la stratification de la colonne d'eau (Pimentel Da Silva & Branco, 2018).

Les sources de lumière polarisée peuvent devenir des pièges écologiques et entraîner un déclin ou un effondrement rapide des populations (Jeal *et al.*, 2019 ; Horváth *et al.*, 2010) par :

- l'échec de la reproduction de certaines espèces
- la mortalité des organismes qui utilisent ce type de lumière (par exemple pour trouver des sites de ponte).

*o Cela semble être particulièrement le cas des mouches de mai (Ephemeroptera), des mouches des pierres (Trichoptera), des diptères dolichopodides et des mouches tabanides (Tabanidae) qui étaient les plus attirées par les panneaux solaires et ont montré un comportement de ponte au-dessus des panneaux solaires plus souvent que sur les surfaces avec des degrés de polarisation plus faibles (y compris l'eau), mais en général elles évitaient les cellules solaires avec des bords blancs non polarisants et des grilles blanches.*

*o De même, les insectes qui pondent des œufs dans l'eau sont particulièrement attirés par les panneaux solaires car ils utilisent la polarisation horizontale de la lumière des masses d'eau pour trouver des sites de ponte (Horváth *et al.*, 2010) : cela peut concerner les populations d'invertébrés aquatiques (par exemple des éphéméroptères (Ephemeroptera), taons (Tabanidae), moucheron non piqueurs (Chironomidae).*

**Question de recherche** : déterminer si les espèces dépendantes de l'eau sont particulièrement vulnérables à la mortalité dans les installations photovoltaïques (Walston *et al.*, 2015)

D'AUTRES PRESSIONS SONT EGALEMENT REFERENCEES DANS LA LITTERATURE SCIENTIFIQUE COMME LE CHANGEMENT DU MICROCLIMAT LOCAL ET LA CAPTATION DE L'EAU POUR LES BESOINS DE L'INSTALLATION.

Les panneaux photovoltaïques projettent des ombres et modifient le microclimat local, l'albédo et les températures du sol (Barron-Gafford *et al.*, 2016 ; Pimentel Da Silva & Branco, 2018 ; Turney & Fthenakis, 2011 ; Yang *et al.*, 2017). Les structures associées aux installations solaires photovoltaïques créent des ombres pluviales et solaires, ainsi que des zones avec un ruissellement d'eau (relativement) plus important (Cook & McCuen, 2013 ; Jeal *et al.*, 2019). Ces modifications des conditions environnementales influencent positivement et négativement les assemblages d'invertébrés par la création de nouveaux micro habitats grâce à l'ombrage supplémentaire et la repousse de la végétation indigène, la fourniture de sites de perchage et de nidification supplémentaires (Visser *et al.*, 2019), la création de parcelles à faible et forte productivité (Jeal *et al.*, 2019).

Les panneaux peuvent aussi provoquer un effet "d'îlot de chaleur" qui réchauffe les zones environnantes, ce qui pourrait influencer l'habitat de la faune sauvage et le fonctionnement des écosystèmes dans ces zones.

L'eau est nécessaire à différentes phases du cycle de vie des centrales photovoltaïques, de la construction au déclassement (Bukhary *et al.*, 2018 ; Sinha *et al.*, 2012). Pendant la phase de construction, l'eau est principalement utilisée pour la suppression des poussières lors du nivellement du site (Sinha *et al.*, 2012) et peut entraîner une érosion des sols, une augmentation du ruissellement de surface (Turney & Fthenakis, 2011) et une baisse de la quantité d'eau disponible pour les écosystèmes.

**Questions de recherche**

- Comprendre les effets des changements de microclimat sur les populations d'insectes, le comportement de l'entomofaune et les effets d'attraction de certaines espèces de chiroptères (DREAL, 2010), cette préoccupation est en effet sous étudiée (Barron-Gafford *et al.*, 2016).
- Utiliser la télédétection couplée à des mesures au sol pour déterminer l'étendue latérale et verticale de l'effet d'îlot de chaleur associée aux centrales électriques (Barron-Gafford *et al.*, 2016) ;
- Plus globalement, il existe d'importantes lacunes dans les connaissances qui rendent plus difficiles l'évaluation et l'atténuation des impacts des installations photovoltaïques au sol, il pourrait être intéressant de :
  - comprendre l'influence combinée de tous les facteurs de causalité qui contribuent aux mortalités, tels que les localisations, le potentiel d'attraction des oiseaux vers les installations (par exemple, l'hypothèse de "l'effet de lac"), sur les populations et pour une diversité d'espèces aviaires (Walston *et al.*, 2015 ; 2016) ;

- effectuer des études comprenant un échantillonnage saisonnier (ou en périodes humides et sèches) pour évaluer la variation temporelle et spatiale des mortalités d'oiseaux (Visser *et al.*, 2019) ;
- réaliser des recherches concentrées sur (a) les incertitudes liées aux risques aviaires ; (b) les impacts au niveau des populations d'oiseaux migrateurs ; (c) la mise au point de techniques d'inventaire et de surveillance plus efficaces ; et (d) l'élaboration de mesures d'atténuation appropriées et rentables et de meilleures pratiques de gestion pour réduire le risque de mortalité (Walston *et al.*, 2015 ; 2016 ; Visser *et al.*, 2019) ;
- Il est également important de travailler à la réduction des comportements d'évitements et à la réduction des impacts et notamment :
  - identifier les moyens de dissuasion chimiosensoriels (méthodes d'aversion conditionnées au goût ou à l'odeur) qui pourraient être efficaces pour réduire les impacts sur les oiseaux dans les installations solaires (Walston *et al.*, 2015) ;
  - identifier les emplacements optimaux des projets qui évitent les principales voies migratoires des oiseaux, les sites de halte et les habitats importants contribuera également à réduire le risque de mortalité régional (Walston *et al.*, 2016) ;
  - évaluer les impacts cumulatifs des développements photovoltaïques à l'échelle d'une région (Visser *et al.*, 2019).

# PANNEAUX SOLAIRES INTEGRES AUX BATIS (TOITURES) ET AGRIPHOTOVOLTAÏQUE (AGRIPV)

## PANNEAUX SOLAIRES INTEGRES AU BATI

Contrairement aux panneaux solaires au sol qui nécessitent d'importantes étendues de terrain (Hernandez *et al.*, 2015), le développement de l'énergie solaire photovoltaïque sur les toits et les façades des bâtiments peut réduire certains des effets néfastes des changements d'utilisation des terres tels que la perte/modification d'habitat (Hernandez *et al.*, 2014). En effet, les panneaux solaires peuvent être montés sur des structures existantes (principalement en milieu urbain et péri-urbain), de sorte qu'ils ne convertissent pas ou ne fragmentent pas les habitats (FRB, 2017). Il est intéressant de noter que si ces installations solaires photovoltaïques sont combinées avec des toits végétalisés, elles peuvent potentiellement fournir un habitat à un large éventail d'espèces de plantes et d'invertébrés et assurer un certain nombre de services écosystémiques dans les zones urbaines (Nash *et al.*, 2016). Une présence régulière de rougequeue noir et de linotte mélodieuse a été constatée sur les toits solaires pouvant constituer une ressource alimentaire précieuse pour les espèces d'oiseaux prioritaires pour la conservation ainsi que pour les oiseaux communs. Toutefois, une couverture photovoltaïque complète pourrait être préjudiciable à certains groupes d'invertébrés comme les hyménoptères (Nash *et al.*, 2016).

## AGRI-PV

La co-localisation de centrales solaires avec des exploitations agricoles peut fournir une opportunité d'atténuer les impacts environnementaux (par exemple, la perte de biodiversité, l'utilisation et les changements de couverture des terres et de l'eau, l'érosion) (Hernandez *et al.*, 2015 ; Malu *et al.*, 2017 ; Ravi *et al.*, 2016 ; Weselek *et al.*, 2019) et de restaurer les services écosystémiques tels que la pollinisation (Walston *et al.*, 2018). De nombreux auteurs ont étudié l'AgriPV dans plusieurs systèmes (Dinesh & Pearce, 2016 ; Malu *et al.*, 2017), notamment le solaire photovoltaïque associé à l'*Aloe vera* dans les régions sèches et semi-arides (Ravi *et al.*, 2016), à la laitue (Marrou *et al.*, 2013) et aux tomates cerises (Cossu *et al.*, 2014). Ces travaux montrent que la sélection de plantes spécifiques (adaptées aux conditions locales, environnementales et celles créées par l'installation, et notamment dont la demande en eau doit être en proportion de celle utilisée pour le nettoyage des panneaux), physiologiquement et économiquement viables pour la co-localisation peut-être une contrainte majeure pour l'établissement de tels systèmes (Ravi *et al.*, 2016). La littérature sur les impacts sur la biodiversité est rare.

### Questions de recherche :

- Examiner la manière dont la densité de la couverture photovoltaïque affecte la biodiversité des toits végétalisés et la performance des systèmes photovoltaïques (Nash *et al.*, 2016) ;
- Etudier les effets microclimatiques à long terme des panneaux solaires sur les cultures : redistribution des pluies sous les panneaux, atténuation ou accélération du vent, changements de température des cultures et du sol (Dupraz *et al.*, 2011) ;
- Réaliser des études approfondies sur les "zones" d'habitat associées aux panneaux photovoltaïques, peut-être en s'appuyant sur une surveillance microclimatique plus détaillée. Cela permettrait une désignation plus éclairée des zones et donc une caractérisation plus informative et l'analyse de l'interaction entre les panneaux photovoltaïques et la végétation environnante (Nash *et al.*, 2016) ;
- Réaliser des travaux pour déterminer le potentiel de l'agriculture agriphotovoltaïque dans le monde entier en termes de rendements (Malu *et al.*, 2017) et leur potentiel impact sur la biodiversité ;
- Déterminer si la mosaïque des habitats pourrait être améliorée par la plantation ciblée d'espèces connues pour favoriser les niches d'habitat créées par les panneaux photovoltaïques (Nash *et al.*, 2016).

## PHOTOVOLTAÏQUES FLOTTANTS

Le solaire flottant, également appelé photovoltaïque flottant, établi sur lacs et étendues d'eau, est apparu comme une alternative au photovoltaïque conventionnel pour atténuer certains des impacts négatifs liés à leur installation (déforestation, nivellement des terrains, pose de fondations) qui entraînent

la perte d'habitat, de faune et de flore (Pimentel Da Silva & Branco, 2018 ; Cromratie Clemons *et al.*, 2021).

D'autres avantages pour l'environnement ont été documentés (Cromratie Clemons *et al.*, 2021) et notamment :

- la réduction de la croissance des algues grâce à l'effet d'ombrage des panneaux (Cromratie Clemons *et al.*, 2021 ; Lopez *et al.*, 2020 ; World Bank, 2018) (permettant de réduire le risque d'eutrophisation),
- la couverture d'une partie importante de la surface de l'eau, ce qui permet d'abaisser la température de l'eau et la quantité d'eau exposée à la lumière directe du soleil (Cromratie Clemons *et al.*, 2021),
- la réduction de l'évaporation excessive de l'eau (Cromratie Clemons *et al.*, 2021 ; Dinesh & Pearce, 2016 ; Dupraz *et al.*, 2011) d'environ 33 % dans les zones naturelles d'eau stagnante et d'environ 50 % dans les zones artificielles tout en permettant une meilleure efficacité énergétique et en favorisant un environnement sûr pour la faune (Cromratie Clemons *et al.*, 2021).

**Question de recherche :** L'ampleur exacte de ces avantages en termes de performance doit encore être confirmée par des installations plus grandes, dans de multiples régions géographiques et au fil du temps (World Bank, 2018).

Les principales pressions exercées par ces installations solaires flottantes sont le changement d'usage du milieu et la pollution.

#### LE CHANGEMENT D'USAGE DU MILIEU ENTRAINE UNE MODIFICATION OU UNE PERTE D'HABITAT DE CERTAINES ESPECES

Cette pression est due à la construction de nouvelles routes, l'extension de routes existantes permettant d'accéder à l'installation (Pimentel Da Silva & Branco, 2018) et la modification de la géomorphologie du fond du lac pendant les phases d'installation et de démantèlement avec des impacts négatifs dus à l'ancrage, à la structure de câblage et au creusement de tranchées sur le sol utilisé pour relier la structure flottante à la sous-station (Pimentel Da Silva & Branco, 2018).

**Questions de recherche :** peu de recherches ont été menées sur les impacts du photovoltaïque flottant sur la flore et la faune des écosystèmes aquatiques (Pimentel Da Silva & Branco, 2018). Il convient notamment d'évaluer l'ampleur de ces impacts et leur importance à long terme en fonction des caractéristiques locales et de la taille du projet (Pimentel Da Silva et Branco, 2018), de comprendre quels sont les impacts cumulés de ces installations sur la faune et la flore et de comparer les impacts pour la faune d'un développement concentré et d'un développement dispersé dans des installations plus petites pour déterminer celui qui a le moins d'impacts.

#### LA POLLUTION GENEREE PAR L'INSTALLATION EST LA SECONDE PLUS IMPORTANTE PRESSION, CAR ELLE EST MULTIFORME

- La pollution sonore générée par l'installation ou des engins utilisés pour l'ancrage peut perturber les espèces aquatiques.
- La modification de la qualité de l'eau et l'augmentation de sa turbidité, causées par le renouvellement des sédiments au fond du lac pendant l'installation (notamment ancrage et amarrage) (Pimentel Da Silva & Branco, 2018) a un impact préjudiciable temporaire sur les communautés benthiques et autres communautés aquatiques vivant au fond du lac en raison de l'augmentation des solides en suspension (Pimentel Da Silva & Branco, 2018).
- La pollution lumineuse (modification des régimes lumineux) est de deux natures :
  - o Le blocage de la lumière du soleil sur la zone couverte par les panneaux solaires (World Bank, 2018), peut entraîner une réduction de la photosynthèse et de la production primaire dans les couches d'eau sous-jacentes et, par conséquent, l'hypoxie des zones couvertes par les panneaux (Pimentel Da Silva & Branco, 2018). Ceci pourrait causer l'asphyxie et la mort des organismes vivants et par extension nuire à l'ensemble du réseau trophique.
  - o L'attraction des insectes qui utilisent les plans d'eau pour la ponte du fait de la lumière polarisée des panneaux qui attirent à leur tour les oiseaux (Pimentel Da Silva & Branco, 2018). Ceci peut affecter les succès de reproduction et par extension, entraîner un déclin ou un

effondrement rapide des populations des espèces concernées (Száz *et al.*, 2016 ; Horváth *et al.*, 2010).

- La pollution électromagnétique générée par les câbles utilisés pour le transport de l'électricité en provenance des panneaux peut affecter les espèces très sensibles à ces champs (Pimentel Da Silva & Branco, 2018) telles que certains poissons et élasmobranches (Gill & Bartlett, 2010).

**Question de recherche :** acquérir suffisamment de données sur les perturbations du fonctionnement des écosystèmes lacustres et sur l'effet des champs électromagnétiques générés par les centrales photovoltaïques flottantes.

LES AUTRES FACTEURS SIGNIFICATIFS SONT LA COLLISION, LES ESPECES EXOTIQUES ENVAHISSANTES, LE CHANGEMENT CLIMATIQUE, LA CAPTATION DE L'EAU

- Les collisions d'oiseaux avec les panneaux solaires flottants (Pimentel Da Silva & Branco, 2018).
- La création d'habitats pour les espèces aquatiques exotiques (algues et espèces exotiques envahissantes par exemple ; un habitat pour le perchoir des oiseaux) ;
- L'augmentation des gaz à effets de serre due, notamment à l'augmentation du trafic pendant la phase d'exploitation, d'entretien et de démantèlement (Pimentel Da Silva & Branco, 2018).
- Les variations du niveau de l'eau

**Questions de recherche :** L'impact sur l'évaporation de l'eau doit être mieux évalué sur les lacs naturels, car il pourrait modifier le microclimat local et provoquer des perturbations de la faune et la flore locales (Pimentel Da Silva & Branco, 2018). Des études locales et rigoureuses à long terme sont également nécessaires pour comprendre les interactions possibles entre les installations photovoltaïques flottantes et l'environnement aquatique en utilisant les données d'exploitation des réservoirs à long terme, y compris les variations du niveau de l'eau, les précipitations, les entrées et les sorties (World Bank, 2018). De plus la disparition des cadavres d'oiseaux ayant percuté la structure en mer rend l'évaluation des phénomènes de collision plus difficile à réaliser et il faudrait donc améliorer les dispositifs de suivi ad hoc.

## BIOGAZ

La promotion de la bioénergie par les politiques énergétiques européennes ces dernières années a entraîné une forte augmentation de la culture des plantes énergétiques, en particulier du maïs (Svoboda *et al.*, 2013). Contrairement aux autres technologies, des impacts surviennent dès la phase d'approvisionnement en matière première qui doit ici être produite en amont, à la différence de la lumière ou du vent. L'utilisation de la biomasse comme matière première pour l'énergie peut être associée à un certain nombre d'impacts sur la biodiversité et les services écosystémiques en plus de la concurrence avec la production alimentaire et des conflits d'utilisation des terres (Everaars *et al.*, 2014, Immerzeel *et al.*, 2014 ; Pedroli *et al.*, 2013).

La phase d'installation est caractérisée par un changement d'usage des terres et la phase de production de biogaz est souvent la principale source d'émissions de substances nocives pour l'environnement en général et la biodiversité en particulier (Börjesson & Berglund, 2007). Par ailleurs, les résidus du processus de production de biogaz sont un type relativement nouveau d'engrais organique dont la composition varie en fonction de l'origine de la matière première utilisée dans le processus de production de biogaz (Abubaker *et al.*, 2012). Ils constituent une source précieuse de nutriments (Maurer *et al.*, 2019 ; Sieling *et al.*, 2013) et ont un potentiel fertilisant élevé (Maurer *et al.*, 2019 ; Sieling *et al.*, 2013). Toutefois, leur application comme engrais comporte un risque de volatilisation qui peut affecter la qualité de l'air et l'écosystème microbien du sol (Abubaker *et al.*, 2013).

Questions de recherche : Les impacts des cultures bioénergétiques sur la biodiversité sont bien étudiés dans la littérature. Toutefois, il existe des lacunes de connaissances sur

- Les incidences spécifiques et de long terme des infrastructures de production de biogaz sur la biodiversité en particulier au cours des phases de production et d'utilisation.
- L'évaluation des impacts cumulés à l'échelle nationale et leurs conséquences sur la biodiversité pour une meilleure optimisation des systèmes de production de biogaz en termes de durabilité environnementale.

### LA PREMIERE PRESSION GENERANT DES IMPACTS SUR LA BIODIVERSITE RELEVE DU CHANGEMENT D'USAGE DES TERRES

Le changement d'usage des terres (c'est-à-dire la conversion des habitats naturels ou non naturels en cultures énergétiques) apparaît comme le principal moteur de la perte de biodiversité (Immerzeel *et al.*, 2014). Ces effets dépendent fortement des circonstances régionales spécifiques, du type de terres concernés par le changement et des pratiques de gestion associées (Pedroli *et al.*, 2013). Ce changement peut entraîner la perte et dégradation des habitats (Everaars *et al.*, 2014; Lüker-Jans *et al.*, 2017; Pedroli *et al.*, 2013), en particulier les prairies, les zones humides ou d'autres zones de grande valeur en termes de biodiversité (Brooke *et al.*, 2009; Immerzeel *et al.*, 2014; Lüker-Jans *et al.*, 2017; Pedroli *et al.*, 2013). Il affecte également la richesse spécifique et l'abondance de nombreuses espèces (Brooke *et al.*, 2009 ; Immerzeel *et al.*, 2014).

Les travaux de Brooke *et al.*, (2009), aux Etats ont porté sur les effets des changements d'utilisation des terres provoqués par l'augmentation des plantations sur les populations d'oiseaux reproductrices et nichant dans les prairies. Les résultats montrent une diminution du nombre d'espèces d'oiseaux de prairies (par exemple, l'alouette des prés) sensibles à la perte de l'habitat dans les zones de fortes cultures de maïs.

Les travaux de Everaars *et al.*, (2014) ont montré une diminution de la densité des couples reproducteurs des oiseaux de terres agricoles due à la production de cultures bioénergétiques.

Stanley & Stout, (2013) indiquent que les taxons de pollinisateurs sont affectés de façons diverses à l'échelle du champ en fonction de ce que les cultures bioénergétiques remplacent d'autres cultures ou des prairies. Par exemple, dans le cas d'un remplacement du blé par le colza, l'abondance et la richesse taxonomique des bourdons et des abeilles solitaires utilisant les champs étaient plus élevées dans le colza que dans le blé et les groupes de pollinisateurs et les plantes à fleurs étaient plus abondants en bordure des champs que dans le centre des champs de culture.

Ce changement peut aussi avoir des effets positifs sur la biodiversité (Gevers *et al.*, 2011). Ainsi, si la conversion des terres se fait sur des terrains dégradés, cela peut avoir des effets positifs sur la réhabilitation de la biodiversité (Von Cossel *et al.*, 2019 ; Cossel *et al.*, 2019 ; Immerzeel *et al.*, 2014 ; Pedroli *et al.*, 2013), à condition que les cultures choisies offrent des habitats aux espèces traditionnelles des milieux agricoles (Pedroli *et al.*, 2013). Toutefois, les impacts positifs ne sont signalés qu'à l'échelle

du terrain et les résultats des études sont difficilement généralisables en raison des observations ponctuelles (Immerzeel *et al.*, 2014).

**Question de recherche :**

- Réaliser des études supplémentaires (au niveau du paysage, sur l'étendue spatiale de la fragmentation des habitats), précises et à long terme sur les incidences des infrastructures de production de biogaz sur la biodiversité pour améliorer les connaissances et mieux comprendre les multiples facteurs de changement de la biodiversité et leurs impacts associés avec un élargissement sur différents groupes taxonomiques afin d'analyser comment ces différents groupes taxonomiques et leurs populations sont affectés.
- Prendre en compte dans les ACV, l'utilisation et les changements d'utilisation des terres pour la production de biogaz (Lask *et al.*, 2020) ;
- Effectuer des recherches plus empiriques sur les effets à long terme de la culture et de la récolte de la biomasse sur la biodiversité et à différentes échelles dans la grande variété des agroécosystèmes européens (Pedroli *et al.*, 2013)

## LA SECONDE PRESSION LA PLUS IMPORTANTE EST LA POLLUTION

Les cultures énergétiques, en particulier le maïs, nécessitent une utilisation accrue d'eau et une grande quantité d'intrants (engrais minéraux, pesticides) (Brooke *et al.*, 2009 ; Lüker-Jans *et al.*, 2017 ; Nehring, *et al.*, 2008 ; Pimentel *et al.*, 2002 ; Sayed *et al.*, 2021). Ces besoins en eau et ces contaminants sont responsables de changements substantiels dans la gestion de l'eau et des écosystèmes du sol dans les zones sensibles (Pedroli *et al.*, 2013) et induisent des répercussions sur les eaux souterraines et de surfaces et les écosystèmes aquatiques (Sayed *et al.*, 2021). En effet, les ruissellements importants de nutriments découlant de l'utilisation accrue d'engrais et de pesticides peuvent contaminer les eaux souterraines et de surfaces, et dégrader ainsi la qualité de l'eau (Brooke *et al.*, 2009 ; Lüker-Jans *et al.*, 2017 ; Nehring, *et al.*, 2008).

- Les niveaux élevés de nutriments entraînent une eutrophisation des zones humides et des masses d'eau et une dégradation des récifs coralliens (FAO, 2019). De hauts niveaux d'azote et de phosphore peuvent endommager les écosystèmes aquatiques, en particulier les zones humides et les nombreuses espèces qui en dépendent (Brooke *et al.*, 2009). Ces excès stimulent une croissance excessive des plantes et, dans des conditions extrêmes, une hypoxie ou des "zones mortes" appauvries en oxygène, ainsi que des efflorescences algales nuisibles qui affectent la productivité primaire et secondaire (IPBES, 2019).
- Les pesticides réduisent la richesse en macro-invertébrés des rivières et ont des propriétés de perturbation endocrinienne qui affectent la biodiversité des eaux douces et mettent en danger la santé des écosystèmes aquatiques (IPBES, 2019). Par exemple, une étude aux États-Unis a révélé que l'utilisation de pesticides comme l'atrazine pour la culture du maïs est particulièrement préoccupante en raison de son impact sur la santé et le développement des amphibiens (Brooke *et al.*, 2009).
- La pollution générée par le stockage et le traitement de la biomasse dans des installations à silos ouverts a un impact considérable sur l'environnement aquatique (Cramer *et al.*, 2019) : en effet, les effluents d'ensilage sont très solubles dans l'eau et ne peuvent pas être éliminés par balayage à sec (Cramer *et al.*, 2019). En cas de pluie, les contaminants accumulés sont lessivés et entraînent une forte contamination des eaux pluviales qui sont souvent rejetées dans les eaux de surface sans aucun traitement.
- Les digestats pourraient avoir des effets phytotoxiques au début de la croissance (germination), dus principalement à la salinité (Albuquerque *et al.*, 2012).
- En raison de la variabilité dans leur composition, les résidus peuvent provoquer des changements dans la structure de la communauté bactérienne, une réduction de la respiration du sol et affecter l'activité microbienne dans les sols (Abubaker *et al.*, 2013). Ceci est néanmoins tempéré par Risberg *et al.*, (2017) qui démontrent que le digestat ne présente pas un impact sur l'activité microbienne du sol supérieur à celui du lisier.
- Le stockage et la manipulation du digestat à ciel ouvert peuvent avoir un impact environnemental considérable lié à la volatilisation d'ammoniac (Boulamanti *et al.*, 2013 ; Hansen *et al.*, 2012 ; Liebetrau *et al.*, 2010) ou la dispersion des formes oxydées d'azote, par lixiviation des ions nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) ou émission d'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O) (Goberna *et al.*, 2011 ; Ni *et al.*, 2012 ; Svoboda, Taube, Wienforth, *et al.*, 2013). Ces phénomènes peuvent entraîner des risques environnementaux pour l'atmosphère avec des retombées sur les écosystèmes pauvres en azote

(Ni *et al.*, 2012, Bartóg *et al.*, 2020) comme l'acidification des écosystèmes (Pedroli *et al.*, 2013), l'eutrophisation des écosystèmes naturels et semi-naturels limités en azote, l'eutrophisation des masses d'eau de surface (Ni *et al.*, 2012).

L'épandage des résidus de biogaz peut aussi avoir des effets positifs sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol (Abubaker *et al.*, 2012 ; Muscolo *et al.*, 2017 ; Terhoeven-Urselmans *et al.*, 2009, ce qui est bénéfique pour certaines plantes comme la tomate, le poivron, le chou-rave ou les plantes ornementales (Maurer *et al.*, 2019).

**Questions de recherche :**

- Intégrer les impacts des émissions polluantes des projets de biogaz sur la biodiversité dans les études ACV afin d'identifier les espèces les plus vulnérables à ces émissions.
- Modéliser les effets à long terme de l'épandage de résidus de biogaz sur les flux de carbone et de nutriments afin d'analyser les effets potentiels sur la biodiversité (Svoboda, Taube, Wienforth, *et al.*, 2013), sur la croissance et le rendement des plantes (Abubaker *et al.*, 2013; Risberg *et al.*, 2017) et sur la qualité et la quantité de matière organique du sol (Svoboda, Taube, Wienforth, *et al.*, 2013).
- Mieux comprendre et évaluer les effets des émissions provenant du stockage et de l'épandage du digestat en raison des résultats contradictoires et variables rapportées dans la littérature sur les effets de son application en tant qu'agent fertilisant et des recherches limitées couvrant l'évaluation agronomique.

LES AUTRES PRESSIONS IDENTIFIEES SONT LE CHANGEMENT CLIMATIQUE, L'EROSION DES SOLS ET LES MODIFICATIONS DU PAYSAGE

**Changement climatique**

Que cela soit au moment de la production de biomasse ou lors de son utilisation, des gaz à effet de serre sont émis vers l'atmosphère. Les impacts du changement climatique sont importants à la fois en raison de ces émissions de gaz à effets de serre (Zona *et al.*, 2013) et de l'altération des microclimats locaux suite aux changements d'albédo (fraction de la lumière réfléchiée par le soleil) et d'évapotranspiration (Tölle *et al.*, 2014).

- Ces effets pourraient fortement influencer le cycle de vie, la phénologie, les performances physiologiques, la distribution et les interactions des espèces (McCormack *et al.*, 2016).

**Erosion des sols**

Outre la perte et la modification des habitats résultant de la conversion des écosystèmes naturels, l'intensification et l'expansion des plantations de matières premières à dominance énergétique est généralement associée à une intensification du travail du sol (passage d'engins, labour) qui augmente l'érosion et la sédimentation des sols (Brooke *et al.*, 2009 ; Lüker-Jans *et al.*, 2017 ; Pimentel *et al.*, 2002).

- Ceci entraîne une dégradation des fonctions écosystémiques des sols par un appauvrissement de la qualité des sols (Sayed *et al.* 2021), une diminution du retour de la matière organique (Pimentel *et al.*, 2002), la diminution de la productivité agricole (FAO, 2019).

**Modification du paysage**

L'augmentation des surfaces cultivées en maïs résultant du boom des installations de biogaz a entraîné des changements dans le paysage (Huth *et al.*, 2019 ; Lüker-Jans *et al.*, 2017) souvent associés au processus d'homogénéisation des écosystèmes et des paysages (Immerzeel *et al.*, 2014).

- En particulier, la monoculture du maïs conduit à des paysages plus homogènes et moins diversifiés qui engendrent des pertes d'esthétisme, mais également une perte de pollinisateurs, un affaiblissement de la lutte naturelle contre les parasites, et un déséquilibre des fonctions des écosystèmes (Huth *et al.*, 2019 ; Pedroli *et al.*, 2013).

**Questions de recherche :**

Des études sur la potentialité en termes d'impacts des différentes sources de biomasse (cultures dédiées versus co-produits ou utilisation de déchets) permettraient d'identifier les meilleures compromis production énergétique/conservation de la biodiversité

# ÉNERGIE EOLIENNE TERRESTRE

Les impacts négatifs des éoliennes terrestres sur la biodiversité, et notamment les chauves-souris et les oiseaux sont très documentés. Il est néanmoins difficile d'estimer l'impact du parc éolien français sur les oiseaux, car il dépend essentiellement des enjeux avifaunistiques présents sur chaque site d'implantation. Une étude de la LPO (2017) souligne que 81 % des cadavres retrouvés appartiennent à des espèces protégées ou présentant une préoccupation majeure quant à leur état de conservation. Les migrateurs, principalement des passereaux qui traversent la France par millions en période automnale, sont les oiseaux les plus retrouvés sous les éoliennes (ils représentent environ 60% des cadavres) selon cette même étude. Une autre en Suisse relève 55 % de décès de roitelets, passereaux migrateurs nocturnes, par ce type d'installation avec un rôle suspecté de la visibilité des infrastructures en fonction des conditions météorologiques, indépendamment de la densité d'oiseaux présents (Aschwanden *et al.* 2018). Les rapaces diurnes, principalement impactés pendant la période de nidification, sont toutefois les plus vulnérables aux éoliennes en raison de leurs faibles effectifs de population (quelques dizaines de couples nicheurs pour certains). Les exploitants testent depuis plusieurs années des dispositifs visant à réduire la mortalité des rapaces due aux éoliennes (caméras couplées à des systèmes d'effarouchement sonore ou de mise à l'arrêt des machines), mais l'efficacité de ces dispositifs n'est pas suffisante. La Ligue de Protection des Oiseaux (LPO) collabore avec les entreprises pour leur apporter son expertise, mais ne s'engage que si le partenariat vise à mettre en œuvre des mesures concrètes. Il existe aussi des effets positifs pour la biodiversité comme la constitution de territoires favorables pour certaines espèces terrestres en raison de la réduction du trafic, de la disponibilité en ressources alimentaires et de la réduction de prédateurs.

## Questions de recherche :

- Développer des innovations technologiques (par exemple, les dispositifs de dissuasion acoustique) et/ou les changements opérationnels (par exemple, l'augmentation de la vitesse de coupure les nuits où la vitesse du vent est faible) pour réduire la mortalité des chauves-souris causée par les éoliennes (Foo *et al.*, 2017) ;
- Evaluer l'efficacité des mesures d'atténuation, telles que les dispositifs de dissuasion acoustique proposées sur l'activité des chauves-souris (Millon *et al.*, 2018) et sur les rapaces. Des études futures sont nécessaires pour évaluer les nouvelles hypothèses de distribution saisonnière, qui pourraient indiquer que le risque de l'énergie éolienne pour les chauves-souris pourrait être le plus élevé dans les habitats situés entre les zones d'estivage intérieures et les zones d'hivernage côtières (par exemple, près des cols dans les chaînes de montagnes côtières) (Hayes *et al.*, 2015) ;
- Mieux comprendre l'utilisation de l'habitat fonctionnel par les espèces impactées pour permettre la prévision des risques futurs, à la fois du point de vue du risque de collision, mais aussi pour comprendre les conséquences potentielles de tout déplacement de populations (ICES, 2019).

## LA PREMIERE PRESSION EST LA MORTALITE PAR COLLISION ET BAROTRAUMATISMES

Les estimations de mortalité annuelle s'élèvent à 888 000 et 573 000 décès par an pour les chauves-souris et les oiseaux, respectivement, sur les 51 630 MW d'installations éoliennes aux États-Unis (Smallwood, 2013). Dans le cadre de cette estimation, 83 000 décès de rapaces, y compris des aigles protégés par le gouvernement fédéral, ont été enregistrés (Walston *et al.*, 2018). La mortalité des chauves-souris en Allemagne a été estimée à plus de 250 000 individus par an (FRB, 2017). Les risques ne concernent pas seulement les espèces locales, mais aussi les espèces migratrices. A gabarit constant pour une éolienne, les estimations de mortalité en France et en Amérique du nord sont tout à fait comparables, même si la comparaison des parcs aux États-Unis et des parcs français n'est pas pertinente, car les premiers comptent jusqu'à 5000 éoliennes contre 8 en moyenne pour les seconds. En France les éoliennes qui tuent le plus d'oiseaux sont souvent les plus anciennes (et donc souvent les plus petites) (LPO 2017). Ce constat s'explique par le fait qu'elles ont été implantées avant l'émergence du réseau Natura 2000, souvent dans des espaces naturels (ZPS, Zones de Protection Spéciales), à une époque où la réglementation relative au développement de l'éolien n'était pas aussi exigeante et où les connaissances sur les impacts potentiels et les moyens de les réduire n'étaient pas aussi avancées. L'étude indique toutefois que « dans le cadre de la réhabilitation d'un site (repowering),

le gabarit des machines serait à prendre en compte car il n'est pas prouvé que remplacer des éoliennes existantes par un nombre plus réduit d'éoliennes de plus grande dimension soit de nature à réduire l'impact du parc. ».

- **Mortalité des oiseaux**

- o Certaines espèces sont plus sensibles à la mortalité par collision notamment les espèces abondantes et à fortes populations telles que l'alouette hausse-col (*Eremophila alpestris*), le viréo à oeil rouge (*Vireo olivaceus*) (Zimmerling *et al.*, 2013), l'alouette des champs (*Alauda arvensis*) (Bastos *et al.*, 2016) ou l'alouette de Dupont (*Chersophilus duponti*), qui est gravement menacée (Gómez-Catasús *et al.*, 2018). Zimmerling *et al.*, (2013) ont conclu que pour la plupart des espèces, les effets au niveau des populations sont peu probables, car les espèces qui présentent un taux de collision élevé (par exemple, les passereaux) ont des populations de grande taille. Une autre étude a indiqué que les effets des parcs éoliens sur les densités de passereaux semblent être propres à chaque guildes et influencés par les changements d'utilisation des terres à proximité des turbines (Fernández - Bellon *et al.*, 2019).
- o Les passereaux en migration nocturne, en particulier les roitelets (*Regulus sp.*) figurent parmi les victimes les plus fréquents dans les parcs éoliens (Aschwanden *et al.*, 2018 ; Zimmerling *et al.*, 2013) et représentent 55 % des décès (Aschwanden *et al.*, 2018).
- o Diverses études ont montré que les rapaces sont particulièrement vulnérables aux collisions avec les éoliennes (Balotari-Chiebao *et al.*, 2016 ; Dahl *et al.*, 2013 ; Martínez - Abraín *et al.*, 2012). Même si les taux de mortalité des rapaces semblent être relativement faibles par rapport à d'autres groupes tels que les passereaux, ils sont considérés comme faisant partie des groupes d'espèces les plus vulnérables dans le contexte de l'énergie éolienne en raison de la taille réduite de leurs populations (Schuster *et al.*, 2015).
- o Les systèmes d'éclairage nocturnes associés aux turbines peuvent avoir des impacts négatifs sur le comportement de certaines espèces ou peuvent augmenter l'épuisement et la probabilité de collision la nuit (Gómez-Catasús *et al.*, 2018).

- **Mortalité des chauves-souris**

Des recherches comparatives dans les parcs éoliens ont établi que les éoliennes pourraient être encore plus nuisibles pour les chauves-souris que pour les oiseaux (Cryan & Barclay, 2009 ; Smallwood, 2013). Les individus sont tués soit par collision directe avec les pales en mouvement, soit par barotraumatisme lorsqu'ils volent à proximité des pales en mouvement, par réductions soudaines de pression de l'air à proximité des pales (Cryan & Barclay, 2009 ; Grodsky *et al.*, 2011). Il existe plusieurs explications non exclusives aux collisions entre les chauves-souris et les éoliennes (Cryan & Barclay, 2009). Un grand nombre d'études menées dans différentes régions du monde (Barré *et al.*, 2018 ; Cryan & Barclay, 2009 ; Mantoïu *et al.*, 2020 ; Wellig *et al.*, 2018) montrent que ces installations pourraient menacer la viabilité des populations et entraîner un risque accru d'extinction en raison de la mortalité par collision (Frick *et al.*, 2017). Les opérateurs ont une obligation de transmettre un rapport annuel de suivi de mortalité, cependant moins de 5% des rapports sont transmis au MNHN (FRB, 2017<sup>2</sup>). Plusieurs hypothèses issues de travaux de recherche peuvent apporter des explications à ce phénomène :

- o Une première hypothèse est que les chauves-souris ne peuvent pas détecter les pales qui s'approchent rapidement en raison de la vitesse extrêmement élevée du rotor (jusqu'à 300 km/h à l'extrémité des pales) (Wellig *et al.*, 2018).
- o Une autre hypothèse suggère que les chauves-souris courent un risque plus important de collision lorsqu'elles expriment certains comportements, comme voler haut pendant la migration ou chasser les insectes migrants (Cryan & Barclay, 2009).
- o Une troisième hypothèse considère que les collisions entre les chauves-souris et les éoliennes sont aléatoires (Cryan & Barclay, 2009).
- o Enfin, une dernière hypothèse indique que les turbines pourraient attirer les chauves-souris dans leur voisinage, car ces éléments peuvent attirer les insectes ou être perçus comme des perchoirs potentiels ou même comme des sites d'accouplement avantageux (Cryan & Barclay, 2009 ; Reimer *et al.*, 2018 ; Wellig *et al.*, 2018).

---

<sup>2</sup> <https://www.fondationbiodiversite.fr/wp-content/uploads/2017/10/CR-JFRB.pdf>

o Des études ont révélé qu'à la fin de l'été et en automne, l'activité et la mortalité des chauves-souris semblaient être les plus élevées (Hull & Cawthen, 2013 ; Mantoiu *et al.*, 2020 ; Schuster *et al.*, 2015). Cela pourrait indiquer que la mortalité des chauves-souris est liée au comportement migratoire, avec un accent particulier sur la migration d'automne (Roeleke *et al.*, 2016 ; Schuster *et al.*, 2015). Par ailleurs, les espèces les plus sujettes aux collisions sont principalement celles utilisant des appels d'écholocation adaptés aux déplacements en espace ouvert et appartenant aux genres *Lasiurus*, *Lasionycteris*, *Perimyotis*, *Nyctalus*, *Pipistrellus*, *Vespertilio*, *Eptesicus* et *Chalinolobus* (Foo *et al.*, 2017 ; Schuster *et al.*, 2015).

**Question de recherche :**

- Mieux évaluer l'importance des mortalités par collision espèce par espèce et par période ou conditions éco-physiologiques
- Mettre au point et évaluer des innovations technologiques (par exemple, les dispositifs de dissuasion acoustique) et/ou les changements opérationnels pour éviter les collisions
- Travailler sur la diminution de l'hétérogénéité entre les protocoles d'étude et la compatibilité des données.

**LA SECONDE PRESSION EST LA PERTE OU MODIFICATION DE L'HABITAT QUI ENTRAINE DES COMPORTEMENT D'EVITEMENT, DE DEPLACEMENT ET DES MORTALITES INDIRECTES**

Les activités de construction tels que les terrassements, les excavations et parfois les défrichements peuvent induire une destruction directe d'habitats utilisés par les espèces selon la taille du projet. Toutefois le défrichement d'espaces boisés peut également entraîner la création de milieux favorables comme les clairières et lisières forestières pour le déplacement et des zones de chasses pour d'autres espèces (Horn *et al.*, 2008 ; LPO, 2019). La construction des parcs éoliens et des infrastructures associées peut provoquer la destruction ou fragmentation des habitats des espèces peu mobiles (reptiles, amphibiens, invertébrés) et de la flore (MEDDE, 2014). Ainsi, ces activités peuvent diminuer l'attrait de certains habitats pour de nombreuses espèces de chauves-souris (Kelm *et al.*, 2014) et d'oiseaux (Pearce - Higgins *et al.*, 2009) en affectant les perchoirs, les déplacements et la recherche de nourriture et empêchant les individus d'atteindre des zones précédemment reliées ou allongeant les distances nécessaires pour atteindre ces zones (Kelm *et al.*, 2014).

**• Impacts sur les oiseaux :**

Les populations d'oiseaux sont impactées par la gêne occasionnée par les installations. Le comportement d'évitement est dépendant de l'espèce d'oiseaux considérée (Garvin *et al.*, 2011) :

- o Garvin *et al.*, (2011) ont démontré que leur déplacement vers des habitats plus favorables pourrait entraîner une diminution de l'abondance des rapaces et Dahl *et al.*, (2012) ainsi que Martínez - Abraín *et al.*, (2012) ont mis en évidence une baisse de leur efficacité de reproduction
- o Les turbines pourraient être perçues comme un risque de prédation pour les espèces telles que l'alouettes de Dupont, adoptant une stratégie d'évasion (Gómez-Catasús *et al.*, 2018).
- o Pearce-Higgins *et al.* (2012) ont observé une diminution des densités de tétras lyre (*Lagopus lagopus scoticus*), de bécassines (*Gallinago gallinago*) et de courlis (*Numenius arquata*), déplacés par l'activité de construction dans un site de référence proche du parc. À l'inverse, les densités de tairiens pâtres (*Saxicola rubicola*), d'alouettes des champs (*Alauda arvensis*) et de pipits des prés (*Anthus pratensis*), par exemple, ont augmenté pendant la période de construction par l'amélioration de la qualité de l'habitat pour ces espèces particulières (Pearce-Higgins *et al.*, 2012).
- o Jenkins *et al.*, (2018) ont montré de forts déplacements de grands pélicans blancs dans une zone de parc éolien proche du littoral, coïncidant avec le cycle de reproduction de la colonie voisine et associés à des vols vers des zones d'alimentation situées à environ 50 km.
- o Pearce - Higgins *et al.* (2009) en comparant les données de 12 parcs éoliens de montagne au Royaume-Uni, ont observé que certaines espèces, telles que le pluvier doré (*Pluvialis apricaria*) et la bécassine des marais (*Gallinago gallinago*) évitaient considérablement les turbines ainsi que les routes d'accès.

- o Par contre, Devereux *et al.*, (2008) ont indiqué que la majorité des oiseaux hivernant sur les terres agricoles au Royaume-Uni ne sont probablement pas affectés par les éoliennes en fonctionnement
- o Une étude plus récente utilisant des balises GPS à haute résolution sur le busard Saint-Martin (*Circus pygargus*) a fait état d'un taux d'évitement des turbines de 93,5 % (Schaub *et al.*, 2020).
- o Dans d'autres études, les pygargues à queue cunéiforme (*Aquila audax*) et les pygargues à ventre blanc (*Haliaeetus leucogaster*) ont adapté leur comportement d'évitement en fonction du stade de développement du parc éolien (Schuster *et al.*, 2015).

#### • Impacts sur les chauves-souris

Alors que la plupart des études ont porté sur la mortalité des chauves-souris par collision, très peu ont quantifié la perte d'utilisation des habitats résultant de l'impact négatif potentiel des éoliennes (Barré *et al.*, 2018). Les impacts sur les chiroptères découlant de l'altération ou de la destruction d'habitats peuvent être importants, en particulier pour les parcs développés en forêt mixte (LPO, 2019). Néanmoins, des différences dans les résultats des études analysées suggèrent qu'il y a deux effets des éoliennes, l'un répulsif à l'échelle du parc éolien et l'autre attractif à l'échelle de l'éolienne elle-même (Millon *et al.*, 2015). Certaines espèces évitent les parcs éoliens en fonctionnement (Barré *et al.*, 2018 ; Horn *et al.*, 2008 ; Millon *et al.*, 2015) tandis que d'autres indiquent un comportement d'attraction alimentaire, pour le perchoir et la reproduction (Cryan *et al.*, 2014 ; Foo *et al.*, 2017 ; Long *et al.*, 2011).

**Question de recherche** : Des évaluations des pertes d'habitats dues aux parcs éoliens ou aux éoliennes individuelles manquent encore pour mieux estimer l'impact de ces infrastructures sur la biodiversité (Barré *et al.*, 2018 ; Millon *et al.*, 2015, 2018 ; Minderman *et al.*, 2017 ; Minderman *et al.*, 2012).

- o L'interférence des migrations avec les dispositifs éoliens, pour certaines espèces d'oiseaux et de chauves-souris, est une des incidences la mieux documentée et la plus étudiée.
- o Plusieurs études documentent une diminution de l'activité des chauves-souris à l'intérieur d'un parc éolien par rapport à l'extérieur du parc (Millon *et al.*, 2018).
- o L'effet d'évitement semble affecter la plupart des espèces de chauves-souris, des groupes et des guildes dans un large rayon (allant jusqu'à 1000 m autour de chaque éolienne), y compris les chauves-souris glaneuses et d'autres espèces qui ne sont, par ailleurs, généralement pas considérées comme sensibles aux collisions (Barré *et al.*, 2018). Ceci pourrait gravement affecter les espèces de chauve-souris en Europe en diminuant la disponibilité de leurs habitats (Barré *et al.*, 2018). Les raisons de l'évitement pourraient être la présence de lumières et de bruit entourant les turbines (Barré *et al.*, 2018). Il y aurait ainsi 2400 km de haies perdues par les chauves-souris sur la base des relevés de terrains en Bretagne et Pays de Loire (FRB 2017).
- o La principale raison de l'attraction des chauves-souris semble être la présence d'un grand nombre d'insectes proies à proximité des turbines, attirés par la couleur et l'émission de chaleur de la turbine (Long *et al.*, 2011). Une surveillance acoustique de l'activité de recherche de nourriture, y compris les bourdonnements d'alimentation indiquant la capture de proies, à proximité immédiate des tours des éoliennes, a révélé que les chauves-souris étaient attirées par les éoliennes pour la recherche de nourriture (Foo *et al.*, 2017) : la majorité des estomacs des cadavres de chauves-souris rousses (*Lasiurus borealis*) et de chauves-souris cendrées (*Lasiurus cinereus*) étaient pleins ou partiellement pleins, indiquant que les individus avaient probablement été tués alors qu'ils cherchaient de la nourriture. Toutefois, Les résultats de Reimer *et al.*, (2018) ne confirment pas l'hypothèse de l'attraction alimentaire pour les chauves-souris à poil argenté (*Lasionycteris noctivagans*) ou les chauves-souris vénéneuses (*Lasiurus cinereus*) et suggèrent que si certaines chauves-souris cherchent leur nourriture à proximité des éoliennes, elles ne sont pas spécifiquement attirées par les éoliennes pour se nourrir. Certaines chauves-souris peuvent être attirées vers les turbines par des congénères à des fins d'accouplement ou pour se percher, en particulier les chauves-souris arboricoles qui perçoivent les éoliennes comme des arbres (Cryan *et al.*, 2014 ; Cryan & Barclay, 2009). L'importance relative de chaque facteur attirant les chauves-souris vers les éoliennes fluctue selon l'espèce considérée, le sexe et l'âge des individus, la période de l'année ou l'emplacement des éoliennes (Reimer *et al.*, 2018).

**Questions de recherche :**

- Mieux caractériser les effets sur les populations des déplacements /évitements (par exemple, les changements dans l'emplacement des gîtes et les trajectoires de vol en réponse aux parcs éoliens), mais aussi sur d'autres effets sur l'habitat (par exemple, les effets sur le rendement de la reproduction et les populations de proies) (Wellig *et al.*, 2018).
- Quantifier la perte de l'habitat et d'alimentation lié à l'évitement en tant que menace potentiellement importante pour la conservation des chauves-souris (Millon *et al.*, 2018) et des oiseaux.
- Mieux connaître l'emplacement des zones de migration et mieux évaluer les taux d'évitement des oiseaux migrateurs et des chauves-souris et de la mortalité qui leur est associée.
- Étudier les effets à long terme, par exemple l'accoutumance et les réponses/effets sur les espèces.
- Évaluer l'efficacité des seuils de distance pour la construction d'éoliennes à proximité des habitats (haies, lisières de forêt).
- Mieux comprendre les effets cumulatifs, en plus des effets locaux, lors de la planification du développement de parcs éoliens à l'échelle régionale (Roscioni *et al.*, 2013 ; Schuster *et al.*, 2015 ; Wilson *et al.*, 2010) afin de déterminer leurs impacts sur les populations de chauves-souris et d'oiseaux (MacGregor & Lemaitre, 2020).

**LES AUTRES PRESSIONS DOCUMENTÉES SONT L'EFFET BARRIÈRE ET LA POLLUTION SONORE****• Effet barrière**

Les espèces qui migrent quotidiennement et qui passent plus fréquemment devant les parcs éoliens, comme les oies, les échassiers et les grues cendrées (*Grus grus*), la cigogne noire (*Ciconia nigra*) sont plus affectées par l'effet barrière (Schuster *et al.*, 2015). Cela implique que les grands parcs éoliens pourraient limiter les trajets quotidiens et donc déconnecter l'alimentation potentielle des sites de perchage, ce qui entraînerait une perte d'habitat, en particulier pour les chauves-souris (Roeleke *et al.*, 2016).

**• Perturbations liées au bruit**

Le bruit émis par les activités de construction peut endommager les capacités auditives de certaines espèces sensibles au bruit comme certaines espèces de chauve-souris (grand murin ou oreillards) affectant ainsi la recherche de nourriture pour ces espèces qui chassent régulièrement en écoute passive (DREAL, 2017).

L'impact auditif des turbines pourrait entraîner un effet de masquage acoustique diminuant la capacité des oiseaux à communiquer vocalement (Gómez-Catasús *et al.*, 2018) ce qui pourrait avoir un impact sur la défense de leurs territoires (Zwart *et al.*, 2016), l'appariement ou les appels à la survie, avec des conséquences directes sur les densités de reproduction et le succès de la reproduction (Gómez-Catasús *et al.*, 2018).

Une étude sur le comportement acoustique des alouettes (*Alauda arvensis*) au démarrage des éoliennes a révélé un changement de fréquence des chants résultant du bruit émis lors du fonctionnement des éoliennes (Szymanski *et al.*, 2017). Cela montre qu'un changement des paramètres des chants peut, de manière fiable et dans un délai relativement court, indiquer une détérioration significative de l'environnement acoustique suite au démarrage du parc éolien (Szymanski *et al.*, 2017).

**Question de recherche :** Identifier les effets sublétaux et comportementaux du bruit et des champs électromagnétiques

# HYDROELECTRICITE

De nombreuses pressions des installations hydroélectriques sur la biodiversité ont été documentées, parmi lesquelles, la fragmentation des habitats (notamment pour les vertébrés), la disparition d'écosystèmes (lors de la mise en eau des barrages) y compris dans les espaces protégés, la perturbation des flux hydriques en amont et en aval des installations, la perturbation des voies migratoires de certaines espèces de poissons, la détérioration de la qualité de l'eau en raison des changements dans la charge en sédiments, la turbidité et l'eutrophisation, les émissions de gaz à effets de serre. Les impacts multiples des centrales hydroélectriques entraînent généralement des dommages à l'intégrité écologique des écosystèmes, ce qui se traduit par la disparition d'espèces aquatiques et par la perte de faune (Hudek *et al.*, 2020).

## Questions de recherche :

- Bien que les impacts écologiques des grands barrages soient relativement bien connus, les effets des petites centrales hydroélectriques et de leurs déversoirs ont été beaucoup moins étudiés (Benejam *et al.*, 2016). Par conséquent, il subsiste des lacunes dans les connaissances des impacts cumulatifs sociaux et environnementaux de la petite hydroélectricité (Kelly-Richards *et al.*, 2017), ainsi que des recherches pour combler les manques de données sur la taxonomie et les habitudes de reproduction des espèces concernées.
- Meilleure compréhension de l'ampleur de l'extinction probable de la faune aquatique induite par les processus de construction des barrages via des acquisitions de connaissances sur la taxonomie, les habitudes de reproduction, la productivité et la dynamique saisonnière (Lees *et al.*, 2016).
- Effets cumulatifs et synergiques de plusieurs barrages et des autres développements au sein du bassin hydrographique

## LA PREMIERE PRESSION EST LA FRAGMENTATION ET LA PERTE D'HABITAT

Plusieurs études ont révélé que, globalement, les projets hydroélectriques peuvent être un facteur important de perte, de changement et de fragmentation des habitats (Anderson *et al.*, 2008, 2018 ; Gracey & Verones, 2016 ; Hertwich, *et al.*, 2015), par perte de connectivité hydrologique latérale (rivière-rivière/plaine d'inondation), longitudinale (eaux d'amont - estuaire) et verticale (rivière - eaux souterraines) (Gracey & Verones, 2016). Toutes les installations hydroélectriques contenant des barrières structurelles à la migration (grands barrages, petits barrages/barrages de faible hauteur, déversoirs (structures construites pour dévier ou évacuer l'eau retenue par un barrage) provoquent des fragmentations longitudinales (Noonan *et al.*, 2012).

En outre, les installations hydroélectriques sont généralement accompagnées de vastes zones inondées situées en amont, engendrant des pertes directes de milieux par destruction, des modifications des habitats riverains non immergés (occupation des terres, suppression de la végétation rivulaire) ainsi que la fragmentation latérale des habitats (Benchimol & Peres, 2015 ; CE, 2018).

Les effets de la fragmentation des rivières aux États-Unis ont été responsables de la disparition ou l'extinction d'espèces, dont 200 populations de saumon génétiquement unique dans le fleuve Columbia (McAllister *et al.*, 2001). Les infrastructures physiques de l'hydroélectricité (barrages, déversoirs, tunnels, routes d'accès, centrale électrique, réservoirs, etc.) entravent les mouvements de nombreuses espèces en bloquant les zones de frai pour les poissons (Chen *et al.*, 2020 ; Sá - Oliveira *et al.*, 2015), mais également de certaines espèces de macro-invertébrés benthiques, d'insectes ou de mammifères semi-aquatiques (Golden *et al.*, 2019 ; Gracey & Verones, 2016 ; Souchon & Nicolas, 2011). En effet, les barrages interrompent à la fois les couloirs de migration parce qu'ils présentent des barrières physiques et que leur fonctionnement crée une variation temporelle du débit d'écoulement d'eau, non naturel, avec des fluctuations qui ne sont pas synchronisées avec les schémas historiques et/ou saisonniers (Anderson *et al.*, 2018). Par conséquent, les barrages situés loin en amont peuvent influencer le comportement migratoire des poissons carraïformes et siluriformes en perturbant les signaux hydrologiques auxquels ils répondent depuis des milliers d'années (Anderson *et al.*, 2018). Ce qui peut entraîner une fragmentation de l'habitat et un déclin des populations de poissons (Chen *et al.*, 2020) le long du continuum fluvial (Sá - Oliveira *et al.*, 2015).

Par ailleurs, les centrales hydroélectriques induisent d'autres effets sur le milieu tels que la disparition de la couverture végétale suite à la mise en eau du réservoir, ou encore l'accumulation de matière

organique dans le sol, associée à un moindre renouvellement des eaux au niveau du réservoir (Thórhallsdóttir, 2007).

La construction d'infrastructures (barrage, tunnels, canaux, centrale électrique, routes d'accès, etc.) entraîne également une fragmentation de l'habitat terrestre (Gracey & Verones, 2016) et provoque des pertes de couverture terrestre d'une ampleur similaire à celle de la submersion (Pandit & Grumbine, 2012).

Ces pertes d'écosystèmes terrestres entraînent :

- La perte de la capacité de séquestration du carbone, qui à son tour a un impact sur le cycle du carbone et donc la biodiversité au sens large (Briones-Hidrovo *et al.*, 2020).
- Des inondations, des glissements de terrain, l'introduction d'espèces non indigènes (Benejam *et al.*, 2016 ; Kelly-Richards *et al.*, 2017) qui perturbent fortement certaines espèces de faune et flore benthique en affectant leur survie, leur capacité de reproduction, d'alimentation, de repos, de dispersion et de migration, voire en entraînent leur départ et l'interruption de l'utilisation de l'habitat (CE, 2018).
- L'altération de l'habitat physique due à la construction du barrage perturbe le cycle de vie des organismes des cours d'eau tels que les poissons (Benejam *et al.*, 2016) et peuvent menacer celles qui sont adaptées aux environnements fluviaux (Hertwich, *et al.*, 2015) en obstruant les voies de migration, et en modifiant les régimes thermiques ou les habitats d'alevinage (Zhai *et al.*, 2010).
- La perte de poissons et de crustacés diadromes (espèces qui migrent entre les habitats d'eau douce et d'eau salée) et potamodromes (espèces migratrices limitées aux eaux douces) qui a des répercussions en cascade sur les transferts de nutriments en amont et en aval (Golden *et al.*, 2019; Lees *et al.*, 2016) et dans des cas particuliers des effets négatifs sur la santé humaine, par la modification des relations prédateurs-proies lorsque ces dernières sont vectrices de maladies (Sokolow *et al.*, 2017).

Les réservoirs hydroélectriques réduisent l'habitat disponible pour les espèces terrestres, mais créent toutefois de nouveaux habitats d'eau libre et de lacs riverains qui peuvent potentiellement stimuler les populations d'espèces aquatiques et semi-aquatiques (ARCADIS, 2011), comme la loutre géante (*Pteronura brasiliensis*), une espèce menacée (Palmeirim *et al.*, 2014). Selon le degré de fragmentation et d'altération hydrologique dans le bassin versant, les effets en aval pourraient être modérés ou inclure la disparition complète des taxons sensibles ou migrants (Gracey & Verones, 2016). Par exemple, la conversion d'un environnement fluvial en environnement lacustre offrira des possibilités à certaines espèces de périphyton, tout en détruisant l'habitat d'autres espèces (ARCADIS, 2011). Ainsi, une perte d'habitats et des ressources associées disponibles pour les animaux peut entraîner une simplification et une homogénéisation de la biodiversité, qui présentera une dominance plus élevée de certains groupes (Ruocco *et al.*, 2019).

## LA SECONDE PRESSION EST LA PERTURBATION DE LA DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE

Les sédiments constituent des habitats divers qui, directement ou indirectement, permettent à une grande variété d'espèces d'exister (CE, 2018). Les sédiments sont un élément naturel des écosystèmes aquatiques et sont essentiels aux fonctions hydrologique, géomorphologique et écologique de ces systèmes (CE, 2018). Les travaux d'entretien des déversoirs et des barrages comportant le dragage périodique des sédiments (surtout en été, lorsqu'il y a pénurie d'eau) peuvent aussi porter atteinte à certains habitats et espèces s'ils ne sont pas bien maîtrisés (CE, 2018).

Les structures transversales, telles que les déversoirs et les barrages, ont tendance à rompre la dynamique sédimentaire naturelle (CE, 2018) et à entraîner :

- La suppression de niches pour de nombreuses espèces (Nilsson *et al.*, 2010 ; Sá - Oliveira *et al.*, 2015) due à la perturbation de l'acheminement en aval des nutriments vers les plaines d'inondation, les lacs, les zones humides, les environnements marins côtiers (Maavara *et al.*, 2015) et le substrat formant l'habitat (Finger *et al.*, 2006).
- La croissance d'algues et d'autres plantes aquatiques à la faveur de l'accumulation des sédiments en amont qui détruisent les habitats et évincent les espèces protégées (CE, 2018).
- Le piégeage des sédiments qui participe à l'érosion côtière à grande échelle, la perturbation des réseaux alimentaires et la destruction, au niveau local, de structures hydromorphologiques importantes telles que les bancs de gravier (CE, 2018 ; Chen *et al.*, 2020 ; Gracey & Verones, 2016).

- *L'accumulation de sédiments limoneux sur le lit des cours d'eau ou dans la colonne d'eau peut être particulièrement préjudiciable aux espèces lithophiles (espèces déposant leurs œufs sur ou sous des galets ou du gravier grossier) telles que l'ombre Thymallus thymallus, qui utilisent ces espaces comme zones de frai, pour la moule perlière Margaritifera margaritifera et la mulette épaisse Unio crassus (CE, 2018). Elle nuit également à certaines espèces d'oiseaux, telles que le pluvier et la bécasse, qui font leur nid sur un lit de gravier sec (CE, 2018).*

## LA TROISIEME PRESSION EST LA MODIFICATION HYDROLOGIQUE DU REGIME D'ECOULEMENT NATUREL ET DE LA QUALITE DE L'EAU

Le débit des rivières contrôle la diversité et la disponibilité des habitats (Benejam *et al.*, 2016). La modification du débit peut réduire ou altérer l'étendue de l'habitat aquatique ainsi que sa connexion avec les habitats rivulaires (CE, 2018) créant des conditions de vie inappropriées pour une grande variété d'espèces de poissons, d'écrevisses, de lamproies, de mollusques bivalves et de libellules qui sont dépendantes des habitats d'eau courante (CE, 2018).

- Un débit trop faible peut ainsi avoir diverses incidences négatives, dont :
  - L'assèchement des frayères des poissons et lamproies ou le mauvais développement des œufs et des juvéniles
  - Des difficultés de migration des poissons vers l'amont dans le tronçon court-circuité (partie située entre la prise d'eau (le barrage) et la restitution (la centrale électrique)), soit en raison des blocages aux périodes de basses eaux, soit du fait de l'absence des stimuli nécessaires pour inciter les poissons à migrer (CE, 2018).
  - Une augmentation excessive de la température de l'eau et une mauvaise oxygénation de celle-ci (CE, 2018).
  - Des altérations des fonctions et services écosystémiques associés aux cours d'eau comme la régulation des flux sédimentaires, hydriques, organiques, la régulation thermique, la dépollution, les équilibres dynamiques des zones aval fluviales et côtières (Souchon & Nicolas, 2011).
- Des fluctuations de grande ampleur du débit peuvent causer des dommages importants aux espèces :
  - L'échouage de poissons dans les zones de faible niveau d'eau,
  - L'isolement des poissons dans des bassins (avec un risque d'étouffement dû à la diminution de la concentration d'oxygène),
  - La dérive des organismes aquatiques (ARCADIS, 2011), surtout dans les petits cours d'eau (CE, 2018 ; Hertwich, *et al.*, 2015).
  - Les installations dites d'« éclusées » créent du stress chez les organismes vivant dans les parties touchées du cours d'eau, en particulier chez ceux qui ne sont pas en mesure de supporter des variations brutales de niveau d'eau, tels que les juvéniles chez les poissons ou d'autres organismes statiques (en particulier, certaines plantes) ou se déplaçant lentement (CE, 2018).
  - La pratique de l'hydropeaking (fluctuation délibérée du débit en aval des barrages affectant l'ampleur, la durée, le moment et la fréquence du débit pour répondre à la demande d'électricité de pointe) peut modifier la morphologie des berges et des canaux par l'érosion et en altérant des variables hydrologiques telles que la profondeur de l'eau, la zone mouillée, la composition du substrat, les matières en suspension, la température, la structure de l'habitat (Gracey & Verones, 2016).
  - L'effet le plus profond de l'hydropeaking est la mortalité directe par la dessiccation (échouage) des organismes à différents stades de leur vie (Gracey & Verones, 2016).
  - Les effets sublétaux (effets à long terme pouvant entraîner la mort) tels que la dégradation de l'habitat, le stress physiologique, le déplacement en aval, l'augmentation de la prédation et la modification du comportement peuvent nuire aux espèces (Gracey & Verones, 2016).

Les expériences menées au Brésil suggèrent que les prélèvements dans les réservoirs entraînent des modifications temporaires de la structure des communautés, mais que les assemblages d'espèces restent intacts (Thomaz *et al.*, 2006), probablement car les réservoirs sont des écosystèmes modifiés par l'homme.

- La dérivation de l'eau pour les centrales hydroélectriques (Barrages et petites centrales) affecte les caractéristiques de l'habitat (Benejam *et al.*, 2016 ; Palmeirim *et al.*, 2014 ; Zhai *et al.*, 2010) et la structure des biotes terrestres (Lees *et al.*, 2016).
  - o Benejam *et al.* (2016) ont indiqué que la composition des espèces a été affectée par le détournement de l'eau dans les petites centrales hydroélectriques, avec une abondance relative plus faible de truites (*Salmo trutta*) et de ménés (*Phoxinus phoxinus*) dans les tronçons touchés et une présence plus importante de barbeau de roche (*Barbatula barbatula*) et de barbeau de méditerranée (*Barbus meridionalis*) qui sont des faunes généralistes et opportunistes plus résilientes à la modification du régime d'écoulement naturel.
  - o Par contre, les centrales au fil de l'eau peuvent avoir des impacts plus faibles sur le régime d'écoulement de l'eau et la qualité de l'eau, mais toujours un certain impact écologique (Jager & Bevelhimer, 2007 ; SNIFFER, 2011).

**Questions de recherche :**

- Meilleure surveillance des masses d'eau
- Évaluation de l'efficacité des mesures de réduction (par exemple, l'efficacité des passes à poissons),
- Meilleure connaissance des effets de la disponibilité de l'eau et de la perte d'intégrité des écosystèmes

**D'AUTRES PRESSIONS ONT ÉTÉ DOCUMENTÉES, LA MODIFICATION DES PARAMÈTRES PHYSICOCHIMIQUES DE L'EAU, ET LA MORTALITÉ DIRECTE**

- Les centrales hydroélectriques peuvent modifier les paramètres physico-chimiques de l'eau comme la température, le taux de matière organique, les nutriments, la turbidité, la teneur en oxygène dissous (Gracey & Verones, 2016 ; Souchon & Nicolas, 2011 CE, 2018 ; Hertwich, *et al.*, 2015) qui entraînent :
  - o l'augmentation des densités de phytoplancton,
  - o une augmentation de la sédimentation des matières organiques autochtones (Maavara *et al.*, 2017),
  - o le développement d'une eau hypoxique au-dessus des sédiments,
  - o la transformation du nitrate en ammonium,
  - o l'augmentation de l'exportation en aval de ces nutriments biodisponibles dans l'eau rejetée par le fond du barrage (Chen *et al.*, 2020),
  - o la variation des communautés d'organismes influencés par les fluctuations thermiques de l'eau et les variations de concentration de l'oxygène qui en découlent (CE, 2018),
  - o une baisse de la viabilité des larves de poissons, tant pour les espèces migratrices que non migratrices (Anderson *et al.*, 2008), notamment en raison des changements de température de l'eau,
  - o des proliférations d'algues (eutrophisation), culminant dans les mois les plus chauds avec des conditions anoxiques ou hypoxiques pendant et après le processus de décomposition (Gracey & Verones, 2016; Hertwich, *et al.*, 2015; Souchon & Nicolas, 2011),
  - o l'apparition de cyanobactéries dans les communautés phytoplanctoniques des réservoirs en aval aux températures chaudes (Chen *et al.*, 2020).

• Mortalité directe

Les lignes électriques sont responsables de mortalité directe de certaines espèces, notamment les oiseaux (CE, 2018). Leurs sites de reproduction peuvent aussi être fortement perturbés par le trafic régulier sur les voies d'accès (CE, 2018) les voies de migration des oiseaux peuvent être modifiées (Gracey & Verones, 2016).

Les centrales hydroélectriques, les turbines et les déversoirs peuvent infliger des blessures graves, voire mortelles, aux poissons (Pander *et al.*, 2018) par impact physique, différence de pression ou abrasion avec les aubes directrices, la roue de la turbine ou le carter de la turbine. Les poissons deviennent plus sujets à la prédation en aval en raison de la désorientation au passage de la turbine (ARCADIS, 2011). D'autres espèces aquatiques sont aussi concernées (CE, 2018).

# ENERGIE MARINE, EOLIENNE ET DISPOSITIFS MAREMOTEURS

Les principaux effets identifiés des dispositifs d'énergie marine sur la faune de vertébrés de ces milieux (oiseaux de mers, mammifères, requins) sont les blessures ou les mortalités par collision sous-marine avec les dispositifs (Tricas & Gill, 2011) ou chocs thermiques, le déplacement résultant de la perte ou la modification de la structure de l'habitat ou du comportement des proies (Copping *et al.*, 2016; ICES, 2019; Margheritini *et al.*, 2012), la perturbation (par exemple en raison de l'augmentation du trafic maritime associé à l'entretien) et la consommation accrue des réserves d'énergie pendant la migration en raison des réactions d'évitement (Margheritini *et al.*, 2012) et des changements de composition des communautés de poissons benthiques en raison de pertes d'habitats.

Ces effets sont dus à la perturbation des milieux par des pressions variées pendant les phases de construction, fonctionnement ou démantèlement et notamment la pollution sonore, la modification des processus hydrodynamiques et de sédimentation, l'augmentation de la turbidité dans la colonne d'eau due aux perturbations des fonds marins, les changements dans la salinité et les afflux d'eau plus oxygénée dans les structures marémotrices, la pollution électromagnétique associée aux câbles sous-marins, la pollution chimique provenant de lubrifiants et peintures toxiques, la collision des oiseaux avec les éoliennes marines, les chocs thermiques générés par certaines installations entraînant la mortalité directe de poissons et la mise en eau permanente des portions des estuaires situés en amont des structures marémotrices.

## Questions de recherche :

Avec les récents développements à grande échelle des installations d'énergies renouvelables marines, davantage de recherches sont nécessaires pour réduire l'incertitude quant aux effets environnementaux de ces dispositifs sur les espèces et notamment :

- Mieux comprendre les effets à long terme sur la biodiversité, par exemple l'accoutumance (Schuster *et al.*, 2015) et évaluer si ces effets (champs magnétiques, perturbation acoustique etc.) sont similaires pour les individus d'une même population (c'est-à-dire s'il existe des différences d'âge, de stade morphologique ou de sexe) (Gill & Bartlett, 2010) .
- Mieux comprendre l'ensemble des impacts réels cumulés des parcs éoliens offshore, par exemple quantifier les effets des interactions physico-biologiques (Carpenter *et al.*, 2016) ainsi que les effets sur la chaîne trophique de toute augmentation de la production (Floeter *et al.*, 2017) ;
- Comblent les principales lacunes en matière de connaissances sur les espèces marines benthiques (par exemple les crustacés décapodes importants sur le plan écologique, les poissons, la mégafaune) et les interactions entre eux afin de mettre au point des approches et des orientations pratiques permettant d'entreprendre une évaluation appropriée des effets cumulés (Fraser *et al.*, 2018; ICES, 2019; Scott *et al.*, 2018; Williamson *et al.*, 2019) et de comprendre si les changements dans les populations sont dus à la variabilité naturelle du système benthique dans l'espace et le temps ou aux dispositifs d'énergie océanique (Dannheim *et al.*, 2019) ;
- Evaluer les différents seuils de sensibilité d'espèces pertinentes (cétacés, pinnipèdes, poissons, crustacés et de nombreuses espèces pélagiques) à différents stades de leur développement (Taormina *et al.*, 2018) ;
- Mettre au point et évaluer les innovations technologiques en matière d'équipement de surveillance (équipement visuel (caméras), capteur acoustique (hydrophone)) pour approfondir les études sur les interactions environnementales avec les réseaux d'énergie marémotrice et déterminer la viabilité des développements de co-localisation dans les zones écologiquement sensibles (Sangiuliano, 2018)

## LA PRESSION LA PLUS DOCUMENTEE EST LA POLLUTION SONORE ET VIBRATOIRE

Les activités de construction, telles que le battage de pieux, les sondages, les forages et l'augmentation du trafic maritime génèrent des sons de haute intensité et des niveaux de pression acoustique importants qui peuvent affecter de manière permanente l'ouïe d'un animal, endommager des tissus sensibles ou affecter son comportement (Copping *et al.*, 2016 ; Margheritini *et al.*, 2012 Tougaard,

2015). Les plus grandes inquiétudes concernent le potentiel de masquage des sons d'écholocation (Buscaino *et al.*, 2019) émis par les mammifères marins pour la communication et la navigation (Copping *et al.*, 2016 ; Pine *et al.*, 2019). Cependant, ces activités ont tendance à être de courte durée.

Des réactions comportementales, notamment la peur, l'évitement et des changements de comportement et de vocalisation ont été observées chez les baleines à fanons, les odontocètes et les pinnipèdes ; dans certains cas à une distance de dizaines ou de centaines de kilomètres des bruits industriels forts (Margheritini *et al.*, 2012).

#### • **Battage des pieux**

Les niveaux de bruit les plus forts et les plus perturbateurs sont associés au battage de pieux pour l'installation des dispositifs, bien que la plupart de ces dispositifs ne nécessitent probablement que de petits pieux ou des pieux à goupilles, dont l'installation génère beaucoup moins de bruit que celle requise pour installer des pieux de taille normale pour l'éolien offshore ou d'autres activités industrielles dans l'océan (Copping *et al.*, 2016).

Pendant la phase de travaux et d'implantation des éoliennes en mer, les marteaux qui servent à enfoncer les pieux dans les fonds marins produisent un bruit très intense qui nuit à de nombreuses espèces, en particulier aux mammifères marins. Ces installations peuvent durer des mois et provoquer des dégâts irréversibles chez certaines espèces qui ne peuvent pas s'échapper de la zone de travaux. L'intensité du bruit généré par ce battage de pieux se rapproche de celle des explosions sous-marines. Les animaux sensibles au bruit trop proches des travaux peuvent en mourir. Ceux qui sont éloignés de quelques centaines de mètres peuvent subir des blessures irréversibles de leur appareil auditif et un dérangement peut s'observer chez ceux qui sont encore plus loin. On a par exemple constaté que les marsouins s'éloignent de 20 à 25 km de la zone de chantier et y reviennent lorsque que les travaux sont terminés. Si aucun épisode de mortalité massive d'invertébrés au moment des travaux n'a à ce jour été documenté, il est établi que certaines espèces sont sensibles au bruit et leur croissance peut par exemple être temporairement perturbée.

#### • **Bruits en fonctionnement**

Les bruits produits pendant le fonctionnement des dispositifs marémoteurs ainsi que le transport maritime pendant la phase de maintenance peuvent être préoccupants pour les animaux marins qui utilisent le son pour la communication, la navigation et la chasse (Buscaino *et al.*, 2019 ; Copping *et al.*, 2016; Margheritini *et al.*, 2012). Les risques peuvent inclure :

- des changements des comportements de chasse, élevage, accouplement, repos ;
- des changements dans les schémas migratoires si le bruit généré est suffisant (Copping *et al.*, 2013; Dannheim *et al.*, 2019; Margheritini *et al.*, 2012);
- des dommages potentiels au niveau du système auditif (Margheritini *et al.*, 2012).

Les poissons peuvent également être menacés s'ils sont attirés par un dispositif par sa présence physique ou le son qui en émane (Copping *et al.*, 2016). Des dommages physiologiques, temporaires ou permanents pourraient sérieusement affecter la survie ultérieure des poissons (Margheritini *et al.*, 2012). Le masquage des signaux des poissons pourrait avoir des conséquences au niveau des individus et des populations, notamment si la période pendant laquelle les sons ont été enregistrés pourrait correspondre à la parade nuptiale et au frai (Buscaino *et al.*, 2019). Un certain nombre de travaux ont montré que le bruit enregistré par les convertisseurs d'énergie des vagues est audible par les espèces marines telles que les poissons (Royal Haskoning, 2011), les crustacés (Pine *et al.*, 2012) et les pinnipèdes (Tougaard, 2015), mais ce bruit est probablement en dehors de la zone audible des baleines à dents (Tougaard, 2015). Toutefois, les effets du bruit généré dépendent de la sensibilité de chaque espèce, de leur capacité à s'habituer au bruit et de leur état comportemental (Buscaino *et al.*, 2019).

#### **Questions de recherche :**

- Identifier des effets sublétaux et comportementaux du bruit des installations d'énergies marines et leurs conséquences pour les populations de poissons par le biais des effets sur les succès de la reproduction, l'alimentation et des interférences avec les voies de migration à l'échelle de la haute mer (Wilson *et al.*, 2010).
- Déterminer s'il existe des effets tels que l'attraction ou l'évitement (à court ou à long terme) et la mortalité associée, chez chaque espèce d'intérêt, par exemple les poissons comme les anguilles ou les truites (Gill & Bartlett, 2010), les oiseaux migrateurs (Plonczkier & Simms, 2012) et les oiseaux de mer (Dierschke *et al.*, 2016).

## LA SECONDE PRESSION CONCERNE LES PERTURBATIONS HYDRODYNAMIQUE ET SEDIMENTAIRE

De façon générale, tout changement des conditions sédimentaires et hydrodynamiques des fonds marins affecte les habitats essentiels des poissons, tels que les zones de nourricerie, les frayères et les routes de migration (ICES, 2019).

Par exemple, comme les dispositifs marémoteurs et houlomoteurs extraient de l'énergie cinétique, cela entraîne probablement une modification hydrodynamique, c'est-à-dire des changements dans le mouvement et la turbulence de l'eau (ICES, 2019 ; Neill *et al.*, 2017). Par conséquent, les voies physiques de transport des fonds marins et des sédiments (morphodynamique) pourraient changer, entraînant des modifications dans le dépôt net et l'érosion des côtes (Neill *et al.*, 2017) et des bancs de sable offshore, ainsi que des changements bathymétriques et géomorphologiques à plus grande échelle (ICES, 2019 ; Leeney *et al.*, 2014).

- Des changements dans la disponibilité des proies de poissons peuvent être liés à la modification hydrographique par les dispositifs d'énergies (y compris les câbles), avec des conséquences pour les oiseaux de mer (Broadhurst & Orme, 2014 ; Dannheim *et al.*, 2019 ; Martin-Short *et al.*, 2015).
- Certaines espèces peuvent être impactées par la turbidité induite par la mise en suspension des sédiments lors de la pose des câbles
- C'est le cas du maërl, ces algues calcaires roses, qui créent des habitats extrêmement riches pour la biodiversité. Ces espèces, comme toutes celles qui pratiquent la photosynthèse, sont extrêmement sensibles à la re-déposition de particules fines mises en suspensions au moment où l'on enfouit les câbles dans le fond marin. Or ces espèces croissent très lentement (de l'ordre de 1 mm par an pour le maërl). Il devient alors très difficile de restaurer ces milieux.
- Les habitats essentiels des poissons et autres espèces aquatiques ainsi que les voies de migration peuvent être affectés par les perturbations et modifications des fonds marins (ICES, 2019 ; Margheritini *et al.*, 2012, (ICES, 2019) dues aux installations. Les composants statiques peuvent entraîner l'affouillement des sédiments du lit, en raison des modifications des mouvements des courants autour de la structure. Ainsi, les câbles du fond marin qui ne sont pas enterrés pourraient provoquer un affouillement localisé du fond marin (Copping *et al.*, 2016 ; ICES, 2019). Ces changements pourraient avoir de profondes ramifications biologiques :
  - o La modification des habitats benthiques et le dépôt de sédiments (Fallon *et al.*, 2014 ; Leeney *et al.*, 2014 ; Margheritini *et al.*, 2012).
  - o La modification des taux d'oxygène dans les plans d'eau fermés (Copping *et al.*, 2016).
  - o Des impacts sur la qualité de l'eau, des changements dans le mélange et la stratification de la colonne d'eau (Copping *et al.*, 2016 ; Dannheim *et al.*, 2019 ; Leeney *et al.*, 2014) affectant la production primaire avec des conséquences potentielles pour les filtreurs, les chaînes alimentaires marines et le flux de carbone vers le benthos (Dannheim *et al.*, 2019).
  - o La production primaire de phytoplancton peut être réduite en raison d'une augmentation de la turbidité réduisant la pénétration de la lumière dans la colonne d'eau et donc perturber l'ensemble des réseaux trophiques des zones proches des dispositifs (Dannheim *et al.*, 2019).
  - o En ce qui concerne la biogéochimie, des fonctions benthiques importantes telles que la bioturbation et la décomposition peuvent être affectées si la structure de la communauté benthique est modifiée (Dannheim *et al.*, 2019). Il pourrait en résulter une modification de la productivité primaire, qui pourrait affecter les flux « biogéochimiques » des espèces benthiques et l'ajout de "nouveaux acteurs" (c'est-à-dire une communauté colonisatrice sur des substrats durs artificiels), leurs activités métaboliques spécifiques affectant de manière substantielle les processus biogéochimiques essentiels au fonctionnement de l'écosystème marin local (Dannheim *et al.*, 2019).

## LA TROISIEME PRESSION EST LA POLLUTION DUE AUX CHAMPS ELECTROMAGNETIQUES

Les effets environnementaux potentiels des champs électromagnétiques ont été étudiés par plusieurs auteurs (Hutchison *et al.*, 2020 ; Scott *et al.*, 2018 ; Taormina *et al.*, 2018) montrant que les principaux impacts sont physiques (qualité de l'eau et dynamique hydro-sédimentaire) et biologiques (oiseaux, poissons, mammifères et tortues). Il a également été souligné que l'intensité et la durée de ces impacts dépendent de l'espèce victime, du dispositif et de la phase du projet (Copping *et al.*, 2016).

Les effets des impacts sur la biodiversité les mieux documentés sont :

- L'évitement avec des changements de comportement de nombreuses espèces, des décapodes aux grands élastomobranches.
- L'attraction de crustacés commercialement importants (par exemple *Cancer pagurus*) (Scott *et al.*, 2018).
- La perturbation ou l'altération de la capacité des organismes marins doués d'électroréception et/ou de magnétoréception à utiliser le champ magnétique terrestre pour l'orientation et la navigation lors de migrations à longue ou courte distance (Gill & Bartlett, 2010 ; Hutchison *et al.*, 2020; Tricas & Gill, 2011). Ceci pourrait altérer leur survie, leur succès de reproduction, leurs schémas migratoires (Copping *et al.*, 2016).
- La perturbation des interactions prédateurs/proies.
- Des effets physiologiques et de développement (Hutchison *et al.*, 2020).

Scott *et al.*, (2018) ont démontré dans leur étude que l'exposition à des champs électromagnétiques a eu des effets physiologiques importants sur l'espèce de crabe *Cancer pagurus* et a modifié son comportement. Ils ont également constaté que les niveaux de mélatonine chez plusieurs espèces étaient affectés par l'exposition aux champs électromagnétiques, suggérant que l'exposition pourrait affecter les crustacés sur un plan hormonal.

#### Questions de recherche :

- Mieux connaître l'ensemble des effets à court, moyen et long termes (attraction ou évitement) sur les espèces marines, en mettant notamment l'accent sur l'exposition des stades de vie les plus vulnérables aux différents champs électromagnétiques (sources, intensités) (Copping *et al.*, 2016). Les données sur les seuils de sensibilité ou de tolérance ne sont en effet disponibles que pour un petit nombre de taxons (Taormina *et al.*, 2018). Il s'agira notamment de mieux caractériser la réaction des mammifères marins et des tortues marines aux champs électromagnétiques (Copping *et al.*, 2016), mais aussi les poissons (anguilles, truites) (Gill & Bartlett, 2010). De même, les preuves empiriques des effets et des impacts des dispositifs d'énergie marémotrice sur les oiseaux de mer font défaut, tout comme les lignes directrices sur l'utilisation efficace des méthodes d'étude pour combler ces lacunes dans les connaissances (Copping *et al.*, 2016 ; Furness *et al.*, 2012 ; ICES, 2019).
- Caractériser les effets sublétaux et comportementaux des champs électromagnétiques et des conséquences pour les populations de poissons par le biais des effets sur l'alimentation et des interférences avec les voies de migration à l'échelle de la haute mer (Wilson *et al.*, 2010). Par exemple, l'étendue spatiale du masquage des communications de la faune marine au fil des saisons (Pine *et al.*, 2019) ;
- Conduire des études à long terme pour étudier les effets d'une exposition chronique aux champs électromagnétiques sur le développement des œufs, le succès de l'éclosion et l'aptitude des larves (Scott *et al.*, 2018).

LES AUTRES PRESSIONS DOCUMENTÉES SONT LES MORTALITÉS PAR COLLISION OU ENCHEVÊTREMENT, LA POLLUTION, LES EFFETS BARRIÈRE ET DE MODIFICATION DE L'HABITAT, LES MODIFICATIONS DES TEMPÉRATURES, LES EFFETS RECIFS

- **Les risques de collision ou d'enchevêtrements** (Furness *et al.*, 2012 ; Leeney *et al.*, 2014 ; Wade *et al.*, 2016)

Les dispositifs d'énergie océaniques peuvent entraîner la mortalité ou les blessures de certaines espèces par collision sous-marine avec les dispositifs (Tricas & Gill, 2011).

o Des études évaluant la vulnérabilité potentielle des oiseaux de mer des eaux britanniques aux dispositifs d'énergie marémotrice ont identifié (par ordre décroissant) le petit pingouin *Alca torda*, le cormoran européen, le guillemot noir, le guillemot commun *Uria aalge* et le grand cormoran *Phalacrocorax carbo* comme étant particulièrement vulnérables en raison de leur utilisation des courants de marées pour la recherche de nourriture sous la surface (Furness *et al.*, 2012 ; Wade *et al.*, 2016).

**Question de recherche :** acquérir des connaissances sur l'intensité et l'altitude des vols des oiseaux afin de permettre une estimation précise des taux de collision, des taux d'évitement et des effets connexes sur les populations (Fijn *et al.*, 2015).

- **La pollution et la lixiviation chimique**

Les dispositifs de production d'énergie océanique pourraient être responsables de la libération lente de contaminants métalliques et de biocides provenant des peintures antisalissures (Copping *et al.*, 2016 ; Taormina *et al.*, 2018). La bioaccumulation de ces contaminants par des voies trophiques pourrait affecter les performances et la survie d'organismes et de l'ensemble de la chaîne alimentaire (Copping *et al.*, 2016 ; Dannheim *et al.*, 2019). De plus, les déversements ou les rejets aigus de produits chimiques provenant de lubrifiants, de fluides hydrauliques, de carburant pour bateaux ou d'autres produits à base de pétrole peuvent affecter les animaux marins locaux (mammifères marins, poissons, oiseaux marins) et les habitats si le déversement est important et couvre une vaste zone (Copping *et al.*, 2016).

- **Les effets de barrière et de modification de l'habitat** (Copping *et al.*, 2016 ; Furness *et al.*, 2012 ; ICES, 2019 ; Margheritini *et al.*, 2012).

L'installation des dispositifs peut entraîner des destructions et des pertes d'habitats fonctionnels (habitats intertidaux et benthiques) (Copping *et al.*, 2016) en raison des dommages physiques des écosystèmes locaux au cours de l'installation des structures de soutien (y compris les lignes d'amarrage). Les câbles peuvent constituer des barrières physiques dans le cas de câbles dynamiques suspendus dans la colonne d'eau (ICES, 2019). Ces pressions entraînent des changements de comportement des animaux tels que l'évitement ou l'attraction vers la zone du projet (Copping *et al.*, 2016). Les effets qui se produisent pendant l'installation sont généralement temporaires et leur importance est proportionnelle à la quantité et au type de substrat de fond perturbé (Margheritini *et al.*, 2012).

- **Les effets des modifications de température**

Les changements de température induits par les câbles peuvent accélérer le développement des œufs de poisson (ICES, 2019). Cela peut avoir un impact sur la physiologie des organismes benthiques vivant dans les sédiments de surface (Taormina *et al.*, 2018).

**Question de recherche :** Études expérimentales combinées à la modélisation du rayonnement thermique pour combler la lacune dans les connaissances sur l'impact de l'émission thermique des câbles sur les communautés benthiques (ICES, 2019)

- **Les effets récifs/ réserves**

Si bon nombre des impacts considérés peuvent être négatifs, il existe également des impacts positifs potentiels des développements des énergies renouvelables marines (Leeney *et al.*, 2014). Les dispositifs d'énergie des océans peuvent agir comme des « récif artificiel » en fournissant des niches écologiques supplémentaires (Broadhurst *et al.*, 2014 ; Scott *et al.*, 2018 ; Taormina *et al.*, 2020), ce qui entraîne de nouvelles interactions trophiques, une augmentation de la biomasse des espèces, et des possibilités de recrutement (Dannheim *et al.*, 2019 ; Langhamer *et al.*, 2009 ; Langhamer & Wilhelmsson, 2009).

- *Par exemple, des espèces de crustacés ayant une valeur commerciale comme le homard européen (Homarus gammarus) ou le crabe tourteau (Cancer pagurus) peuvent s'abriter autour des parcs marémoteurs (Langhamer & Wilhelmsson, 2009).*

L'effet d'attraction est probablement plus fort sur les fonds à sédiments mous que sur les fonds marins à structure complexe (Taormina *et al.*, 2020). En revanche, l'effet d'attraction est limité et dès que l'on s'éloigne d'une centaine de mètres, on retombe sur les densités de poissons prévalant avant l'arrivée des installations, par ailleurs, l'augmentation de la densité des poissons et donc l'attraction des prédateurs (par exemple les oiseaux de mer et les mammifères marins) pourraient entraîner une augmentation potentielle du risque global de collision, cf début de partie (ICES, 2019).

La fermeture d'une zone offshore au transit des navires et, en particulier, aux activités de pêche, peut amener les dispositifs de production d'énergie marine renouvelable à agir comme une zone marine protégée de facto, en supprimant la pression de pêche et en permettant potentiellement aux poissons de se reproduire et de se développer et pourrait faciliter le rétablissement du milieu benthique (ICES, 2019 ; Leeney *et al.*, 2014). Néanmoins, l'amélioration de la diversité benthique associée aux récifs artificiels dépend à la fois des propriétés des récifs et des caractéristiques environnementales locales (Taormina *et al.*, 2020).

**Questions de recherche :**

- Caractériser l'effet récifal à long terme associé aux installations (Langhamer & Wilhelmsson, 2009), en particulier dans les zones à forte énergie hydrodynamique (Copping *et al.*, 2016) ;

- Comprendre si la communauté benthique des substrats durs bénéficie également d'une production primaire et secondaire pélagique localement accrue (Carpenter *et al.*, 2016) ;
- Déterminer dans quelle mesure les dispositifs d'énergie marémotrice peuvent augmenter la disponibilité des proies en agissant comme des dispositifs de regroupement des poissons et donc comme des pièges écologiques (Fraser *et al.*, 2018 ; Williamson *et al.*, 2019).

# HYDROGENE ET BATTERIE LI-ION

## HYDROGENE

Les technologies de production d'hydrogène représentent actuellement un potentiel élevé pour l'automobile à l'échelle mondiale. Toutefois, jusqu'à présent des études sur les impacts directs potentiels de ces installations sur la biodiversité font défaut. D'énormes difficultés sont rencontrées lors de la recherche documentaire pour obtenir des données sur ces impacts. Sur les 44 publications identifiées répondant aux mots clés (impact, biodiversité, hydrogène) lors de la recherche bibliographique, aucune information sur ces impacts n'a été trouvée. Les seules publications trouvées sont axées sur l'évaluation des risques des infrastructures de l'hydrogène tels que les risques d'accidents de manipulation (fuites ou explosion de stockage à hydrogène).

**Question de recherche :** Les effets de l'acidification, l'eutrophisation induits par ces infrastructures sur la santé des espèces et des écosystèmes sont peu documentés. Il importe donc pour combler ces lacunes en matière de recherche de procéder à l'évaluation appropriée de l'incidence de ces infrastructures sur la biodiversité en ce qui concerne l'état actuel de l'environnement local, les conséquences futures potentielles et la manière dont les espèces seront affectées.

## BATTERIES LI-ION

Les batteries au lithium-ion sont déjà la technologie dominante dans le secteur automobile électrique et leur part dans les systèmes énergétiques stationnaires ne cesse d'augmenter (Peters *et al.*, 2017). Les publications portent essentiellement sur la phase amont d'extraction des matières premières plutôt que sur les impacts lors de la mise en place ou l'utilisation de ces batteries. Le lithium peut être extrait des mines de roche dure (Stahl, *et al.*, 2018), des lacs salés (Marchegiani *et al.*, 2019 ; Stahl, *et al.*, 2018 ; Stamp *et al.*, 2012) et des eaux saumâtres des salines (Marchegiani *et al.*, 2019).

### • Plusieurs pressions sont documentées

L'extraction minière du lithium nécessaire pour la production des batteries exerce des pressions sur la biodiversité (Dunn *et al.*, 2015) : perte et fragmentation d'habitat résultant des changements d'utilisation des terres, modification du paysage, dégradation de la qualité de l'eau (température, turbidité, O<sub>2</sub> dissous...) (Miranda, 2003) et des écosystèmes selon le matériau extrait (Lithium, cobalt, Nickel), le site (Lac salés ou mines de roche) et la technologie appliquée (Stahl, *et al.*, 2018).

L'extraction du lithium est associée à une forte demande en eau (bassins d'évaporation dans les zones arides) et a un impact élevé sur le paysage naturel (Miranda, 2003 ; Stahl, *et al.*, 2018), sur les écosystèmes des plaines salées, affectant la flore et la faune avec des répercussions en cascades sur les activités agricoles et d'élevage dans les zones environnantes (Marchegiani *et al.*, 2019).

En outre, cette extraction génère à la fois des émissions de gaz à effet de serre, des déchets miniers acides (Miranda, 2003 ; Stahl, *et al.*, 2018) et des pollutions (stériles, boues résultant du lavage du minerai) (Miranda, 2003). Les sédiments provenant des décharges et des résidus et atteignant les cours d'eau, nuisent aux poissons et autres espèces aquatiques (Miranda, 2003). Les piles contiennent encore des substances dangereuses et présentent un risque pour la biodiversité et les écosystèmes lorsqu'elles sont mises en décharge, incinérées ou éliminées incorrectement (Stahl, *et al.*, 2018).

### • Les impacts induits sur la biodiversité

Les impacts sur la biodiversité sont notamment les déclinés de populations d'espèces par exemple de poissons et de plantes aquatiques et terrestres (Miranda, 2003). La pollution, quant à elle perturbe indirectement le cycle de vie des espèces et peut entraîner leur extinction à court (pollution aigue), moyen ou long termes (pollutions diffuse).

### Questions de recherche :

Les principaux impacts documentés des batteries Li-ions concernent la phase d'extraction des matériaux nécessaires pour la fabrication. Il importe donc que des études plus poussées soient menées sur les incidences des autres phases du cycle de vie et la façon dont les espèces et les écosystèmes seront affectés.

Il est également urgent de comprendre l'ampleur des risques miniers pour la biodiversité et les efforts pour l'éviter et d'en tenir compte de manière stratégique dans les plans et politiques de conservation (Sonter *et al.*, 2020). Des études hydrologiques et une surveillance des eaux superficielles/souterraines (par exemple surveillance de la salinité, la température, l'O<sub>2</sub> dissous...) doivent être réalisées pour calculer le bilan hydrologique et identifier une éventuelle salinisation de l'eau douce (Marchegiani *et al.*, 2019). Des études de modélisations des changements d'utilisation des terres permettraient de prévoir les menaces futures pour la biodiversité et d'étudier les conséquences potentielles des politiques conçues pour atténuer ces menaces (Sonter *et al.*, 2014). Des études supplémentaires sont nécessaires pour une compréhension systématique des conséquences spatialement explicites des diverses activités minières sur des caractéristiques spécifiques de la biodiversité, y compris celles qui se produisent dans les systèmes marins et à des distances variables des sites miniers est nécessaire pour (Sonter *et al.*, 2020).

De même, les phases de fin de vie ne sont pas suffisamment prises en compte (Pellow *et al.*, 2020). Les analyses futures devraient prendre en compte une série de scénarios de fin de vie : élimination, recyclage, re-fabrication et réutilisation (Pellow *et al.*, 2020).

### **Les débuts de réponses que scénarios et modèles peuvent apporter sur la question de la biodiversité et des énergies renouvelables**

L'utilisation de modèles intégrant variables environnementales et économiques a permis de montrer au cours de la dernière décennie que les bilans environnementaux ne sont pas aussi vertueux qu'anticipé. Les effets indirects de transmission des impacts dans d'autres régions du monde, la déforestation induite par exemple pour les biocarburants ou la surexploitation forestière dans le cas de la filière des granulés de bois, remettent parfois en question les bilans initialement vertueux de ces politiques de déploiement de la biomasse à grande échelle.

La modélisation a en revanche plus de difficultés à intégrer la biodiversité dans les études d'impact de ces filières. Les analyses de la distribution de la biodiversité ont permis de montrer qu'il y a généralement une forte congruence entre les zones susceptibles de contenir de fortes densités de carbone et celles riches en biodiversité. Mais certaines régions du monde font exception, ce qui signifie que les enjeux de carbone ne peuvent pas constituer un proxy majeur pour ce qui est de la conservation de la biodiversité.

Pour pallier à ces difficultés, des approches basées sur des variables explicites sur la biodiversité ont été développées ces dernières années par les équipes travaillant sur la modélisation de scénarios d'évolution des terres à l'échelle continentale ou mondiale. Les indicateurs retenus sont néanmoins limités à des indices de correspondances entre des types d'usage des terres (couverture paysagère, intensité d'utilisation) et un indicateur de richesse de la biodiversité. Cela affine l'évaluation de la biodiversité, mais cela signifie aussi que de nombreux autres facteurs sont aussi négligés, comme le morcellement des habitats, la dynamique des populations, les interactions au sein des écosystèmes, l'évolution de la diversité génétique, etc.

## CONCLUSION GENERALE

La littérature consultée ici montre que toutes les technologies de production d'énergie renouvelables ont des impacts plus ou moins importants sur la biodiversité. Beaucoup de questions de recherche sont encore à prendre en compte afin de pouvoir réduire les impacts actuellement observés de ces technologies sur la biodiversité.

Pour cela, une coopération entre les principaux opérateurs du domaine des énergies renouvelables serait à développer pour aborder ces questions de recherche non pas comme des obstacles, mais comme des nécessités à surmonter, et ces recherches non compétitives pourront être abordées collectivement afin de proposer les meilleures connaissances et options à destination de la société et de la biodiversité, à l'image du Club Infrastructures Linéaires et Biodiversité (CILB) pour les questions de biodiversité en lien avec les infrastructures linéaires de transport. Face aux deux principaux enjeux planétaires actuels, à savoir le changement climatique et l'érosion de la biodiversité, une nécessaire transition du secteur énergétique s'impose, mais doit rester compatible avec les efforts de réduction de l'effondrement de la biodiversité.

L'avenir est de soutenir et réaliser ces travaux de manière à ce que le développement des énergies renouvelables se fasse de façon respectueuse envers la biodiversité, afin d'aller vers une meilleure coexistence entre le développement actuellement exponentiel de ce secteur et la biodiversité.

## REFERENCES

- Abubaker, J., Cederlund, H., Arthurson, V., & Pell, M. (2013). Bacterial community structure and microbial activity in different soils amended with biogas residues and cattle slurry. *Applied Soil Ecology*, 72, 171-180. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2013.07.002>
- Albuquerque, J. A., de la Fuente, C., Ferrer-Costa, A., Carrasco, L., Cegarra, J., Abad, M., & Bernal, M. P. (2012). Assessment of the fertiliser potential of digestates from farm and agroindustrial residues. *Biomass and Bioenergy*, 40, 181-189. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.02.018>
- Anderson, E. P., Jenkins, C. N., Heilpern, S., Maldonado-Ocampo, J. A., Carvajal-Vallejos, F. M., Encalada, A. C., Rivadeneira, J. F., Hidalgo, M., Cañas, C. M., Ortega, H., Salcedo, N., Maldonado, M., & Tedesco, P. A. (2018). Fragmentation of Andes-to-Amazon connectivity by hydropower dams. *Sci. Adv.*, 4(1), eaao1642. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aao1642>
- Anderson, E. P., Pringle, C. M., & Freeman, M. C. (2008). Quantifying the extent of river fragmentation by hydropower dams in the Sarapiquí River Basin, Costa Rica. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 18(4), 408-417. <https://doi.org/10.1002/aqc.882>
- ARCADIS. (2011). *Hydropower Generation in the context of the EU WFD*.
- Aschwanden, J., Stark, H., Peter, D., Steuri, T., Schmid, B., & Liechti, F. (2018). Bird collisions at wind turbines in a mountainous area related to bird movement intensities measured by radar. *Biological Conservation*, 220, 228-236. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.01.005>
- Balotari-Chiebao, F., Brommer, J. E., Niinimäki, T., & Laaksonen, T. (2016). Proximity to wind-power plants reduces the breeding success of the white-tailed eagle : Wind-power plants and the white-tailed eagle. *Anim Conserv*, 19(3), 265-272. <https://doi.org/10.1111/acv.12238>
- Barlóg, P., Hlisnikovský, L., & Kunzová, E. (2020). Effect of Digestate on Soil Organic Carbon and Plant-Available Nutrient Content Compared to Cattle Slurry and Mineral Fertilization. *Agronomy*, 10(3), 379. <https://doi.org/10.3390/agronomy10030379>
- Barré, K., Le Viol, I., Bas, Y., Julliard, R., & Kerbiriou, C. (2018). Estimating habitat loss due to wind turbine avoidance by bats : Implications for European siting guidance. *Biological Conservation*, 226, 205-214. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.07.011>
- Barron-Gafford, G. A., Minor, R. L., Allen, N. A., Cronin, A. D., Brooks, A. E., & Pavao-Zuckerman, M. A. (2016). The Photovoltaic Heat Island Effect : Larger solar power plants increase local temperatures. *Scientific Reports*, 6(1), 35070. <https://doi.org/10.1038/srep35070>
- Bastos, R., Pinhancos, A., Santos, M., Fernandes, R. F., Vicente, J. R., Morinha, F., Honrado, J. P., Travassos, P., Barros, P., & Cabral, J. A. (2016). Evaluating the regional cumulative impact of wind farms on birds : How can spatially explicit dynamic modelling improve impact assessments and monitoring? *Journal of Applied Ecology*, 53(5), 1330-1340. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12451>
- Benchimol, M., & Peres, C. A. (2015). Widespread Forest Vertebrate Extinctions Induced by a Mega Hydroelectric Dam in Lowland Amazonia. *PLOS ONE*, 10(7), e0129818. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0129818>
- Benejam, L., Saura-Mas, S., Bardina, M., Solà, C., Munné, A., & García-Berthou, E. (2016). Ecological impacts of small hydropower plants on headwater stream fish : From individual to community effects. *Ecology of Freshwater Fish*, 25(2), 295-306. <https://doi.org/10.1111/eff.12210>
- Börjesson, P., & Berglund, M. (2007). Environmental systems analysis of biogas systems—Part II : The environmental impact of replacing various reference systems. *Biomass and Bioenergy*, 31(5), 326-344. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.01.004>
- Boulamanti, A. K., Donida Maglio, S., Giuntoli, J., & Agostini, A. (2013). Influence of different practices on biogas sustainability. *Biomass and Bioenergy*, 53, 149-161. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.02.020>
- Briones-Hidrovo, A., Uche, J., & Martinez-Gracia, A. (2020). Determining the net environmental performance of hydropower : A new methodological approach by combining life cycle and ecosystem services assessment. *Science of the Total Environment*, 712, 136369. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136369>
- Broadhurst, M., & Orme, C. D. L. (2014). Spatial and temporal benthic species assemblage responses with a deployed marine tidal energy device : A small scaled study. *Marine Environmental Research*, 99, 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2014.03.012>
- Brooke, R., Fogel, G., Glaser, A., Griffin, E., & Johnson, K. (2009). CORN ETHANOL AND WILDLIFE: HOW ARE POLICY- AND MARKET-DRIVEN INCREASES IN CORN PLANTINGS AFFECTING HABITAT AND WILDLIFE? [https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/62096/Corn%20Ethanol%20and%20Wildlife\\_4.21\\_447pmKJ.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/62096/Corn%20Ethanol%20and%20Wildlife_4.21_447pmKJ.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- Bukhary, S., Ahmad, S., & Batista, J. (2018). Analyzing land and water requirements for solar deployment in the Southwestern United States. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 82, 3288-3305. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.016>
- Buscaino, G., Mattiazzo, G., Sannino, G., Papale, E., Bracco, G., Grammatta, R., Carillo, A., Kenny, J. M., De Cristofaro, N., Ceraulo, M., & Mazzola, S. (2019). Acoustic impact of a wave energy converter in Mediterranean shallow waters. *Scientific Reports*, 9(1), 9586. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45926-1>
- Cameron, D. R., Cohen, B. S., & Morrison, S. A. (2012). An Approach to Enhance the Conservation-Compatibility of Solar Energy Development. *PLOS ONE*, 7(6), e38437. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0038437>
- Carpenter, J. R., Merkelbach, L., Callies, U., Clark, S., Gaslikova, L., & Baschek, B. (2016). Potential Impacts of Offshore Wind Farms on North Sea Stratification. *PLoS ONE*, 11(8), e0160830. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160830>
- CE. (2018). Document d'orientation relatif aux exigences applicables à la production d'hydroélectricité au regard de la législation de l'Union sur la nature. [https://ec.europa.eu/environment/nature/natura2000/management/docs/hydro\\_final\\_june\\_2018\\_fr.pdf](https://ec.europa.eu/environment/nature/natura2000/management/docs/hydro_final_june_2018_fr.pdf)
- Chen, Q., Shi, W., Huisman, J., Maberly, S. C., Zhang, J., Yu, J., Chen, Y., Tonina, D., & Yi, Q. (2020). Hydropower reservoirs on the upper Mekong River modify nutrient bioavailability downstream. *National Science Review*, 7(9), 1449-1457. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwaa026>
- Cook, L. M., & McCuen, R. H. (2013). Hydrologic Response of Solar Farms. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(5), 536-541. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000530](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000530)
- COPPING, A., SATHER, N., HANNA, L., WHITING, J., ZYDLEWSKI, G., STAINES, G., GILL, A., HUTCHISON, I., O'HAGAN, A. M., SIMAS, T., BALD, J., SPARLING, C., WOOD, J., & MASDEN, E. (2016). Annex IV 2016 State of the Science Report: Environmental Effects of Marine Renewable Energy Development Around the World. 224.
- Cossel, M. von, Steberl, K., Hartung, J., Pereira, L. A., Kiesel, A., & Lewandowski, I. (2019). Methane yield and species diversity dynamics of perennial wild plant mixtures established alone, under cover crop maize (*Zea mays* L.), and after spring barley (*Hordeum vulgare* L.). *GCB Bioenergy*, 11(11), 1376-1391. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12640>
- Cossu, M., Murgia, L., Ledda, L., Deligios, P. A., Sirigu, A., Chessa, F., & Pazzona, A. (2014). Solar radiation distribution inside a greenhouse with south-oriented photovoltaic roofs and effects on crop productivity. *Applied Energy*, 133, 89-100. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.070>
- Cramer, M., Rinas, M., Kotzbauer, U., & Tränckner, J. (2019). Surface contamination of impervious areas on biogas plants and conclusions for an improved stormwater management. *Journal of Cleaner Production*, 217, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.087>
- Cromratie Clemons, S. K., Salloum, C. R., Herdegen, K. G., Kamens, R. M., & Gheewala, S. H. (2021). Life cycle assessment of a floating photovoltaic system and feasibility for application in Thailand. *Renewable Energy*, 168, 448-462. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.082>
- Cryan, P. M., & Barclay, R. M. R. (2009). CAUSES OF BAT FATALITIES AT WIND TURBINES: HYPOTHESES AND PREDICTIONS. *Journal of Mammalogy*, 90(6), 1330-1340. <https://doi.org/10.1644/09-MAMM-S-076R1.1>
- Cryan, P. M., Gorresen, P. M., Hein, C. D., Schirmacher, M. R., Diehl, R. H., Huso, M. M., Hayman, D. T. S., Fricker, P. D., Bonaccorso, F. J., Johnson, D. H., Heist, K., & Dalton, D. C. (2014). Behavior of bats at wind turbines. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(42), 15126-15131. <https://doi.org/10.1073/pnas.1406672111>
- Dahl, E. L., Bevanger, K., Nygård, T., Røskaft, E., & Stokke, B. G. (2012). Reduced breeding success in white-tailed eagles at Smøla windfarm, western Norway, is caused by mortality and displacement. *Biological Conservation*, 145(1), 79-85. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2011.10.012>
- Dahl, E. L., May, R., Hoel, P. L., Bevanger, K., Pedersen, H. C., Røskaft, E., & Stokke, B. G. (2013). White-tailed eagles (*Haliaeetus albicilla*) at the Smøla wind-power plant, Central Norway, lack behavioral flight responses to wind turbines. *Wildlife Society Bulletin*, 37(1), 66-74. <https://doi.org/10.1002/wsb.258>
- Dannheim, J., Bergström, L., Birchenough, S. N. R., Brzana, R., Boon, A. R., Coolen, J. W. P., Dauvin, J.-C., De Mesel, I., Derweduwien, J., Gill, A. B., Hutchison, Z. L., Jackson, A. C., Janas, U., Martin, G., Raoux, A., Reubens, J., Rostin, L., Vanaverbeke, J., Wilding, T. A., ... Degraer, S. (2019). Benthic effects of offshore renewables: Identification of knowledge gaps and urgently needed research. *ICES Journal of Marine Science*, 77(3), 1092-1108. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsz018>

- De Marco, A., Petrosillo, I., Semeraro, T., Pasimeni, M. R., Aretano, R., & Zurlini, G. (2014). The contribution of Utility-Scale Solar Energy to the global climate regulation and its effects on local ecosystem services. *Global Ecology and Conservation*, 2, 324-337. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2014.10.010>
- DeVault, T. L., Seamans, T. W., Schmidt, J. A., Belant, J. L., Blackwell, B. F., Mooers, N., Tyson, L. A., & Van Pelt, L. (2014). Bird use of solar photovoltaic installations at US airports : Implications for aviation safety. *Landscape and Urban Planning*, 122, 122-128. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.11.017>
- Devereux, C. L., Denny, M. J. H., & Whittingham, M. J. (2008). Minimal effects of wind turbines on the distribution of wintering farmland birds. *Journal of Applied Ecology*, 45(6), 1689-1694. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2008.01560.x>
- Dierschke, V., Furness, R. W., & Garthe, S. (2016). Seabirds and offshore wind farms in European waters: Avoidance and attraction. *Biological Conservation*, 202, 59-68. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2016.08.016>
- Dinesh, H., & Pearce, J. (2016). The potential of agrivoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 299-308. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.024>
- DREAL. (2010). Centrales photovoltaïques et Chiropères Evaluation du requis minimal pour un état initial Etude bibliographique sur l'évaluation des impacts Recommandations dans le cadre des implantations (p. 43).
- DREAL. (2017). Guide de préconisation pour la prise en compte des enjeux chiropérologiques et avifaunistiques dans les projets éoliens.
- Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., & Ferard, Y. (2011). Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use : Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy*, 36(10), 2725-2732. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.005>
- Everaars, J., Frank, K., & Huth, A. (2014). Species ecology and the impacts of bioenergy crops : An assessment approach with four example farmland bird species. *GCB Bioenergy*, 6. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12135>
- Fallon, D., Hartnett, M., Olbert, A., & Nash, S. (2014). The effects of array configuration on the hydro-environmental impacts of tidal turbines. *Renewable Energy*, 64, 10-25. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.10.035>
- FAO. (2019). GLOBAL SYMPOSIUM ON SOIL EROSION. <http://www.fao.org/3/ca4394en/ca4394en.pdf>
- Fernández - Bellon, D., Wilson, M. W., Irwin, S., & O'Halloran, J. (2019). Effects of development of wind energy and associated changes in land use on bird densities in upland areas. *Conservation Biology*, 33(2), 413-422. <https://doi.org/10.1111/cobi.13239>
- Fijn, R., Krijgsveld, K., Poot, M., & Dirksen, S. (2015). Bird movements at rotor heights measured continuously with vertical radar at a Dutch offshore wind farm. *Ibis*, 157. <https://doi.org/10.1111/ibi.12259>
- Finger, D., Schmid, M., & Wüest, A. (2006). Effects of upstream hydropower operation on riverine particle transport and turbidity in downstream lakes. *Water Resources Research*, 42(8). <https://doi.org/10.1029/2005WR004751>
- Floeter, J., van Beusekom, J. E. E., Auch, D., Callies, U., Carpenter, J., Dudeck, T., Eberle, S., Eckhardt, A., Gloe, D., Hänselmann, K., Hufnagl, M., Janßen, S., Lenhart, H., Möller, K. O., North, R. P., Pohlmann, T., Riethmüller, R., Schulz, S., Spreizenbarth, S., ... Möllmann, C. (2017). Pelagic effects of offshore wind farm foundations in the stratified North Sea. *Progress in Oceanography*, 156, 154-173. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2017.07.003>
- Foo, C. F., Bennett, V. J., Hale, A. M., Korstian, J. M., Schildt, A. J., & Williams, D. A. (2017). Increasing evidence that bats actively forage at wind turbines. *PeerJ*, 5, e3985. <https://doi.org/10.7717/peerj.3985>
- Fraser, S., Williamson, B. J., Nikora, V., & Scott, B. E. (2018). Fish distributions in a tidal channel indicate the behavioural impact of a marine renewable energy installation. *Energy Reports*, 4, 65-69. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2018.01.008>
- FRB. (2017). Énergie renouvelable et biodiversité : Les implications pour parvenir à une économie verte. 26.
- Frick, W. F., Baerwald, E. F., Pollock, J. F., Barclay, R. M. R., Szymanski, J. A., Weller, T. J., Russell, A. L., Loeb, S. C., Medellín, R. A., & McGuire, L. P. (2017). Fatalities at wind turbines may threaten population viability of a migratory bat. *Biological Conservation*, 209, 172-177. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2017.02.023>

- Furness, R. W., Wade, H. M., Robbins, A. M. C., & Masden, E. A. (2012). Assessing the sensitivity of seabird populations to adverse effects from tidal stream turbines and wave energy devices. *ICES Journal of Marine Science*, 69(8), 1466-1479. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fss131>
- Garvin, J. C., Jennelle, C. S., Drake, D., & Grodsky, S. M. (2011). Response of raptors to a windfarm. *Journal of Applied Ecology*, 48(1), 199-209. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2010.01912.x>
- Gevers, J., Høye, T. T., Topping, C. J., Glemnitz, M., & Schröder, B. (2011). Biodiversity and the mitigation of climate change through bioenergy: Impacts of increased maize cultivation on farmland wildlife. *GCB Bioenergy*, 3(6), 472-482. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2011.01104.x>
- Gill, A. B., & Bartlett, M. (2010). Literature review on the potential effects of electromagnetic fields and subsea noise from marine renewable energy developments on Atlantic salmon, sea trout and European eel. 43.
- Goberna, M., Podmirseg, S. M., Waldhuber, S., Knapp, B. A., García, C., & Insam, H. (2011). Pathogenic bacteria and mineral N in soils following the land spreading of biogas digestates and fresh manure. *Applied Soil Ecology*, 49, 18-25. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2011.07.007>
- Golden, C. D., Shapero, A., Vaitla, B., Smith, M. R., Myers, S. S., Stebbins, E., & Gephart, J. A. (2019). Impacts of Mainstream Hydropower Development on Fisheries and Human Nutrition in the Lower Mekong. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 3, UNSP 93. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2019.00093>
- Gómez-Catasús, J., Garza, V., & Traba, J. (2018). Wind farms affect the occurrence, abundance and population trends of small passerine birds: The case of the Dupont's lark. *J Appl Ecol*, 55(4), 2033-2042. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13107>
- Gracey, E. O., & Verones, F. (2016). Impacts from hydropower production on biodiversity in an LCA framework—Review and recommendations. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(3), 412-428. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1039-3>
- Grodsky, S. M., Behr, M. J., Gendler, A., Drake, D., Dieterle, B. D., Rudd, R. J., & Walrath, N. L. (2011). Investigating the causes of death for wind turbine-associated bat fatalities. *Journal of Mammalogy*, 92(5), 917-925. <https://doi.org/10.1644/10-MAMM-A-404.1>
- Guerin, T. (2017). A case study identifying and mitigating the environmental and community impacts from construction of a utility-scale solar photovoltaic power plant in eastern Australia. *Solar Energy*, 146, 94-104. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.02.020>
- Hansen, M. N., Birkmose, T., Mortensen, B., & Skaaning, K. (2012). Effects of Separation and Anaerobic Digestion of Slurry on Odour and Ammonia Emission During Subsequent Storage and Land Application.
- Hayes, M. A., Cryan, P. M., & Wunder, M. B. (2015). Seasonally-Dynamic Presence-Only Species Distribution Models for a Cryptic Migratory Bat Impacted by Wind Energy Development. *Plos One*, 10(7), e0132599. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132599>
- Hernandez, R. R., Hoffacker, M. K., & Field, C. B. (2014). Land-Use Efficiency of Big Solar. *Environmental Science & Technology*, 48(2), 1315-1323. <https://doi.org/10.1021/es4043726>
- Hernandez, R. R., Hoffacker, M. K., Murphy-Mariscal, M. L., Wu, G. C., & Allen, M. F. (2015). Solar energy development impacts on land cover change and protected areas. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(44), 13579-13584. <https://doi.org/10.1073/pnas.1517656112>
- Hertwich, E. G., Lardere, J. A. de, Arvesen, A., Bayer, P., Bergesen, J., Bouman, E., Gibon, T., Heath, G., Peña, C., Purohit, P., Ramirez, A., & Suh, S. (2015). GREEN ENERGY CHOICES: The Benefits, Risks and Trade-Offs of Low-Carbon Technologies for Electricity Production. [http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/13277/1-Green\\_energy\\_choices\\_\\_The\\_benefits%2C\\_risks\\_and\\_trade-offs\\_of\\_low-carbon\\_technologies\\_for\\_electricity\\_production\\_\\_Summary\\_for\\_policy\\_makers-2015green\\_e.pdf](http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/13277/1-Green_energy_choices__The_benefits%2C_risks_and_trade-offs_of_low-carbon_technologies_for_electricity_production__Summary_for_policy_makers-2015green_e.pdf)
- Horn, J. W., Arnett, E. B., & Kunz, T. H. (2008). Behavioral responses of bats to operating wind turbines. *Journal of Wildlife Management*, 72(1), 123-132. <https://doi.org/10.2193/2006-465>
- Horváth, G., Blahó, M., Egri, Á., Kriska, G., Seres, I., & Robertson, B. (2010). Reducing the Maladaptive Attractiveness of Solar Panels to Polarotactic Insects: Polarized Light Pollution from Solar Panels. *Conservation Biology*, 24(6), 1644-1653. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2010.01518.x>
- Hudek, H., Zganec, K., & Pusch, M. T. (2020). A review of hydropower dams in Southeast Europe—Distribution, trends and availability of monitoring data using the example of a multinational Danube catchment subarea. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 117, 109434. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109434>

- Hull, C. L., & Cawthen, L. (2013). Bat fatalities at two wind farms in Tasmania, Australia: Bat characteristics, and spatial and temporal patterns. *New Zealand Journal of Zoology*, 40(1), 5-15. <https://doi.org/10.1080/03014223.2012.731006>
- Hutchison, Z. L., Gill, A. B., Sigray, P., He, H., & King, J. W. (2020). Anthropogenic electromagnetic fields (EMF) influence the behaviour of bottom-dwelling marine species. *Scientific Reports*, 10(1), 4219. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-60793-x>
- Huth, E., Paltrinieri, S., & Thiele, J. (2019). Bioenergy and its effects on landscape aesthetics – A survey contrasting conventional and wild crop biomass production. *Biomass and Bioenergy*, 122, 313-321. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.043>
- ICES. (2019). OSPAR request to advise on the current state and knowledge of studies into the deployment and environmental impacts of wet renewable technologies and marine energy storage systems. <https://doi.org/10.17895/ICES.ADVICE.4894>
- Immerzeel, D. J., Verweij, P. A., Hilst, F. van der, & Faaij, A. P. C. (2014). Biodiversity impacts of bioenergy crop production: A state-of-the-art review. *GCB Bioenergy*, 6(3), 183-209. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12067>
- IPBES. (2019). [ipbes\\_global\\_assessment\\_chapter\\_2\\_1\\_drivers\\_unedited\\_31may.pdf](https://www.ipbes.net/sites/default/files/ipbes_global_assessment_chapter_2_1_drivers_unedited_31may.pdf). [https://www.ipbes.net/sites/default/files/ipbes\\_global\\_assessment\\_chapter\\_2\\_1\\_drivers\\_unedited\\_31may.pdf](https://www.ipbes.net/sites/default/files/ipbes_global_assessment_chapter_2_1_drivers_unedited_31may.pdf)
- Jager, H. I., & Bevelhimer, M. S. (2007). How Run-of-River Operation Affects Hydropower Generation and Value. *Environmental Management*, 40(6), 1004-1015. <https://doi.org/10.1007/s00267-007-9008-z>
- Jeal, C., Perold, V., Seymour, C. L., Ralston-Paton, S., & Ryan, P. G. (2019). Utility-scale solar energy facilities – Effects on invertebrates in an arid environment. *Journal of Arid Environments*, 168, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.05.008>
- Jenkins, A. R., Reid, T., du Plessis, J., Colyn, R., Benn, G., & Millikin, R. (2018). Combining radar and direct observation to estimate pelican collision risk at a proposed wind farm on the Cape west coast, South Africa. *Plos One*, 13(2), e0192515. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192515>
- Kelly-Richards, S., Silber-Coats, N., Crootof, A., Tecklin, D., & Bauer, C. (2017). Governing the transition to renewable energy: A review of impacts and policy issues in the small hydropower boom. *Energy Policy*, 101, 251-264. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.11.035>
- Kelm, D. H., Lenski, J., Kelm, V., Toelch, U., & Dziock, F. (2014). Seasonal bat activity in relation to distance to hedgerows in an agricultural landscape in central Europe and implications for wind energy development. *Acta Chiropterologica*, 16(1), 65-73. <https://doi.org/10.3161/150811014X683273>
- Langhamer, O., & Wilhelmsson, D. (2009). Colonisation of fish and crabs of wave energy foundations and the effects of manufactured holes—A field experiment. *Marine Environmental Research*, 68(4), 151-157. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2009.06.003>
- Lask, J., Guajardo, A. M., Weik, J., Cossel, M. von, Lewandowski, I., & Wagner, M. (2020). Comparative environmental and economic life cycle assessment of biogas production from perennial wild plant mixtures and maize (*Zea mays* L.) in southwest Germany. *GCB Bioenergy*, 12(8), 571-585. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12715>
- Leeney, R. H., Greaves, D., Conley, D., & O'Hagan, A. M. (2014). Environmental Impact Assessments for wave energy developments – Learning from existing activities and informing future research priorities. *Ocean & Coastal Management*, 99, 14-22. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.05.025>
- Lees, A. C., Peres, C. A., Fearnside, P. M., Schneider, M., & Zuanon, J. A. S. (2016). Hydropower and the future of Amazonian biodiversity. *Biodivers Conserv*, 25(3), 451-466. <https://doi.org/10.1007/s10531-016-1072-3>
- Liebetrau, J., Clemens, J., Cuhls, C., Hafermann, C., Friehe, J., Weiland, P., & Daniel - Gromke, J. (2010). Methane emissions from biogas-producing facilities within the agricultural sector. *Engineering in Life Sciences*, 10(6), 595-599. <https://doi.org/10.1002/elsc.201000070>
- Long, C. V., Flint, J. A., & Lepper, P. A. (2011). Insect attraction to wind turbines: Does colour play a role? *European Journal of Wildlife Research*, 57(2), 323-331. <https://doi.org/10.1007/s10344-010-0432-7>
- Lopez, M., Rodriguez, N., & Iglesias, G. (2020). Combined Floating Offshore Wind and Solar PV. *J. Mar. Sci. Eng.*, 8(8), 576. <https://doi.org/10.3390/jmse8080576>
- LPO. (2017). Le parc éolien français et ses impacts sur l'avifaune. Etude des suivis de mortalité réalisés en France de 1997 à 2015.
- LPO. (2019). Éoliennes & biodiversité Synthèse des connaissances sur les impacts et les moyens de les atténuer.

- Lüker-Jans, N., Simmering, D., & Otte, A. (2017). The impact of biogas plants on regional dynamics of permanent grassland and maize area—The example of Hesse, Germany (2005–2010). *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 241, 24-38. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.023>
- Maavara, T., Lauerwald, R., Regnier, P., & Van Cappellen, P. (2017). Global perturbation of organic carbon cycling by river damming. *Nature Communications*, 8(1), 15347. <https://doi.org/10.1038/ncomms15347>
- Maavara, T., Parsons, C. T., Ridenour, C., Stojanovic, S., Dürr, H. H., Powley, H. R., & Van Cappellen, P. (2015). Global phosphorus retention by river damming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(51), 15603-15608. <https://doi.org/10.1073/pnas.1511797112>
- MacGregor, K. A., & Lemaitre, J. (2020). The management utility of large-scale environmental drivers of bat mortality at wind energy facilities : The effects of facility size, elevation and geographic location. *Global Ecology and Conservation*, 21, e00871. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00871>
- Malu, P. R., Sharma, U. S., & Pearce, J. M. (2017). Agrivoltaic potential on grape farms in India. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 23, 104-110. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2017.08.004>
- Mantoiu, D. S., Kravchenko, K., Lehnert, L. S., Vlaschenko, A., Moldovan, O. T., Mirea, I. C., Stanciu, R. C., Zaharia, R., Popescu-Mirceni, R., Nistorescu, M. C., & Voigt, C. C. (2020). Wildlife and infrastructure : Impact of wind turbines on bats in the Black Sea coast region. *European Journal of Wildlife Research*, 66(3), 44. <https://doi.org/10.1007/s10344-020-01378-x>
- Marchegiani, P., Hellgren, J. H., & Gómez, L. (2019). Lithium extraction in Argentina : A case study on the social and environmental impacts. 50.
- Margheritini, L., Hansen, A. M., & Frigaard, P. (2012). A method for EIA scoping of wave energy converters—Based on classification of the used technology. *Environmental Impact Assessment Review*, 32(1), 33-44. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2011.02.003>
- Marques, A. T., Batalha, H., Rodrigues, S., Costa, H., Ramos Pereira, M. J., Fonseca, C., Mascarenhas, M., & Bernardino, J. (2014). Understanding bird collisions at wind farms : An updated review on the causes and possible mitigation strategies. *Biological Conservation*, 179, 40-52. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.08.017>
- Marrou, H., Wery, J., Dufour, L., & Dupraz, C. (2013). Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. *European Journal of Agronomy*, 44, 54-66. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.08.003>
- Martínez - Abraín, A., Tavecchia, G., Regan, H. M., Jiménez, J., Surroca, M., & Oro, D. (2012). Effects of wind farms and food scarcity on a large scavenging bird species following an epidemic of bovine spongiform encephalopathy. *Journal of Applied Ecology*, 49(1), 109-117. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.02080.x>
- Martin-Short, R., Hill, J., Kramer, S. C., Avdis, A., Allison, P. A., & Piggott, M. D. (2015). Tidal resource extraction in the Pentland Firth, UK : Potential impacts on flow regime and sediment transport in the Inner Sound of Stroma. *Renewable Energy*, 76, 596-607. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.079>
- Maurer, C., Seiler-Petzold, J., Schulz, R., & Müller, J. (2019). Short-Term Nitrogen Uptake of Barley from Differently Processed Biogas Digestate in Pot Experiments. *Energies*, 12(4), 696. <https://doi.org/10.3390/en12040696>
- McAllister, D., Craig, J., Davidson, N., Delany, S., & Seddon, M. (2001). Biodiversity Impacts of Large Dams.
- McCormack, C. G., Born, W., Irvine, P. J., Achterberg, E. P., Amano, T., Ardron, J., Foster, P. N., Gattuso, J.-P., Hawkins, S. J., Hendy, E., Kissling, W. D., Lluch-Cota, S. E., Murphy, E. J., Ostle, N., Owens, N. J. P., Perry, R. I., Pörtner, H. O., Scholes, R. J., Schurr, F. M., ... Sutherland, W. J. (2016). Key impacts of climate engineering on biodiversity and ecosystems, with priorities for future research. *Journal of Integrative Environmental Sciences*, 1-26. <https://doi.org/10.1080/1943815X.2016.1159578>
- MEDDAAT. (2009). Guide sur la prise en compte de l'environnement dans les installations photovoltaïques au sol.
- MEDDE. (2014). Guide sur l'application de la réglementation relative aux espèces protégées pour les parcs éoliens terrestres (p. 32).
- Millon, L., Colin, C., Brescia, F., & Kerbirou, C. (2018). Wind turbines impact bat activity, leading to high losses of habitat use in a biodiversity hotspot. *Ecological Engineering*, 112, 51-54. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.12.024>

- Millon, L., Julien, J.-F., Julliard, R., & Kerbiriou, C. (2015). Bat activity in intensively farmed landscapes with wind turbines and offset measures. *Ecological Engineering*, 75, 250-257. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.11.050>
- Minderman, J., Gillis, M. H., Daly, H. F., & Park, K. J. (2017). Landscape-scale effects of single- and multiple small wind turbines on bat activity. *Animal Conservation*, 20(5), 455-462. <https://doi.org/10.1111/acv.12331>
- Minderman, Jeroen, Pendlebury, C. J., Pearce-Higgins, J. W., & Park, K. J. (2012). Experimental Evidence for the Effect of Small Wind Turbine Proximity and Operation on Bird and Bat Activity. *PLOS ONE*, 7(7), e41177. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0041177>
- Miranda, M. (Éd.). (2003). Mining and critical ecosystems : Mapping the risks. World Resources Institute.
- Muscolo, A., Settineri, G., Papalia, T., Attinà, E., Basile, C., & Panuccio, M. R. (2017). Anaerobic co-digestion of recalcitrant agricultural wastes : Characterizing of biochemical parameters of digestate and its impacts on soil ecosystem. *Science of The Total Environment*, 586, 746-752. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.051>
- Nash, C., Clough, J., Gedge, D., Lindsay, R., Newport, D., Ciupala, M. A., & Connop, S. (2016). Initial insights on the biodiversity potential of biosolar roofs : A London Olympic Park green roof case study. *Israel Journal of Ecology and Evolution*, 62(1-2), 74-87. <https://doi.org/10.1080/15659801.2015.1045791>
- Nehring, R. F., Vialou, A., Erickson, K. W., & Sandretto, C. L. (2008). Assessing Economic and Environmental Impacts of Ethanol Production on Fertilizer Use in Corn Production.
- Neill, S. P., Robins, P. E., & Fairley, I. (2017). The Impact of Marine Renewable Energy Extraction on Sediment Dynamics. In Z. Yang & A. Copping (Éds.), *Marine Renewable Energy : Resource Characterization and Physical Effects* (p. 279-304). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-53536-4\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-53536-4_12)
- Ni, K., Pacholski, A., Gericke, D., & Kage, H. (2012). Analysis of ammonia losses after field application of biogas slurries by an empirical model. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 175(2), 253-264. <https://doi.org/10.1002/jpln.201000358>
- Nilsson, C., Brown, R. L., Jansson, R., & Merritt, D. M. (2010). The role of hydrochory in structuring riparian and wetland vegetation. *Biological Reviews*, 22.
- Noonan, M. J., Grant, J. W. A., & Jackson, C. D. (2012). A quantitative assessment of fish passage efficiency. *Fish and Fisheries*, 13(4), 450-464. <https://doi.org/10.1111/j.1467-2979.2011.00445.x>
- Palmeirim, A. F., Peres, C. A., & Rosas, F. C. W. (2014). Giant otter population responses to habitat expansion and degradation induced by a mega hydroelectric dam. *Biological Conservation*, 174, 30-38. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.03.015>
- Pander, J., Mueller, M., Knott, J., & Geist, J. (2018). Catch-related fish injury and catch efficiency of stow-net-based fish recovery installations for fish-monitoring at hydropower plants. *Fisheries Management and Ecology*, 25(1), 31-43. <https://doi.org/10.1111/fme.12263>
- Pandit, M. K., & Grumbine, R. E. (2012). Potential Effects of Ongoing and Proposed Hydropower Development on Terrestrial Biological Diversity in the Indian Himalaya : Hydropower and Himalayan Biodiversity. *Conservation Biology*, 26(6), 1061-1071. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2012.01918.x>
- Paredes, M. G., Padilla-Rivera, A., & Güereca, L. P. (2019). Life Cycle Assessment of Ocean Energy Technologies : A Systematic Review. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(9), 322. <https://doi.org/10.3390/jmse7090322>
- Pearce-Higgins, J. W., Stephen, L., Douse, A., & Langston, R. H. W. (2012). Greater impacts of wind farms on bird populations during construction than subsequent operation : Results of a multi-site and multi-species analysis. *Journal of Applied Ecology*, 49(2), 386-394. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2012.02110.x>
- Pearce - Higgins, J. W., Stephen, L., Langston, R. H. W., Bainbridge, I. P., & Bullman, R. (2009). The distribution of breeding birds around upland wind farms. *Journal of Applied Ecology*, 46(6), 1323-1331. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2009.01715.x>
- Pedroli, B., Elbersen, B., Frederiksen, P., Grandin, U., Heikkilä, R., Krogh, P. H., Izakovičová, Z., Johansen, A., Meiresonne, L., & Spijker, J. (2013). Is energy cropping in Europe compatible with biodiversity? – Opportunities and threats to biodiversity from land-based production of biomass for bioenergy purposes. *Biomass and Bioenergy*, 55, 73-86. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.09.054>
- Pellow, M. A., Ambrose, H., Mulvaney, D., Betita, R., & Shaw, S. (2020). Research gaps in environmental life cycle assessments of lithium ion batteries for grid-scale stationary energy

- storage systems : End-of-life options and other issues. *Sustainable Materials and Technologies*, 23, e00120. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2019.e00120>
- Peters, J. F., Baumann, M., Zimmermann, B., Braun, J., & Weil, M. (2017). The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 491-506. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.039>
- Pimentel, D., Herz, M., Glickstein, M., Zimmerman, M., Allen, R., Becker, K., Evans, J., Hussain, B., Sarsfeld, R., & Grosfeld, A. (2002). Renewable Energy : Current and Potential Issues Renewable energy technologies could, if developed and implemented, provide nearly 50% of US energy needs; this would require about 17% of US land resources. *Bioscience*, 52(12), 1111-1120.
- Pimentel Da Silva, G. D., & Branco, D. A. C. (2018). Is floating photovoltaic better than conventional photovoltaic? Assessing environmental impacts. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 36(5), 390-400. <https://doi.org/10.1080/14615517.2018.1477498>
- Pine, M. K., Schmitt, P., Culloch, R. M., Lieber, L., & Kregting, L. T. (2019). Providing ecological context to anthropogenic subsea noise : Assessing listening space reductions of marine mammals from tidal energy devices. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 103, 49-57. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.024>
- Plonczkier, P., & Simms, I. C. (2012). Radar monitoring of migrating pink-footed geese : Behavioural responses to offshore wind farm development. *Journal of Applied Ecology*, 49(5), 1187-1194. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2012.02181.x>
- Ravi, S., Macknick, J., Lobell, D., Field, C., Ganesan, K., Jain, R., Elchinger, M., & Stoltenberg, B. (2016). Colocation opportunities for large solar infrastructures and agriculture in drylands. *Applied Energy*, 165, 383-392. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.078>
- Reimer, J. P., Baerwald, E. F., & Barclay, R. M. R. (2018). Echolocation activity of migratory bats at a wind energy facility : Testing the feeding-attraction hypothesis to explain fatalities. *Journal of Mammalogy*, 99(6), 1472-1477. <https://doi.org/10.1093/jmammal/gyy143>
- Risberg, K., Cederlund, H., Pell, M., Arthurson, V., & Schnürer, A. (2017). Comparative characterization of digestate versus pig slurry and cow manure – Chemical composition and effects on soil microbial activity. *Waste Management*, 61, 529-538. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.12.016>
- Roeleke, M., Blohm, T., Kramer-Schadt, S., Yovel, Y., & Voigt, C. C. (2016). Habitat use of bats in relation to wind turbines revealed by GPS tracking. *Scientific Reports*, 6(1), 28961. <https://doi.org/10.1038/srep28961>
- Roscioni, F., Russo, D., Di Febbraro, M., Frate, L., Carranza, M. L., & Loy, A. (2013). Regional-scale modelling of the cumulative impact of wind farms on bats. *Biodivers Conserv*, 22(8), 1821-1835. <https://doi.org/10.1007/s10531-013-0515-3>
- Royal Haskoning. (2011). *Final\_EMP\_report\_SeaGen.pdf*. [https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Final\\_EMP\\_report\\_SeaGen.pdf](https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Final_EMP_report_SeaGen.pdf)
- Ruocco, A. M. C., Portinho, J. L., & Nogueira, M. G. (2019). Potential impact of small hydroelectric power plants on river biota : A case study on macroinvertebrates associated to basaltic knickzones. *Brazilian Journal of Biology*, 79(4), 722-734. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.191148>
- Sangiuliano, S. J. (2018). Analysing the potentials and effects of multi-use between tidal energy development and environmental protection and monitoring : A case study of the inner sound of the Pentland Firth. *Marine Policy*, 96, 120-132. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2018.08.017>
- Sá - Oliveira, J. C., Hawes, J. E., Isaac - Nahum, V. J., & Peres, C. A. (2015). Upstream and downstream responses of fish assemblages to an eastern Amazonian hydroelectric dam. *Freshwater Biology*, 60(10), 2037-2050. <https://doi.org/10.1111/fwb.12628>
- Sayed, E. T., Wilberforce, T., Elsaid, K., Rabaia, M. K. H., Abdelkareem, M. A., Chae, K.-J., & Olabi, A. G. (2021). A critical review on environmental impacts of renewable energy systems and mitigation strategies : Wind, hydro, biomass and geothermal. *Science of The Total Environment*, 766, 144505. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144505>
- Schaub, T., Klaassen, R. H. G., Bouten, W., Schlaich, A. E., & Koks, B. J. (2020). Collision risk of Montagu's Harriers *Circus pygargus* with wind turbines derived from high-resolution GPS tracking. *Ibis*, 162(2), 520-534. <https://doi.org/10.1111/ibi.12788>
- Schuster, E., Bulling, L., & Köppel, J. (2015). Consolidating the State of Knowledge : A Synoptical Review of Wind Energy's Wildlife Effects. *Environmental Management*, 56(2), 300-331. <https://doi.org/10.1007/s00267-015-0501-5>
- Scott, K., Harsanyi, P., & Lyndon, A. R. (2018). Understanding the effects of electromagnetic field emissions from Marine Renewable Energy Devices (MREDS) on the commercially important

- edible crab, *Cancer pagurus* (L.). *Marine Pollution Bulletin*, 131, 580-588. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.04.062>
- Sieling, K., Herrmann, A., Wienforth, B., Taube, F., Ohl, S., Hartung, E., & Kage, H. (2013). Biogas cropping systems: Short term response of yield performance and N use efficiency to biogas residue application. *European Journal of Agronomy*, 47, 44-54. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.01.002>
- Sinha, P., Meader, A., & Wild-Scholten, M. de. (2012). Life cycle water usage in CdTe photovoltaics. 2012 IEEE 38th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC) PART 2, 1-4. <https://doi.org/10.1109/PVSC-Vol2.2012.6656781>
- Smallwood, K. S. (2013). Comparing bird and bat fatality-rate estimates among North American wind-energy projects. *Wildlife Society Bulletin*, 37(1), 19-33. <https://doi.org/10.1002/wsb.260>
- SNIFFER. (2011). IMPACT OF RUN-OF-RIVER HYDRO-SCHEMES UPON FISH POPULATIONS. 71.
- Sokolow SH, Huttinger E, Jouanard N, Hsieh MH, Lafferty KD, Kuris AM, Riveau G, Senghor S, Thiam C, N'Diaye A, Faye DS, De Leo GA. (2017). Reduced transmission of human schistosomiasis after restoration of a native river prawn that preys on the snail intermediate host. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2015 Aug 4;112(31):9650-5. doi: 10.1073/pnas.1502651112. Epub 2015 Jul 20. Erratum in: *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2017 Aug 7;: PMID: 26195752; PMCID: PMC4534245.
- Sonter, L. J., Barrett, D. J., & Soares - Filho, B. S. (2014). Offsetting the Impacts of Mining to Achieve No Net Loss of Native Vegetation. *Conservation Biology*, 28(4), 1068-1076. <https://doi.org/10.1111/cobi.12260>
- Sonter, Laura J., Dade, M. C., Watson, J. E. M., & Valenta, R. K. (2020). Renewable energy production will exacerbate mining threats to biodiversity. *Nat Commun*, 11(1), 4174. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17928-5>
- Souchon, Y., & Nicolas, V. (2011). Barrages et seuils : Principaux impacts environnementaux. 29.
- Stahl, H., Yifaat Baron, & Diana Hay, Andreas Hermann, Georg Mehlhart Laura Baroni, Koen Rademaekers, Rob Williams, Sandeep Pahal. (2018). Evaluation of the Directive 2006/66/EC on batteries and accumulators and waste batteries and accumulators. <https://ec.europa.eu/environment/waste/pdf/Published%20Supporting%20Study%20Evaluation.pdf>
- Stamp, A., Lang, D. J., & Wäger, P. A. (2012). Environmental impacts of a transition toward e-mobility: The present and future role of lithium carbonate production. *Journal of Cleaner Production*, 23(1), 104-112. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.10.026>
- Stanley, D. A., & Stout, J. C. (2013). Quantifying the impacts of bioenergy crops on pollinating insect abundance and diversity: A field-scale evaluation reveals taxon-specific responses. *Journal of Applied Ecology*, 50(2), 335-344. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12060>
- Svoboda, N., Taube, F., Kluß, C., Wienforth, B., Kage, H., Ohl, S., Hartung, E., & Herrmann, A. (2013). Crop production for biogas and water protection—A trade-off? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 177, 36-47. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.05.024>
- Svoboda, N., Taube, F., Wienforth, B., Kluß, C., Kage, H., & Herrmann, A. (2013). Nitrogen leaching losses after biogas residue application to maize. *Soil and Tillage Research*, 130, 69-80. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.02.006>
- Száz, D., Mihályi, D., Farkas, A., Egri, Á., Barta, A., Kriska, G., Robertson, B., & Horváth, G. (2016). Polarized light pollution of matte solar panels: Anti-reflective photovoltaics reduce polarized light pollution but benefit only some aquatic insects. *Journal of Insect Conservation*, 20(4), 663-675. <https://doi.org/10.1007/s10841-016-9897-3>
- Szymanski, P., Deoniziak, K., Losak, K., & Osiejuk, T. S. (2017). The song of Skylarks *Alauda arvensis* indicates the deterioration of an acoustic environment resulting from wind farm start-up. *Ibis*, 159(4), 769-777. <https://doi.org/10.1111/ibi.12514>
- Taormina, B., Bald, J., Want, A., Thouzeau, G., Lejart, M., Desroy, N., & Carlier, A. (2018). A review of potential impacts of submarine power cables on the marine environment: Knowledge gaps, recommendations and future directions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, 380-391. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.026>
- Taormina, B., Laurans, M., Marzloff, M. P., Dufournaud, N., Lejart, M., Desroy, N., Leroy, D., Martin, S., & Carlier, A. (2020). Renewable energy homes for marine life: Habitat potential of a tidal energy project for benthic megafauna. *Marine environmental research*, 161, 105131-105131. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.105131>
- Terhoeven-Urselmans, T., Scheller, E., Raubuch, M., Ludwig, B., & Joergensen, R. G. (2009). CO2 evolution and N mineralization after biogas slurry application in the field and its yield effects on spring barley. *Applied Soil Ecology*, 42(3), 297-302. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2009.05.012>

- Thomas, K. A., Jarchow, C. J., Arundel, T. R., Jamwal, P., Borens, A., & Drost, C. A. (2018). Landscape-scale wildlife species richness metrics to inform wind and solar energy facility siting : An Arizona case study. *Energy Policy*, 116, 145-152. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.01.052>
- Thomaz, S. M., Pagioro, T. A., Bini, L. M., & Murphy, K. J. (2006). Effect of reservoir drawdown on biomass of three species of aquatic macrophytes in a large sub-tropical reservoir (Itaipu, Brazil). *Hydrobiologia*, 570(1), 53-59. <https://doi.org/10.1007/s10750-006-0161-9>
- Thomson, R. C., Chick, J. P., & Harrison, G. P. (2019). An LCA of the Pelamis wave energy converter. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(1), 51-63. <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1504-2>
- Thórhallsdóttir, T. (2007). Environment and energy in Iceland : A comparative analysis of values and impacts. *Environmental Impact Assessment Review*, 27, 522-544. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2006.12.004>
- Tölle, M. H., Gutjahr, O., Busch, G., & Thiele, J. C. (2014). Increasing bioenergy production on arable land : Does the regional and local climate respond? Germany as a case study. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(6), 2711-2724. <https://doi.org/10.1002/2013JD020877>
- Tougaard, J. (2015). Underwater Noise from a Wave Energy Converter Is Unlikely to Affect Marine Mammals. *PLOS ONE*, 10(7), e0132391. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132391>
- Tricas, T., & Gill, A. B. (2011). Effects of EMFs from Undersea Power Cables on Elasmobranchs and Other Marine Species. [Report]. <http://dspace.lib.cranfield.ac.uk/handle/1826/7785>
- Turney, D., & Fthenakis, V. (2011). Environmental impacts from the installation and operation of large-scale solar power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 3261-3270. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.04.023>
- Visser, E., Perold, V., Ralston-Paton, S., Cardenal, A. C., & Ryan, P. G. (2019). Assessing the impacts of a utility-scale photovoltaic solar energy facility on birds in the Northern Cape, South Africa. *Renewable Energy*, 133, 1285-1294. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.106>
- Von Cossel, M., Lewandowski, I., Elbersen, B., Staritsky, I., Van Eupen, M., Iqbal, Y., Mantel, S., Scordia, D., Testa, G., Cosentino, S. L., Maliarenko, O., Eleftheriadis, I., Zanetti, F., Monti, A., Lazdina, D., Neimane, S., Lamy, I., Ciadamidaro, L., Sanz, M., ... Alexopoulou, E. (2019). Marginal Agricultural Land Low-Input Systems for Biomass Production. *Energies*, 12(16), 3123. <https://doi.org/10.3390/en12163123>
- Wade, H. M., Masden, E. A., Jackson, A. C., & Furness, R. W. (2016). Incorporating data uncertainty when estimating potential vulnerability of Scottish seabirds to marine renewable energy developments. *Marine Policy*, 70, 108-113. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2016.04.045>
- Walston, L. J., Mishra, S. K., Hartmann, H. M., Hlohowskyj, I., McCall, J., & Macknick, J. (2018). Examining the Potential for Agricultural Benefits from Pollinator Habitat at Solar Facilities in the United States. *Environmental Science & Technology*, 52(13), 7566-7576. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00020>
- Walston, L. J., Rollins, K. E., LaGory, K. E., Smith, K. P., & Meyers, S. A. (2016). A preliminary assessment of avian mortality at utility-scale solar energy facilities in the United States. *Renewable Energy*, 92, 405-414. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.041>
- Walston, L. J., Rollins, K. E., Smith, K. P., LaGory, K. E., Sinclair, K., Turchi, C., Wendelin, T., & Souder, H. (2015). A Review of Avian Monitoring and Mitigation Information at Existing Utility-Scale Solar Facilities (ANL/EVS--15/2, 1176921; p. ANL/EVS--15/2, 1176921). <https://doi.org/10.2172/1176921>
- Wellig, S. D., Nussle, S., Miltner, D., Kohle, O., Glazot, O., Braunisch, V., Obrist, M. K., & Arlettaz, R. (2018). Mitigating the negative impacts of tall wind turbines on bats : Vertical activity profiles and relationships to wind speed. *Plos One*, 13(3), e0192493. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192493>
- Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., & Högy, P. (2019). Agrophotovoltaic systems: Applications, challenges, and opportunities. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(4), 35. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3>
- Williamson, B., Fraser, S., Williamson, L., Nikora, V., & Scott, B. (2019). Predictable changes in fish school characteristics due to a tidal turbine support structure. *Renewable Energy*, 141, 1092-1102. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.065>
- Wilson, J. C., Elliott, M., Cutts, N. D., Mander, L., Mendão, V., Perez-Dominguez, R., & Phelps, A. (2010). Coastal and Offshore Wind Energy Generation : Is It Environmentally Benign? *Energies*, 3(7), 1383-1422. <https://doi.org/10.3390/en3071383>
- World Bank. (2018). Where Sun Meets Water: Floating solar market. <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/31880/Floating-Solar-Market-Report.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Yang, L., Gao, X., Lv, F., Hui, X., Ma, L., & Hou, X. (2017). Study on the local climatic effects of large photovoltaic solar farms in desert areas. *Solar Energy*, 144, 244-253. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.01.015>
- Zhai, H., Cui, B., Hu, B., & Zhang, K. (2010). Prediction of river ecological integrity after cascade hydropower dam construction on the mainstream of rivers in Longitudinal Range-Gorge Region (LRGR), China. *Ecological Engineering*, 36(4), 361-372. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.10.002>
- Zimmerling, J., Pomeroy, A., d'Entremont, M., & Francis, C. (2013). Canadian Estimate of Bird Mortality Due to Collisions and Direct Habitat Loss Associated with Wind Turbine Developments. *Avian Conservation and Ecology*, 8(2). <https://doi.org/10.5751/ACE-00609-080210>
- Zona, D., Janssens, I. A., Aubinet, M., Gioli, B., Vicca, S., Fichot, R., & Ceulemans, R. (2013). Fluxes of the greenhouse gases (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O) above a short-rotation poplar plantation after conversion from agricultural land. *Agricultural and Forest Meteorology*, 169, 100-110. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.10.008>
- Zwart, M. C., Dunn, J. C., McGowan, P. J. K., & Whittingham, M. J. (2016). Wind farm noise suppresses territorial defense behavior in a songbird. *BEHECO*, 27(1), 101-108. <https://doi.org/10.1093/beheco/arv128>

## ANNEXE

### CADRE STRATEGIQUE ET REGLEMENTAIRE POUR EVITER, REDUIRE OU COMPENSER (ERC) LES IMPACTS DES INSTALLATIONS D'ENERGIE RENOUVELABLES ET ANALYSE DU CYCLE DE VIE

Le cadre ERC est le cadre réglementaire pour la prise en compte des enjeux de biodiversité dans les projets d'aménagement d'infrastructures. Le bilan écologique de cette séquence (voir figure 1) propose que pour toute activité, des mesures d'évitement soient appliqués pour les impacts qui peuvent être évités, que des mesures de réduction soient appliquées pour tous les impacts qui ne peuvent être évités et que les éventuels impacts résiduels fassent l'objet de mesures de compensation.

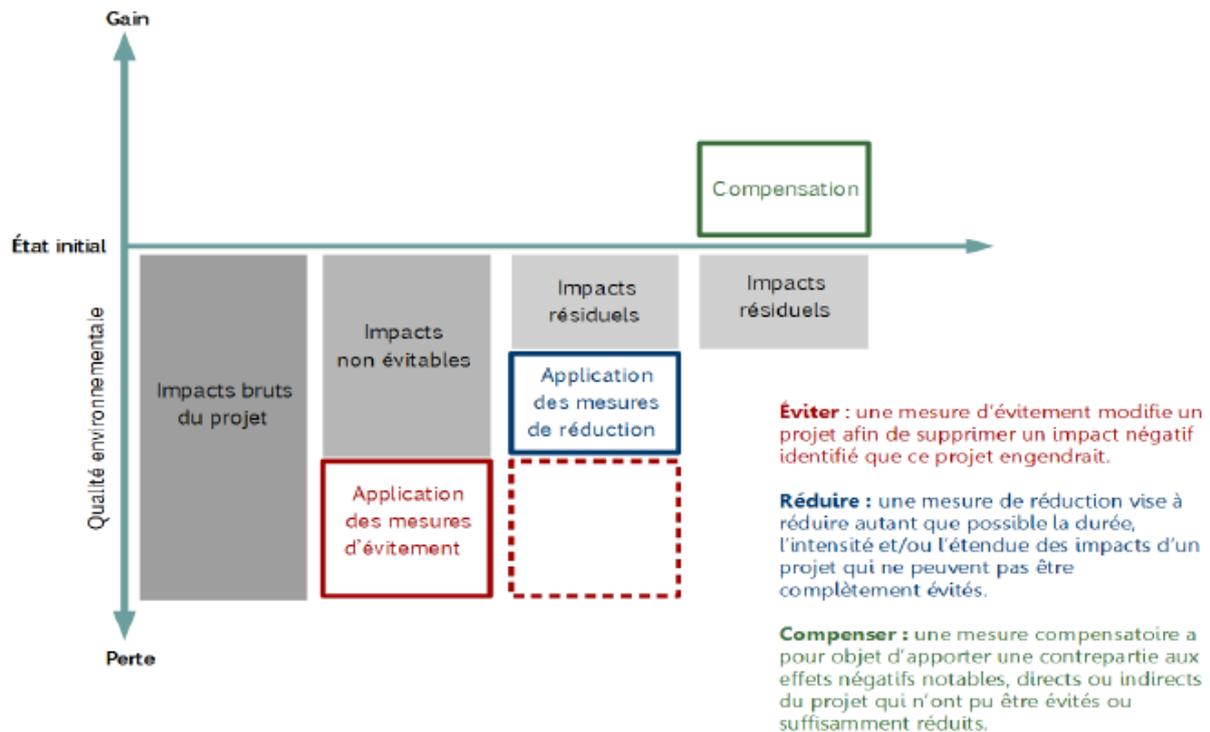


Figure 1 : Bilan écologique de la séquence ERC

### EVITER LES IMPACTS DES ENERGIES RENOUVELABLES

La notion d'évitement est la première étape du traitement des impacts potentiels liés au projet. L'analyse des besoins réels auxquels doit répondre un projet peut permettre, dans une concertation large, d'imaginer un autre type d'infrastructure pouvant mieux répondre aux besoins.

Ainsi, le rapport final du projet E=RC+ présente les recommandations produites par les experts mobilisés, à savoir que les mesures d'évitement doivent :

- être placées très en amont et être l'occasion de réinterroger la pertinence du projet d'aménagement ;
- constituer un projet de territoire en tant que tel et, de fait, être prises en compte dans la planification territoriale ;
- aborder plusieurs temporalités et spatialités en lien avec les dynamiques écologiques ;
- être documentées et archivées ;
- être analysées et suivies pour en mesurer l'efficacité ;
- permettre d'investiguer les problématiques liées à la sensibilisation du grand public aux enjeux de biodiversité.

L'évitement d'impacts sur la biodiversité peut être réalisé lors des phases de construction, d'exploitation et de retraitement lors de la fin de vie de l'installation de production.

### **Phase d'implantation : choix du site et de la technologie**

Cette logique d'évitement commence en amont du projet d'installation, une fois que le besoin d'une nouvelle installation ne peut lui-même être évité. Pour cela, c'est la localisation du site d'implantation qui devra être pensée pour éviter des impacts sur la biodiversité.

Il conviendra ainsi

- d'exclure les implantations sur zones protégées ou à fort intérêt en terme de biodiversité, comme les zones migratoires, de reproduction ou d'alimentation ;
- corolairement, d'identifier les terres à faible valeur de conservation ou déjà artificialisées, abandonnées ou dégradées.

Pour cette phase, des outils sur base de données de biodiversité géolocalisées, permettant d'établir le niveau d'intérêt en termes de conservation des sites envisageables, peuvent aider à la décision.

Le choix des technologies à implanter peut permettre d'éviter certains impacts. Par exemple, pour les énergies marémotrices, il est possible de recourir à des hydroliennes que l'on pose sur fond marin lors de leur installation et qui tournent lentement au gré des courants et sont ainsi moins impactantes. Mais il s'agit toutefois d'une technologie relativement récente dont il n'existe pas encore de ferme de plusieurs dizaines de machines dans un endroit donné. On ne peut pas mettre de côté l'hypothèse selon laquelle l'effet cumulé de ces installations pourrait avoir des conséquences dommageables pour l'écosystème. Même si nous réalisons des modélisations pour comprendre les mouvements de sable qu'elles pourraient engendrer à l'échelle de parcs, il est difficile de prévoir les conséquences sur les organismes du fond marin.

Il existe aussi des recherches pour mettre au point des technologies qui exploitent les mouvements de la masse d'eau grâce à une membrane qui ondule dans la colonne d'eau, y compris avec des courants faibles, et qui est conçue sur le modèle de nage des mammifères ou celui des très grandes algues qui absorbent l'énergie des marées. On est encore au stade de prototype, mais ce projet est très intéressant au niveau environnemental, car on s'épargne les risques de collision et on se rapproche de ce qui existe dans la nature.

### **Phase de travaux : limiter les perturbations temporaires**

Les impacts pendant la phase de travaux peuvent être très importants, il convient donc

- D'avoir identifié toutes les nuisances liées aux travaux.
- D'avoir identifié la période d'activité des espèces potentiellement menacées ou sensibles à ces nuisances.
- De réaliser les travaux en dehors des périodes sensibles (de la journée ou de l'année), notamment lors du passage journalier ou migratoire d'espèces faunistiques, ou lors des périodes de reproduction.
- D'utiliser des matériaux neutres chimiquement pour l'environnement pour éviter les risques de pollution et de contamination des espèces présentes.
- D'utiliser des techniques ou technologies les moins bruyantes ou les moins lumineuses.

Pour éviter les collisions avec les pâles d'éoliennes, une mesure simple est d'éviter d'implanter des éoliennes à proximité des zones Natura 2000. En effet, deux fois plus de cadavres d'oiseaux sont retrouvés en moyenne au pied des éoliennes implantées dans ou à proximité des zones de protections spéciales (zones Natura 2000 inscrites au titre de la Directive Oiseaux), et ils appartiennent bien plus qu'ailleurs à des espèces patrimoniales (inscrites en liste rouge ou à l'Annexe I de la Directive Oiseaux).

Pour éviter les impacts liés à la pose de câbles sous-marins, il est possible de dévier les trajets des câbles pour éviter de perturber les habitats sensibles (par exemple habitats des maërl), ou éviter les implantations pendant la saison de reproduction ou d'élevage des jeunes, en particulier oiseaux et mammifères marins.

### **Phase d'exploitation : surveiller et adapter le fonctionnement**

Les installations présentent presque toujours des impacts en raison de leur fonctionnement. Les impacts les plus importants en lien avec ce fonctionnement, pour les énergies considérées dans cette étude, sont les collisions avec les pâles d'éoliennes, qu'elles soient en milieu terrestre ou marin.

Pour éviter cela, l'arrêt ou la modification du fonctionnement de l'installation peut être envisagé lors de la période d'impact éventuel. Ces arrêts ou modifications peuvent être plus ou moins anticipés selon la connaissance du comportement des espèces concernées, ou par la mise en place de systèmes de surveillance et d'alerte indiquant la présence de ces espèces. Avec une connaissance fine des risques potentiels, des espèces concernées et de leurs comportements, des réglages techniques peuvent éviter

ces risques comme l'adaptation de la vitesse de démarrage des turbines d'éoliennes. De plus, la réduction de la fréquence des opérations de maintenance permettrait d'éviter des impacts liés à ces interventions.

## REDUIRE LES IMPACTS DES ENERGIES RENOUVELABLES

Si les impacts de l'installation n'ont pu être totalement évités ou si son fonctionnement ne peut être adapté pour éviter les impacts sur la biodiversité, il convient d'envisager des stratégies de réduction de ces impacts, idéalement à des niveaux acceptables écologiquement. Dans le cas des éoliennes, les résultats de recherche recommandent de placer les éoliennes à plus de 1000 mètres des espaces boisés ou des haies, pour que des espèces qui ne sont pas sensibles à la mortalité directe par les éoliennes ne subissent pas une perte d'habitat par évitement des paysages éoliens (les recommandations officielles font état de 200 mètres et elles ne sont pas toujours suivies).

Lors de l'installation, les impacts liés aux travaux peuvent être réduits en limitant les perturbations, par exemple à l'aide d'isolants acoustiques, ou en repoussant les espèces potentiellement impactées, par exemple par l'utilisation de rideaux de bulles en milieu marin. Le choix des infrastructures et de leur implantation peut également permettre de limiter en partie ces impacts. Pour les panneaux photovoltaïques, l'espacement entre les rangées peut réduire les impacts en laissant passer en partie la lumière ou bien en implantant ces panneaux en colocation avec des activités agricoles (« agriPV »). L'espacement de l'installation vis-à-vis des milieux naturels environnants (éléments boisés notamment) permet également de réduire les impacts potentiels.

Lors du fonctionnement, la réduction des impacts sur la biodiversité peut être réalisée par des dispositifs de dissuasion (acoustique, visuelle, chimiosensorielle), de signalisation (visibilité des turbines ou des pales par exemple) ou de détournements (construction de nichoirs par exemple, ou déviation du vol des oiseaux). Ces stratégies ne relèvent pas de l'évitement car elles entraînent une modification des habitudes et des déplacements des espèces concernées, ce qui peut affecter leurs performances et leur survie. Pour les installations hydroélectriques, la re-création de débits environnementaux aussi similaires que possibles au régime naturel permettra de réduire les risques d'entrave au déplacement des espèces ou les risques de sédimentation qui peuvent modifier les habitats.

## COMPENSER

La compensation peut porter sur la perte d'habitat ou de connectivité. Ainsi la restauration d'habitats (perchoirs, aires de repos, aires d'alimentation) dans d'autres sites peut représenter une compensation pour les habitats détruits par l'installation. Dans une optique zéro artificialisation nette, toute artificialisation nouvelle devra être compensée par la dés-artificialisation d'autres sites, au moins à « quantité » égale, ces quantités pouvant être pondérées par des ratios selon l'intérêt des milieux en termes de biodiversité. Au niveau des fondations en milieu marin, la création de cavités de différentes tailles peut favoriser l'implantation d'espèces benthiques et ainsi recréer des habitats.

La restauration de connectivités paysagères peut également permettre de compenser l'obstacle que peuvent représenter ces installations pour le déplacement de certaines espèces au niveau de ces sites, comme la construction de passes à poissons pour les installations hydroélectriques ou par la destruction d'anciennes installations, ou autres corridors d'une façon générale.

D'autres dispositions à co-bénéfice peuvent aussi permettre de compenser une partie des impacts, comme dans le cas des tampons bioénergétiques, éléments linéaires implantés avec biomasse pérenne présentant des intérêts en termes de connectivité, de régulation du climat, qualité des eaux, conservation de la biodiversité et de la santé des sols.

## SURVEILLANCE ET ALERTE

Afin d'évaluer et surveiller les impacts sur la biodiversité, il est absolument nécessaire de disposer notamment de références, et notamment les états « zéro » des sites envisagés pour aménagement. Le monitoring au niveau de ces sites peut être réalisé à différents niveaux :

- Du monitoring sur les espèces concernées : de la présence ou passage par détection visuelle, acoustique ou autres ; des événements (taux d'évasion ou collisions)
- Du monitoring sur les pressions exercées : émissions sonores, visuelles, chimiques de l'installation ; modification des débits et courants (aériens ou marins)

En association avec les données plus fondamentales portant sur les espèces concernées, des innovations techniques et scientifiques sont encore nécessaires afin d'améliorer les dispositifs de

surveillance et d'inventaire des espèces concernées. L'établissement de standards pour les inventaires, les recueil et transmission de données des suivis sur les sites de production d'énergies renouvelables permettra une meilleure observation, aidera à la décision et permettra la comparaison et l'agrégation de suivis entre sites.

Afin de mieux intégrer les impacts cumulés des sites d'énergies marines renouvelables, les pouvoirs publics ont mis en place un groupe de travail dédié « ECUME » (cf encadré).

Le **GT ECUME** animé par le CEREMA et l'OFB (ex AFB), coordonné par France énergies marines avec l'appui du CGDD et autres services, regroupe des experts scientifiques (INERIS, CEREMA, BRGM, CNRS, IFREMER, MNHN, OFB, SFPEM, etc.) afin de couvrir le milieu physique, les habitats et la mégafaune marine, ainsi que des experts socio-professionnels (FNE, UICN, Syndicat de énergies renouvelables, Association Français Energie Eolienne, Comité nationale des pêches, Comité national de conchiliculture, RTE). Ses objectifs sont d'améliorer la prise en compte de la question des impacts cumulés des projets d'énergies marines renouvelables, pour les services de l'Etat et les porteurs de projets, d'identifier les connaissances scientifiques manquantes pour cette analyse et comment répondre aux lacunes, et sécuriser les autorisations administratives des projets d'EMR afin de contribuer aux engagements de la France pour la réservation des écosystèmes marins.

Plusieurs projets en en cours ou en préparation sont à signaler :

- BIRDRIK : Risques de collision pour l'avifaune (arc Atlantique)
- BRUICUME : Impact du bruit sous-marin sur les mammifères marins (test sur parcs EMR Courseulles et Fécamp)
- HABECUME : Perte et modification d'habitat pour les habitats et communautés benthiques CEREMA/BRGM/OF/IFREMER/INERIS (test sur parcs EMR Courseulles et Fécamp)
- POLLUCUME : Pollution chimique et habitats benthiques INERIS (test sur parcs EMR Courseulles et Fécamp)
- ECOCUME : Modélisation de l'impact sur l'écosystème (test sur parcs EMR Courseulles et Fécamp)

## PRATIQUES ET GESTION

Les données sur les impacts sur la biodiversité et les dispositifs de suivis et de surveillance visent à guider l'action, et notamment à répondre aux attendus de la législation et en premier lieu à s'assurer de l'absence de perte nette, voire d'un gain local de biodiversité, et répondre aux obligations de résultats des mesures de compensation qui peuvent conditionner l'autorisation du projet.

Des recherches sont également nécessaires sur l'efficacité des mesures ou dispositions de gestion de ces impacts, ainsi que sur les seuils de pression à ne pas dépasser. Des travaux de modélisation des risques (par exemple de collision), des modifications de l'environnement et des effets à plus long terme (application de digestat sur les flux de matière et la productivité primaire par exemple) doivent également être menés pour améliorer la prédiction des impacts potentiels. Des innovations sont encore nécessaires afin de créer ou améliorer les dispositifs d'évitement ou de dissuasion (visuels, chimiosensoriels, acoustiques, etc.).

### Les apports de l'analyse de cycle de vie

L'analyse de cycle de vie des produits (ACV) est un outil d'aide à la décision intéressant. Pour rappel, c'est une méthode multi-enjeux qui permet d'établir un bilan sur l'ensemble du cycle de vie en détectant des vices cachés ou des dilemmes à trancher. La méthode ACV est « classiquement » basée sur une comptabilité des flux matière et énergie et permet théoriquement de déterminer les impacts sur la santé humaine, la dégradation des écosystèmes et l'épuisement des ressources. Cependant, elle n'est pas complètement adaptée, dans sa forme actuelle, à évaluer les impacts sur la biodiversité : elle ne prend pas en compte la sensibilité des milieux impactés, ni les impacts locaux ou la fragmentation des milieux, et elle n'est pas non plus capable de modéliser les différences de pratique sur le terrain. Elle permet cependant de révéler des points d'attention biodiversité sur l'ensemble du cycle de vie, par exemple en matière de production solaire photovoltaïque.

L'ACV biodiversité permet aujourd'hui de faire une photo des impacts mais une photo « floue ». Il est donc important de continuer à creuser la question pour améliorer la « précision » biodiversité de l'outil.

La proposition de l'outil « Product Biodiversity Footprint » suivi par l'OFB, l'ADEME et le MTES incorpore les travaux de recherche des écologues, secteur par secteur, pour les hybrider avec les bases de données ACV et rendre ainsi les résultats de l'ACV plus pertinents en matière de biodiversité. Ces travaux permettront ainsi de valoriser dans l'empreinte produit les pratiques favorables à la biodiversité dans les énergies renouvelables (exemple de l'éolien en sélectionnant des milieux moins vulnérables et en adoptant des technologies permettant de réduire la mortalité des chauve-souris).

Comparer les impacts sur la biodiversité, directs et indirects, des modes de production d'énergie demande des outils, notamment les ACV, qui restent très incomplètes, perfectibles. Il importe qu'elles prennent mieux en compte les impacts sur la biodiversité en amont –extraction des matériaux nécessaires...-, ET en aval, liés notamment au recyclage et au démantèlement des infrastructures obsolètes.

Dans les études ACV, les autres catégories liées, par exemple, à la biodiversité et aux impacts marins devraient être abordées et doivent faire l'objet d'une plus grande attention ; ces informations permettront d'améliorer les normes de surveillance environnementale et les meilleures pratiques pour la conception des dispositifs (Paredes *et al.*, 2019 ; Thomson *et al.*, 2019). Tout ceci est conditionné à la nécessaire évolution des méthodes d'évaluation des impacts des installations sur l'environnement pour mieux prendre en compte la biodiversité et donc les espèces potentiellement impactées, leur écologie et leur comportement.