



Synthèse de l'article

Renewable energy and biodiversity:

Implications for transitioning to a Green Economy

27 OCTOBRE 2017

Référence Alexandros Gasparatos, Christopher N.H. Doll, Miguel Esteban, Abubakari Ahmed, Tabitha A. Olang. 2017.

Renewable and Sustainable Energy Reviews 70, 161–184

www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116304622

Énergie renouvelable et biodiversité : les implications pour parvenir à une économie verte

1. Introduction	2
2. Énergie solaire	
2.1. Contexte	4
2.2. Facteurs de changement des écosystèmes et de perte de biodiversité	4
2.3. Mesures d'atténuation des impacts	5
3. Énergie éolienne	
3.1. Contexte	6
3.2. Facteurs de changement des écosystèmes et de perte de biodiversité	7
3.3. Mesures d'atténuation des impacts	8
4. Énergie hydro-électrique	
4.1. Contexte	9
4.2. Facteurs de changement des écosystèmes et de perte de biodiversité	9
4.3. Mesures d'atténuation des impacts	10
5. Bioénergie	
5.1. Contexte	11
5.2. Facteurs de changement des écosystèmes et de perte de biodiversité	12
5.3. Mesures d'atténuation des impacts	15
6. Énergie océanique	
6.1. Contexte	16
6.2. Facteurs de changement des écosystèmes et de perte de biodiversité	16
6.3. Mesures d'atténuation des impacts	18
7. Géothermie	
7.1. Contexte	19
7.2. Facteurs de changement des écosystèmes et de perte de biodiversité	20
7.3. Mesures d'atténuation des impacts	20
8. Discussion	
8.1. Synthèse sur les facteurs de pression	21
8.2. Lacunes dans les connaissances et les pratiques et recommandations	21
8.3. Implications politiques relatives aux interactions entre énergies renouvelables et biodiversité	23
9. Conclusion	25



1. Introduction

Le concept de l'économie verte s'est imposé progressivement chez les universitaires et les décideurs. L'économie verte a été l'un des deux thèmes de la Conférence des Nations unies de 2012 sur le développement durable (UNCSD-2012) tenue à Rio de Janeiro, et communément appelée Rio + 20. Le programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE) a été à l'avant-garde du discours en faveur de l'économie verte dans la perspective de Rio + 20, qui a abouti à la publication de son rapport historique Green Economy et à des conseils sur la façon de formuler des politiques économiques vertes, en mesurer les progrès et modéliser les effets futurs d'une transition énergétique verte.

L'économie verte est donc définie ici comme un système économique qui conduit à une « amélioration du bien-être humain et de l'équité sociale, tout en réduisant de manière significative les risques environnementaux et les pénuries écologiques... Dans une économie verte, la croissance du revenu et de l'emploi est liée aux investissements publics et privés qui réduisent les émissions de carbone et la pollution, améliorent l'efficacité énergétique et des ressources et empêchent la perte de biodiversité et les services écosystémiques ».

Investir dans le capital naturel et accroître l'efficacité de l'énergie par rapport à l'utilisation des ressources sont les deux stratégies clés pour développer des secteurs économiques « verts » comme moyen de transition. La conservation de la biodiversité¹ et le maintien des services écosystémiques² sont des piliers essentiels des efforts pour une transition vers une économie verte.

Le premier pilier est une stratégie majeure pour les secteurs économiques qui dépendent des ressources biologiques, comme l'agriculture, la foresterie et la pêche. Le second est essentiel pour réduire l'intensité de l'exploitation des ressources et l'impact environnemental pour les secteurs économiques qui dépendent de la transformation du capital naturel comme la fabrication, le transport et la construction.

Selon le PNUE, le développement à grande échelle des énergies renouvelables est une démarche clé pour verdifier l'économie en considérant³ :

- son potentiel d'atténuation du changement climatique
- son potentiel d'économie d'énergie fossile
- sa capacité à générer des « emplois verts »

Alors que les énergies renouvelables représentent actuellement une proportion relativement faible de la consommation énergétique totale mondiale (~ 19,1%)⁴ en 2013, elle peut potentiellement répondre à tous les besoins en énergie de l'humanité. En 2014, 164 pays avaient déjà adopté différents types de politique sur les énergies renouvelables, contre 48 en 2004. Par exemple, l'UE vise à répondre

1 - La biodiversité est « la variabilité entre les organismes vivants de toutes nature, y compris ... les écosystèmes terrestres, marins et autres écosystèmes aquatiques et les complexes écologiques dont ils font partie : cela inclut la diversité dans les espèces, entre les espèces et les écosystèmes ». Dans la présente étude, nous adoptons la définition de la diversité biologique proposée par la Convention sur la diversité biologique (CDB) puisqu'elle est couramment utilisée, a un statut politique et est inclusive.

2 - Les services écosystémiques sont les avantages que les humains tirent directement et indirectement des écosystèmes, qui contribuent de multiples façons au bien-être humain. Dans le premier discours sur les services écosystémiques, la biodiversité n'a pas été conceptualisée en tant que service écosystémique, mais comme base des services écosystémiques. Cependant, le rôle de la biodiversité pour la fourniture de services écosystémiques et, dans une certaine mesure, sa contribution au bien-être humain, est beaucoup plus compliqué.

3 - Ce triptyque d'objectifs politiques figure souvent dans des directives qui visent à catalyser l'adoption des énergies renouvelables, par exemple la directive européenne sur les énergies renouvelables.

4 - dont 10,1% provenaient d'énergies renouvelables modernes et 9% de biomasse traditionnelle.

à 20% de ses besoins énergétiques totaux grâce aux énergies renouvelables d'ici 2020.

Cependant, à l'exception de certaines filières d'énergie renouvelable fortement consommatrices de terres, comme la bioénergie, les impacts négatifs potentiels des énergies renouvelables sur la biodiversité et les écosystèmes ont été sous-estimés dans le cadre du discours actuel sur l'économie verte.

Plusieurs études et travaux de synthèse ont confirmé que certaines filières d'énergie renouvelable avaient des impacts négatifs majeurs sur la biodiversité en perturbant les processus écosystémiques portant potentiellement atteinte à la fourniture de services écosystémiques.⁵

Par ailleurs, les évaluations réalisées dans le cadre de la plate-forme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES), ont discuté de la manière dont les pressions qui conduisent au changement des écosystèmes apparaissent dans différentes parties du monde et sont liés à une multitude d'interventions humaines.

Bien qu'une adoption à grande échelle d'énergies renouvelables puisse réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) et améliorer l'efficacité de l'utilisation des ressources, elle pourrait également être en contradiction avec la conservation de la biodiversité et le maintien des services écosystémiques, un pilier pourtant essentiel d'une économie verte.

L'objectif de cette revue de la littérature est de rassembler des éléments de preuve sur les mécanismes par lesquels différentes technologies d'énergie renouvelable peuvent générer des changements dans les écosystèmes et contribuer à la perte de biodiversité, ainsi que d'identifier les compromis émergents associés à l'économie verte.

Les filières d'énergie renouvelable passées en revue dans la présente étude concernent des filières actives (ayant dépassé le stade expérimental⁶) et comprennent l'énergie solaire (**section 2**), l'énergie éolienne (**section 3**), l'hydroélectricité (**section 4**), la bioénergie (**section 5**), l'océan (**section 6**) et l'énergie géothermique (**section 7**)⁷. La **section 8.1** résume les éléments de preuves actuelles en reprenant les différentes pressions de l'évaluation des écosystèmes pour le millénaire en matière de modification des écosystème et de perte de biodiversité. La **section 8.2** identifie les lacunes clés en matière de connaissances ou de pratiques et fournit des suggestions sur la façon de mieux gérer les compromis de la biodiversité lors de la planification de projets à grande échelle en matière d'énergies renouvelables. Enfin, la **section 8.3** traite de certaines des principales implications politiques à l'interface entre les énergies renouvelables, la conservation de la biodiversité et l'économie verte.

5 - Ces facteurs de changement d'écosystème et de perte de biodiversité partagent des similitudes importantes avec ceux d'initiatives ultérieures telles que TEEB et IPBES.

6 - Par exemple, les auteurs ne considèrent pas certaines technologies avancées d'énergie renouvelable telles que les biocarburants de 3^{ème} génération (biocarburants d'algues) qui n'ont pas été déployées au-delà des conditions de laboratoire, même si elles pourraient avoir un impact sur les écosystèmes et la biodiversité

7 - Il existe un large éventail de publications pertinentes pour certaines filières d'énergie renouvelable (par exemple, l'hydroélectricité, la bioénergie) et des manques pour d'autres (par exemple océan, géothermie). Pour cette raison, la présente analyse, plutôt que d'être exhaustive, tente d'identifier les mécanismes clés par lesquels chacune de ces filières d'énergie renouvelable contribue au changement d'écosystème et à la perte de biodiversité.

2. Energie solaire

2.1. Contexte

L'énergie solaire exploite la puissance du soleil pour générer de l'électricité soit directement à l'aide de panneaux photovoltaïques (PV), soit indirectement par l'intermédiaire de dispositifs concentrateurs d'énergie solaire (CSP). Les technologies CSP utilisent des ensembles de miroirs qui suivent le soleil et renvoient continuellement ses rayons jusqu'à un point (héliostats) où sera chauffé un liquide, qui est ensuite utilisé pour générer de l'électricité dans une turbine conventionnelle⁸. Les technologies solaires émergentes utilisent également la lumière du soleil concentrée sur des panneaux solaires de qualité supérieure⁹. L'énergie solaire concentrée exige généralement de grandes surfaces pour être efficace, tandis que les panneaux photovoltaïques solaires peuvent être répartis et montés sur n'importe quelle surface exposée au soleil, ce qui les rend aptes à s'intégrer dans l'environnement urbain ou des structures créées par l'homme.

La génération d'énergie solaire à grande échelle fait appel à des fermes solaires de capacité industrielle (Utility Scale Solar Energy) qui ont une durée de vie de 25 à 40 ans. La production d'énergie solaire a augmenté rapidement au cours des dernières décennies. En 2014, des panneaux solaires produisant 177 GW et des dispositifs de concentration d'énergie solaire produisant 4,4 GW ont été installés à l'échelle mondiale. Les impacts écologiques de l'énergie solaire sont souvent supposés négligeables. Cependant, les fermes solaires de capacité industrielle peuvent affecter les écosystèmes de multiples façons tout au long de leur cycle de vie (construction-opération-démembrement) bien qu'actuellement, certains de ces effets soient le fruit d'hypothèses encore peu soutenues par des travaux évalués par les pairs.

2.2. Facteurs de changement des écosystèmes et de perte de biodiversité

Perte et modification d'habitats

La plupart des effets bien documentés de l'énergie solaire sur les écosystèmes et la biodiversité se manifestent par la perte et le changement d'habitats. Le développement des infrastructures de captages de l'énergie solaire nécessite en effet des surfaces importantes de terres, modifiant et fragmentant parallèlement les habitats.

Les infrastructures de captage de l'énergie solaire et, en particulier, les fermes solaires de capacité industrielle occupent des étendues de terres de plus en plus vastes, mais leur conception, leur empreinte et leur efficacité peut varier considérablement. Les infrastructures de soutien (par exemple, les voies d'accès et les équipements électriques) et l'exigence d'espacement des panneaux, peuvent entraîner en matière de besoins réels d'espace pour les installations d'énergie solaire environ 2,5 fois la surface des panneaux eux-mêmes.

Les infrastructures de grande ampleur, type fermes solaires de capacité industrielle, et les activités de préparation des sols associées (élimination de la végétation, élimination des couches supérieures du sol...) fragmentent les habitats constituent des obstacles au déplacement des espèces, affectent les stratégies des prédateurs et la disponibilité en nourriture¹⁰.

8 - Les dispositifs de concentration d'énergie solaire peuvent avoir une configuration où les miroirs concentrent l'énergie solaire vers une tour centrale, ou un système de miroirs paraboliques qui renvoient la chaleur sur le point focal du réseau.

9 - Les systèmes de concentrateurs photovoltaïques utilisent des lentilles et des détecteurs de la position du soleil pour concentrer la lumière du soleil sur les cellules photovoltaïques. Ils sont assez proches de la conception conventionnelle des panneaux solaires mais, pour le moment, ont connu un déploiement relativement limité.

10 - Les fermes solaires de capacité industrielle peuvent, parfois, fournir des sites de nidification. Cependant, cela peut devenir une menace si elles attirent des espèces dans des zones dangereuses comme les aéroports.

Mortalités et traumatismes

Des études ont également mis en évidence la mortalité directe des oiseaux causés par les collisions avec les héliostats et des brûlures mortelles dues à la focalisation des rayons solaires. Les taux de mortalité varient considérablement en fonction des configurations de captage d'énergie solaire selon qu'elles utilisent des panneaux ou des concentrateurs de différents types.

Perturbation des comportements biologiques

La lumière polarisée générée par de telles installations peut aussi perturber les insectes qui déposent leurs œufs sur les panneaux, ce qui affecte leurs probabilités de reproduction. En outre, l'éclat lumineux des installations de concentration d'énergie solaire attire les insectes, puis des oiseaux prédateurs qui peuvent alors être tués par le flux solaire ou soumis à des prédateurs supérieurs, ce qui transforme l'installation un piège écologique.

Compétition pour les usages de l'eau

Les dispositifs concentrateurs d'énergie solaire utilisent également de grandes quantités d'eau, ce qui a un effet dramatique dans les environnements à faible disponibilité en eau, comme en témoignent les périodes d'assèchement prolongées des masses d'eau temporaires qui hébergent des espèces endémiques et migratrices.

Pollution des sols et de l'eau

Afin de maintenir l'efficacité des panneaux solaires, les terrains défrichés sont souvent entretenus avec des anti-poussières et des herbicides, en plus des autres produits toxiques utilisés dans les fermes solaires de capacité industrielle. L'utilisation de suppresses de poussière peut à la fois augmenter le ruissellement et modifier les propriétés chimiques clés des voies navigables adjacentes lorsqu'elles sont éliminées.

Modification des microclimats locaux

Enfin, les fermes solaires de capacité industrielle peuvent affecter les microclimats locaux. Par exemple, des changements de température du sol ont été rapportés autour d'une ferme solaire en Chine (0,5-4°C plus bas au printemps et en été et plus élevés par la même gamme en hiver) par rapport aux sites de référence non équipés. Cet effet d'isolation a été attribué non seulement à l'ombrage physique, mais aussi à l'altération des flux d'air autour de la structure. Cependant, les travaux disponibles dans des revues à comité de lecture sur ces effets microclimatiques sont encore extrêmement rares.

Impacts positifs

Il convient de noter que, contrairement aux dispositifs de grande ampleur (fermes solaires) qui nécessitent des surfaces importantes de terres nues, la généralisation des panneaux solaires sur les toits et les façades du bâtiment sont peu impactants lorsqu'ils sont montés sur des structures existantes (en grande partie en milieu urbain) ce qui évite de convertir ou fragmenter les habitats. Si ces installations photovoltaïques sont combinées avec des toits verts, elles peuvent potentiellement fournir de l'habitat à certaines espèces végétales ou à des insectes et fournir un certain nombre de services écosystémiques dans les zones urbaines.

2.3. Mesures d'atténuation des impacts

Localisation d'installations d'énergie solaire dans des zones à faible biodiversité.

Une règle générale est de développer les fermes solaires de capacité industrielle dans les zones désertiques qui combinent des niveaux élevés d'insolation solaire

avec des niveaux relativement bas de couverture nuageuse et de biodiversité¹¹. Des modélisations de simulation suggèrent qu'il existe suffisamment de surfaces compatibles dans le désert californien pour atteindre les objectifs de cet État en matière d'énergie solaire¹². D'autres suggestions incluent l'utilisation de zones dégradées à faible valeur de conservation ou même l'environnement urbain. Par exemple, on a estimé que 200 000 ha de terrain à faible pente et à faible valeur de conservation seraient suffisants pour atteindre tous les objectifs de la Californie en matière d'électricité renouvelable.

Elaboration de procédures opérationnelles favorables à la biodiversité spécifiques des installations d'énergie solaire

De nombreuses organisations comme les agences gouvernementales fournissent des lignes directrices pour la planification efficace des futures installations d'énergie solaire, mais leurs recommandations en matière de biodiversité varient considérablement. Aux États-Unis, par exemple, les lignes directrices de Caroline du Nord se contentent d'identifier certaines espèces d'arbres protégés menacés par les coupes rases préalables à l'installation des fermes solaires. D'autres États vont plus loin et détaillent activement la manière dont la biodiversité peut être gérée dans les fermes solaires en fournissant des conseils sur la manière d'élaborer des plans d'action pour la biodiversité. En Arizona, l'importance des eaux de surface pour la faune est rappelée et il est souligné que les installations solaires devraient être développées en dehors des principales périodes de reproduction. Au Royaume-Uni, où les installations d'énergie solaire sont généralement situées dans des prairies ou des pâturages, les recommandations incluent la promotion des zones de nidification, l'ensemencement en pollens et l'établissement de bandes nectarifères, l'utilisation de moutons pour le pâturage autour des panneaux et le retour de la surface à son utilisation d'origine lors de l'arrêt du projet. Les mesures d'atténuation pour le milieu aquatique comprennent l'évitement des zones à forte valeur de conservation et les zones sensibles, la création de zones tampons pour limiter l'érosion et le ruissellement des eaux de surface et réduire l'utilisation des herbicides. La plupart des conseils concernent le suivi détaillé du site, y compris la surveillance des prélèvements d'eau.

3. Énergie éolienne

3.1. Contexte

L'énergie éolienne est générée à partir de turbines alimentées par de grandes pales rotatives. Depuis leur introduction généralisée dans les années 1980, leur taille (rayon de la pale) et la hauteur au-dessus du sol ont considérablement augmenté. Les plus grandes éoliennes ont plus de 100 m de diamètre, tournant de 100 à 120 m au-dessus du sol et générant 5 MW de puissance.

Au cours des deux dernières décennies, l'énergie éolienne a été l'une des technologies de production d'énergie qui a connu la plus forte croissance. En 2014, la capacité d'énergie éolienne installée s'élevait à 370GW, la Chine, les États-Unis et l'Allemagne étant les leaders mondiaux.

Alors que la production d'énergie éolienne peut avoir un certain nombre d'im-

11 - Il convient de souligner que certains écosystèmes désertiques accueillent des espèces hautement spécialisées et rares qui sont connues pour être particulièrement vulnérables à l'activité humaine.

12 - Ces modèles de simulation reposent souvent sur le principe selon lequel le développement de l'énergie solaire devrait se produire de manière préférentielle sur des terres fortement dégradées afin de conserver des terres présentant une valeur écologique plus élevée. Certaines de ces études ont utilisé un cadre hiérarchique multi-critères qui évalue à la fois la dégradation sur site, ainsi que la dégradation hors site découlant de la liaison de l'installation d'énergie solaire au réseau. Dans une étude particulière concernant les déserts de Californie, 19 couches ont été utilisées dans un modèle raster et ont inclus des fonctions de dégradation liées à la régénération associée à l'agriculture et l'impact du régime de feu dominant.

pacts écologiques sur les espèces aviaires et aquatiques, les espèces affectées et les mécanismes et l'ampleur de ces impacts écologiques varient dans une large mesure selon que l'on considère les installations établies sur la terre (**section 3.2**) ou en mer (**section 6.2**).

3.2. Facteurs de changement des écosystèmes et de perte de biodiversité

Perte modification d'habitats

Toute installation éolienne entraîne une petite perte d'habitat, soit directement par l'occupation de terre par les éoliennes, soit indirectement en raison du phénomène d'évitement des zones par certaines espèces, notamment des chauve-souris ou des oiseaux, autour des parcs éoliens (pour les espèces aquatiques, se référer à la **section 6.2**).

Cependant, plusieurs études concluent à des effets minimes des parcs éoliens y compris sur les oiseaux hivernants dans les zones agricoles, ou les oiseaux associés aux terres cultivées et aux forêts secondarisées dans le sud du Mexique. Les études d'impact sur l'environnement et les suivis post-construction n'ont par exemple révélé aucun effet discernable sur la population de gélinottes noires.

Mortalité et traumatismes

Sans surprise, la principale menace pour la biodiversité résulte de la collision des oiseaux, en particulier des rapaces, et des chauves-souris avec les éoliennes, ainsi que la dépression d'air associée au mouvement des pales et le barotrauma¹³. En général, les espèces d'oiseaux rares ou en voie de disparition, ou ayant une longue durée de vie et une reproduction lente, sont les plus soumises au risque induit par le déploiement des éoliennes. Les oiseaux plus grands et moins agiles (par exemple, les oies et les cygnes) sont également confrontés à des risques plus élevés ; c'est aussi le cas pour les espèces qui ont tendance à voler en condition de lumière plus faible (aube ou au crépuscule), car elles sont moins en mesure de détecter et d'échapper aux éoliennes.

Des risques de collision plus grands existent à proximité des voies de passage fortement utilisées - y compris les routes migratoires - ou dans des zones qui sont régulièrement utilisées pour l'alimentation ou pour le repos. De même que pour les oiseaux, les risques de collision élevés ne concernent pas seulement les espèces de chauves-souris indigènes, mais aussi les espèces non indigènes pendant leur migration. Par exemple, les espèces de chauves-souris tuées dans les parcs éoliens allemands étaient originaires de la Scandinavie, l'Estonie et la Russie. Le risque relatif de collision peut également varier pour une espèce donnée en fonction des périodes de l'année. Par exemple, la petite outarde a tendance à voler à des altitudes plus faibles pendant la saison de reproduction, mais à des altitudes plus élevées, plus proche des lignes électriques, pendant l'hiver et la période après la reproduction.

On estime que 234 000 oiseaux sont tués annuellement par des éoliennes aux États-Unis. Les chauves-souris souffrent proportionnellement plus que les oiseaux, l'impact étant de l'ordre de dizaines de morts par turbine et par année (**section 8.2**). Bien que les risques de collision dus à l'architecture des éoliennes soient relativement bien documentés, l'effet réel des collisions sur les populations de chauve-souris et d'oiseaux est moins bien compris.

Perturbation des comportements biologiques

Même si certains oiseaux peuvent détecter et s'adapter aux éoliennes, de telles perturbations du paysage pourraient aussi affecter certaines activités telles que l'alimentation à distance et le repos.

¹³ - Les chauves-souris souffrent de barotraumatisme en raison des changements de la pression atmosphérique, ce qui entraîne des lésions organiques sévères graves.

Effets positifs

Même si les installations d'énergie éolienne peuvent représenter un risque pour les oiseaux et les chauves-souris, elles peuvent avoir un effet contraire pour certains animaux terrestres tels que les tortues, car les diminutions du trafic routier, la disponibilité accrue des ressources et la baisse des populations de prédateurs peuvent influencer positivement sur la survie annuelle.

3.3. Mesures d'atténuation des impacts

Localisation des installations éoliennes dans des zones à faible biodiversité

Contrairement à l'énergie solaire (**section 2.3**), les sites les plus appropriés pour installer les éoliennes peuvent également être ceux susceptibles de causer le plus de dégâts à la biodiversité aviaire. Bien que la plupart des sites proposés pour les parcs éoliens terrestres au Royaume-Uni se situent dans des zones d'altitude (loin des zones peuplées), ces sites éloignés sont également des zones de grande importance pour l'avifaune. Afin d'identifier des zones à faible biodiversité pour implanter les installations éoliennes il conviendrait de bénéficier de mise à jour fréquentes des analyses cartographiques des zones sensibles afin de refléter les changements dans la distribution des espèces et leur adaptation à la présence de parcs éoliens.

Elaboration de procédures opérationnelles favorables à la biodiversité pour la production d'énergie éolienne

Contrairement à l'énergie solaire (**section 2.3**), les sites les plus appropriés pour installer les éoliennes peuvent également être ceux susceptibles de causer le plus de dégâts à la biodiversité aviaire. Par exemple, bien que la plupart des sites proposés pour les parcs éoliens terrestres au Royaume-Uni se situent dans des zones d'altitude, loin des zones peuplées, ces sites éloignés sont également des zones de grandes importances pour l'avifaune. L'identification de zones à faible biodiversité pour implanter les installations éoliennes serait importante pour atténuer leurs effets négatifs potentiels sur la biodiversité, mais les analyse cartographiques des zones sensibles nécessiteraient une mise à jour fréquente pour refléter les changements dans la distribution des espèces et leur adaptation à la présence de parcs éoliens.

Selon le type de turbine, les espèces d'oiseaux et de chauves-souris sont menacées à des altitudes comprises entre 20 et 180m au-dessus du sol. Les mesures d'atténuation proposées comprennent la réduction de l'empreinte globale du dispositif - par exemple en enterrant les câbles de transmission - et le risque de collision - par exemple, en rendant les pales plus visibles ou en alignant les éoliennes en prenant en compte les directions de vol. Il est intéressant de noter que les travaux de modélisation suggèrent que l'augmentation de la vitesse du rotor n'affecte pas le risque de collision avec les pales, car c'est dans les zones plus proches du moyeu de la turbine que les collisions sont le plus susceptibles de se produire. Cela suggère également que l'augmentation de la taille de la pale pour augmenter la production d'énergie éolienne par unité de surface pourrait n'avoir qu'un effet marginal sur le risque de collision pour les oiseaux par rapport à l'existence des structures de captation de l'énergie éolienne. Cependant, des études ont également suggéré que la réduction de la vitesse du rotor pourrait réduire la mortalité des chauves-souris.

D'autres actions d'atténuation comprennent l'arrêt de la production d'énergie pendant les périodes critiques de migration ou les périodes d'activité élevée, par exemple juste après le coucher du soleil, pendant une période de forte activité d'insectes ou lorsque des espèces menacées sont détectées ou annoncées. Les exercices de modélisation permettent également de concentrer les éoliennes dans des parcs éoliens pour réduire le risque de collision des populations de rapaces. Au niveau européen, un groupe de travail intersessions de l'Accord sur la conservation des populations de chauves-souris européennes (EUROBATS) étudie l'effet des éoliennes sur les chauves-souris et élabore des lignes directrices pour le suivi et l'évaluation des impacts¹⁴.

Adoption de politiques novatrices

La compensation¹⁵ a été identifiée comme un mécanisme pouvant atténuer potentiellement l'impact négatif de l'énergie éolienne sur les pertes de biodiversité. Des schémas de compensation ont été proposés pour les chauves-souris et les oiseaux dans le cas d'installations offshore. La gestion des forêts, la création d'environnements riverains et d'autres caractéristiques du paysage pourraient être bénéfiques pour la recherche de nourriture, le repos et la mobilité des chauves-souris. Par ailleurs, l'incitation à mettre en place des mesures ou dispositifs pour favoriser les stratégies d'évitement et d'atténuation par le biais de subventions sont aussi des mécanismes efficaces.

4. Energie hydro-électrique

4.1. Contexte

L'hydroélectricité est générée par l'utilisation d'eau courante qui active des turbines générant de l'électricité. Il existe différentes technologies hydroélectriques déployées en fonction des contraintes géographiques spécifiques et de la demande en électricité. Ces technologies comprennent :

- l'hydroélectricité conventionnelle générée par des barrages
- l'hydroélectricité au fil des rivières
- l'hydroélectricité associée au pompage d'eau stockée

En considérant la quantité d'électricité générée, il existe généralement une distinction entre les petites centrales hydroélectriques (<10 MW)¹⁶ et les grandes centrales hydroélectriques (>10 MW). En 2012, l'énergie hydroélectrique constituait de loin la plus grande source d'énergie renouvelable pour environ 16,2% de la production mondiale d'électricité. En plus d'être une source renouvelable et fiable d'électricité à faible teneur en carbone, l'hydroélectricité peut avoir de nombreux autres avantages tels que la régulation de l'approvisionnement en eau, le contrôle des inondations ou des sécheresses et l'irrigation agricole.

En raison d'un historique de déploiement plus long, l'énergie hydroélectrique est la source d'énergie renouvelable pour laquelle nous disposons des informations d'impacts sur la biodiversité les plus solides. Les premiers développements hydroélectriques ont peu pris en compte les espèces aquatiques (par exemple, les poissons migrateurs) et ont souvent eu un impact significatif sur les habitats aquatiques, en particulier par la modification des débits d'eau en amont et en aval des barrages.

4.2. Facteurs de changement des écosystèmes et de perte de biodiversité

Différentes études suggèrent que le développement de l'énergie hydroélectrique est une menace potentielle pour la diversité biologique au niveau mondial, notamment dans les pays qui accueillent des écosystèmes uniques et riches en biodiversité comme l'Amazonie, l'Himalaya, la Chine, le delta du Mékong et l'Afrique tropicale. Plusieurs cas d'espèces emblématiques ont fait l'objet de travaux qui ont révélé de forts impacts sur des animaux tels que le panda, le mahseer de l'Himalaya dans le Gange et les primates au Tibet et en Afrique tropicale. Par ailleurs, ce phénomène pourrait être aggravé, car les zones où la croissance de l'hydroélectricité est élevée abritent généralement des points chauds de biodiversité.

¹⁵ - La compensation implique de compenser la perte de biodiversité sur un site particulier, en générant des gains écologiques ailleurs. Les gains de biodiversité peuvent être transformés en « crédits » négociables. Bien que la compensation de la biodiversité ait été identifiée dans l'argumentaire en faveur de l'économie verte comme un mécanisme basé sur le marché prometteur, elle a été critiquée pour souvent ne pas fournir les avantages attendus en matière de conservation.

¹⁶ - Ceci peut être subdivisé en mini- (10-1000kW) et en micro-hydro (5-100kW).

Perte et modification d'habitats

Plusieurs études ont confirmé que, dans l'ensemble, les projets hydroélectriques sont des facteurs majeurs de la perte ou de la modification de l'habitat et de la fragmentation affectant un certain nombre d'espèces.

Les centrales hydroélectriques et les barrages peuvent inonder de vastes zones en amont, fragmentant ainsi les habitats (par exemple par la création d'îles) et affectant les écosystèmes et les espèces qu'ils abritent. Dans certains cas, ils peuvent même entraîner une désaffectation des réserves naturelles. Néanmoins, les développements d'installations hydroélectriques peuvent aussi créer des habitats pour des espèces emblématiques telles que la loutre géante au Brésil, en raison de la création de dizaines d'îlots artificiels.

Les mécanismes les plus importants concernent probablement la modification des régimes hydriques en amont et en aval et les obstacles que les infrastructures hydroélectriques constituent pour les poissons diadromes lors de leur migration vers les zones de fraie en amont. Les études ont démontré des changements de régime hydrique avec des effets négatifs sur des espèces particulières ou des communautés ou assemblages d'espèces, de poissons, d'insectes, d'invertébrés et de plantes. Cependant, les impacts réels sur la biodiversité associés aux changements de régimes hydriques sont différents en amont et en aval des centrales hydroélectriques, comme cela a été observé pour certaines communautés de macro-invertébrés et certains assemblages de poissons ou même certaines lignées génétiques soumises à des conditions environnementales différentes, en amont et en aval d'une centrale hydroélectrique.

Compétition pour les usages de l'eau

Une diminution de la qualité de l'eau, en amont, en aval et à l'intérieur du réservoir peut intervenir en raison des modifications de la charge en sédiments et des cycles nutritifs et peut avoir des effets environnementaux négatifs comme l'eutrophisation, affectant éventuellement la biodiversité. Cependant, notamment pour les petites centrales hydroélectriques, certaines études n'ont décelé que des effets négligeables en terme de qualité de l'eau et ont démontré que les effets négatifs initiaux se stabilisaient au fil du temps, rétablissant éventuellement une qualité de l'eau qui existait avant la mise en place de l'installation. Par ailleurs, dans certaines zones une grande partie des eaux de surface disponibles est détournée pour la production hydroélectrique, ce qui conduit à une plus forte probabilité de menaces sur la biodiversité.

Émission de gaz à effet de serre

Alors que l'énergie hydroélectrique est considérée comme une source d'électricité à faible teneur en carbone, les centrales hydroélectriques peuvent en fait émettre une grande quantité de gaz à effet de serre, principalement du dioxyde de carbone et du méthane en provenance des réservoirs. Ces émissions peuvent être comparables ou même plus élevées que celles des centrales électriques conventionnelles. Même si les dernières études suggèrent des émissions globales de gaz à effet de serre plus faibles que prévu initialement, il existe des centrales hydroélectriques dont la neutralité carbone est contestée.

4.3. Mesures d'atténuation des impacts

Sélection de technologies hydroélectriques ayant des impacts plus faibles sur les écosystèmes et la biodiversité

On considère généralement que plusieurs installations hydroélectriques de petite taille ont un impact cumulé inférieur à celui d'un nombre réduit d'installations plus grandes. Bien que les petites centrales hydroélectriques puissent effectivement avoir un impact plus faible sur la biodiversité en raison de leur plus faible besoin d'espace, certaines études comparatives suggèrent que d'autres paramètres doivent aussi être pris en compte pour mesurer l'impact réel sur la biodiversité.

Par ailleurs, certaines technologies spécifiques comme celles des centrales au fil de l'eau qui stockent des quantités d'eau plus faibles ou des éléments de conception comme les dérivation d'eau sans barrage peuvent avoir des impacts plus faibles sur le régime hydrique et la qualité de l'eau, mais présentent encore un impact écologique. L'établissement de caractéristiques opérationnelles optimales pour le développement de l'hydroélectricité peut donc être très difficile à établir et il est nécessaire de tenir compte de la variabilité des contextes locaux et de la nécessité d'équilibrer les impacts multiples sur les écosystèmes et sur le bien-être humain.

Mise en place d'éléments favorables à la biodiversité dans les installations hydro-électriques ;

Les dispositifs technologiques, en amont (échelles à poissons) et en aval (turbines favorables aux poissons, dispositifs de contournement), pourraient atténuer les impacts sur la biodiversité. Cependant, dans certains contextes, l'efficacité réelle de ces mesures reste à démontrer.

Adoption de politiques novatrices

Les mesures réglementaires et les schémas de conservation basés sur le marché pourraient améliorer les performances environnementales de la production hydroélectrique. Par exemple, la délivrance de licences de production hydroélectrique pour un temps limité, au terme duquel les opérateurs ne peuvent les renouveler que s'ils sont en mesure de se conformer aux lois environnementales actuelles pourrait garantir que les installations hydroélectriques se conforment à la législation environnementale la plus récente. La compensation (**section 3.2**) pourrait également atténuer certains des impacts négatifs sur la biodiversité de l'énergie hydroélectrique, mais cela reste un mécanisme dont l'efficacité doit être démontrée et qui devrait être utilisé en dernier recours et complété par d'autres politiques, en particulier dans les pays où la gouvernance est faible et qui ont subi récemment des conflits civils.

5. Bioénergie

5.1. Contexte

La bioénergie se réfère à l'utilisation de matières végétales et animales pour générer de l'énergie. Les sources de bioénergie sont variées et vont du bois et ses résidus, aux résidus de cultures en passant par les déchets animaux, les déchets du secteur manufacturier ou les déchets alimentaires.

En 2014, la demande totale d'énergie primaire provenant de la bioénergie était de 16 250 TWh (58,5 EJ), la part de la bioénergie dans la consommation mondiale totale d'énergie primaire étant de l'ordre de 10%. Dans ce total, la bioénergie traditionnelle, souvent associée à des ménages à faibles revenus, tels que les combustibles ligneux, le charbon et le fumier représentait 54 à 60% et était principalement utilisée pour la cuisson et le chauffage. Les utilisations modernes de la bioénergie qui sont généralement associées à l'économie verte comprennent également le chauffage, pour les secteurs résidentiels et industriels, la bioénergie et les biocarburants pour le transport.

Les principales technologies pour produire la bioénergie moderne comprennent généralement la conversion thermochimique (y compris la combustion, la gazéification, la pyrolyse) et la conversion biochimique (y compris la digestion et la fermentation). D'une manière générale, les technologies de conversion thermochimique produisent de la chaleur et de la bioénergie, tandis que les technologies de conversion biochimique produisent des biocarburants liquides pour le transport, la

cuisson et l'éclairage (par exemple, le bioéthanol, le biodiesel)¹⁷¹⁸.

Les matières premières courantes pour la bio-chaleur et la bioénergie comprennent le peuplier, le saule, l'eucalyptus et d'autres types de combustibles ligneux. Progressivement, les résidus agricoles primaires tels que la paille de blé (UE, Amérique du Nord), la bagasse de canne à sucre (Brésil), la paille de maïs (Inde, l'Amérique du Nord) et les résidus forestiers (granulés de bois, copeaux de bois) sont devenus plus importants pour le bio-chauffage et la production de bioélectricité.

En fonction de la nature de la matière première et du type de conversion utilisée, les biocarburants liquides pour les transports peuvent être distingués en première, deuxième et troisième générations. Les biocarburants de première génération sont principalement dérivés du pétrole et des cultures sucrières ou productrices d'amidon et incluent l'éthanol de maïs aux États-Unis; l'éthanol de canne à sucre et le biodiesel de soja au Brésil ; le biodiesel de colza dans l'Union européenne ; le biodiesel et l'éthanol de mélasse oléagineux en Inde ; et les combustibles à base de *Jatropha* et l'éthanol de canne à sucre en Afrique subsaharienne. Les biocarburants de deuxième génération dérivés de la conversion biochimique de matériaux ligno-cellulosiques prennent de l'importance aux États-Unis et en Europe et sortent lentement de la phase pilote. Les biocarburants de troisième génération provenant des algues sont encore au stade expérimental.

Compte tenu de la grande diversité des voies de production de bioénergie, seuls les impacts de la biomasse énergie et les biocarburants ont été analysés dans cette étude. Dans les deux cas, la culture, la transformation et la récolte de matières premières peuvent avoir des impacts majeurs sur les écosystèmes et la biodiversité.

5.2 Facteurs de changement des écosystèmes et de perte de biodiversité dus aux formes modernes de bioénergies

5.2.1. Biomasse énergie

Perte et modification d'habitats

Les effets directs et indirects des changements d'usage des terres associés à l'expansion de la production de biomasse pour la production d'énergie ont entraîné des pertes d'habitat et de biodiversité, en particulier lorsque la conversion des terres à grande échelle est associée à une production de matières premières sous forme de monocultures. Ce sont les facteurs d'impact les plus importants dus à la production d'énergie issue de la biomasse. Le changement d'habitat est très dépendant du contexte, mais est principalement associé à un certain nombre de mécanismes tels que l'élimination de la canopée des arbres ; les changements rapides de taille et de forme des plantes ; l'altération de caractéristiques importantes du paysage telles que la disparition de forêts riveraines ou la perte de sol.

Émissions de gaz à effet de serre

Certaines études de cycles de vie (ACV) ont démontré que la plupart des filières de production de biomasse énergie émettent des GES et des polluants atmosphériques ou aquatiques qui peuvent avoir des effets négatifs sur les écosystèmes et la biodiversité, comme l'eutrophisation, l'acidification et la toxicité. Les émissions atmosphériques associées à la production de biomasse énergie peuvent également contribuer à la formation de l'ozone troposphérique, ce qui a un effet négatif sur les plantes. De telles émissions ont été confirmées pour les principales espèces exploitées telles que l'eucalyptus, le peuplier et le saule, ainsi que le débroussaillage à rotation courte et les granulés de bois.

Cependant, le type et le niveau des émissions, et donc l'ampleur de l'impact environnemental et le potentiel de réchauffement planétaire, varient considéra-

17 - Parfois, les produits de la conversion de la biomasse biochimique peuvent être utilisés pour la production d'électricité, par ex. par la combustion du biogaz provenant de la digestion des déchets organiques.

18 - Le bioéthanol et le biodiesel peuvent être mélangés avec du carburant conventionnel dans différentes proportions. « E5 » désigne un mélange de 5% de bioéthanol et 95% d'essence, tandis que « B5 » un mélange de 5% de biodiesel et 95% de diesel conventionnel.

blement selon les différentes options de production d'énergie et notamment la nature des matières premières, les rendements, les technologies de conversion, les mécanismes de contrôle de la pollution et le stade du cycle de vie, par exemple les opérations sylvicoles sont principalement associées à l'eutrophisation résultant de l'utilisation d'engrais phosphatés, tandis que les opérations de récolte et de transport sont principalement associées aux émissions atmosphériques.

Changement d'usage des sols

Les changements directs et indirects dans l'utilisation des sols peuvent avoir des effets climatiques importants, en raison des émissions de GES et de l'altération des microclimats locaux suite aux changements d'albédo et d'évapotranspiration (**section 5.2.2**).

Invasions biologiques

Certaines plantes exploitées pour leur biomasse sont potentiellement envahissantes. Même si les études de terrain sur plusieurs continents suggèrent par exemple que l'Eucalyptus se disperse plus lentement que ce que prédisent les évaluations des risques, il est démontré qu'il a remplacé les espèces forestières indigènes dans différents écosystèmes.

Effets positifs

Certains paysages dévolus à la production de biomasse énergie peuvent fournir des habitats et autres services écosystémiques plus importants et plus diversifiés que certaines monocultures intensives.

5.2.2. Biocarburants

Les matières premières pour la production de biocarburants liquides ont été identifiées comme une menace nouvelle pour la biodiversité.

Perte et modification d'habitats

Comme le soulignent plusieurs travaux, la perte et le changement d'habitat pendant la culture de la matière première est le mécanisme le plus important à l'origine de la modification des écosystèmes et des impacts sur la biodiversité lié aux biocarburants. L'ampleur de la perte de biodiversité due au changement d'affectation des terres dépend du type de terrain converti, de la matière première utilisée et de la vulnérabilité des espèces affectées. La conversion directe des écosystèmes naturels (prairies, forêts) est plus susceptible d'entraîner des niveaux élevés de perte de biodiversité que la conversion des terres déjà cultivées ou de jachères. Les changements indirects d'utilisation des terres peuvent, quant à eux, affecter des zones éloignées de celles où la production de matières premières est concentrée, mais la quantification de ce phénomène est particulièrement difficile et souvent controversée.

Par exemple, la production de canne à sucre pour la production d'éthanol a contribué à la destruction des forêts riveraines dans l'État de Sao Paulo (Brésil) et a entraîné une perte de biodiversité¹⁹. C'est aussi le cas en Afrique subsaharienne pour les productions de bioéthanol à base de canne à sucre et de biodiesel à base de Jatropha.

La culture du palmier à huile en Asie du Sud-Est a principalement remplacé les forêts tropicales primaires et secondaires plutôt que les terres agricoles, ce qui a eu un impact significatif sur la biodiversité, car les plantations de palmiers à huile sont moins hospitalières pour un large éventail d'espèces.

Aux États-Unis où la plupart des nouvelles zones de production de matières premières devraient remplacer des forêts tempérées et des prairies, le développement de la culture du soja (pour le biodiesel) et de maïs ou de canne à sucre (pour

¹⁹ - L'expansion prévue de la canne à sucre dans le sud-est brésilien peut représenter une menace encore plus importante pour la biodiversité car elle peut affecter (à la fois directement et indirectement) des biomes riches en biodiversité tels que le Cerrado et l'Amazonie.

l'éthanol) auront un effet plus important en termes de changements d'usage des terres que les autres filières d'énergie renouvelable ;

De même, les préconisations de mélanges de biocarburants faite dans le cadre de l'UE pourraient entraîner une expansion des terres cultivées dans le monde (principalement au sein de l'UE, mais aussi au Brésil et en Afrique subsaharienne), avec des impacts négatifs potentiellement graves sur la biodiversité.

Effets positifs

Les matières premières à base de biocarburants de deuxième génération (*Miscanthus*, switchgrass – *Panicum virgatum*) peuvent fournir de l'habitat à un certain nombre d'espèces et être largement plus favorables à la biodiversité que les cultures de biocarburants de première génération (maïs, soja, colza). Cela pourrait renforcer la fourniture de services écosystémiques tels que la pollinisation ou le contrôle biologique. Cependant, la conversion de forêts ou de terres agricoles en jachère entraîneront néanmoins une perte nette de biodiversité, notamment parce que l'expansion future des matières premières de 2ème génération aux États-Unis se déroulera en dehors de la corn belt du Midwest, dans des zones où l'agriculture est moins intensive, voire dans des zones naturelles.

Émissions de gaz à effet de serre

Les analyses de cycle de vie comparatives ont confirmé que différentes options de production de biocarburants peuvent avoir des émissions de gaz à effet de serre très différentes en fonction des matières premières, des pratiques de production agricole et de la zone de production. De nombreuses analyses anciennes sur les biocarburants ont négligé l'effet du changement d'utilisation des terres sur les émissions de gaz à effet de serre et des études plus récentes ont démontré que les dettes carbone de ces productions étaient élevées et nécessiteraient plusieurs décennies pour être remboursées, notamment dans le cas de conversion d'habitats naturels contenant des stocks de carbone élevés comme les forêts. Le changement indirect de l'utilisation des terres peut également entraîner des dettes de carbone encore plus élevées, mais ces effets sont difficiles à quantifier.

Modification des microclimats locaux

En plus d'affecter le climat mondial par la production de gaz à effet de serre, la production de biocarburant peut également affecter les microclimats locaux en raison des changements dans l'albédo de surface et l'évapotranspiration.

Emission de polluants atmosphériques et aquatiques

Le type et l'ampleur des émissions varient de manière significative en fonction des filières de production de biocarburants et des étapes du cycle de vie, mais pour certains polluants et contextes géographiques, les biocarburants peuvent avoir des émissions plus élevées que les combustibles fossiles conventionnels. C'est le cas de l'éthanol brésilien issu de la canne à sucre, qui émet des particules lorsque les résidus de récolte sont brûlés (le brûlis est un mode de gestion particulièrement répandu). Une détérioration similaire de la qualité de l'air a été signalée dans les zones adjacentes aux plantations de palmiers à huile en Asie du Sud-Est. Des études de modélisation de l'augmentation de l'ozone troposphérique lié aux biocarburants et leurs effets négatifs ultérieurs sur les plantes sont disponibles.

L'utilisation des déchets agricoles (paille de blé, maïs, riz, bagasse de canne à sucre) pour la cogénération d'électricité et d'énergie et la production de biocarburants de seconde génération ou le développement des configurations intégrées, incluant les bio-raffineries sont de nature à diminuer ces impacts.

Pollutions des sols et de l'eau

Les engrais, les pesticides et les effluents industriels provenant de la production de biocarburants sont les principales sources de pollution de l'eau au Brésil et en Asie du Sud-Est. Plusieurs études ont modélisé la baisse de la qualité de l'eau en Europe et aux États-Unis. Elles ont par exemple démontré qu'il fallait s'attendre à une augmentation de la charge azotée le long du Mississippi, contribuant à l'aug-

mentation de l'hypoxie dans le golfe du Mexique, si la production d'éthanol de maïs aux États-Unis atteint les objectifs de 2022 sans modification des pratiques culturelles en vigueur.

Invasions biologiques

Certaines matières premières, en particulier les graminées pérennes telles que les *Miscanthus* et *Panicum virgatum*, pourraient être envahissantes. Les habitats riverains peuvent être particulièrement sensibles alors que l'on peut craindre que des lignées non stériles de *Miscanthus* soient difficiles (voire impossibles) à contenir. Le *Jatropha* qui est la principale matière première de 1^{ère} génération a un comportement envahissant et a sa culture été interdite par précaution dans certaines parties de l'Australie et de l'Afrique du Sud, même si son potentiel envahissant a pu être surestimé, au moins en Afrique subsaharienne.

5.3. Mesures d'atténuation des impacts

Adoption des pratiques de production de bioénergie respectueuses de l'environnement

Plusieurs mesures sont possibles :

- la limitation de l'expansion des monocultures
- le choix minutieux de la matière première. En effet comme les matières premières de seconde génération cultivées dans des terres non fertilisées, qui selon certaines études, pourraient favoriser la biodiversité par rapport à des monocultures annuelles telles que le maïs ou le soja qui nécessitent une utilisation extensive de produits agrochimiques
- l'adoption de pratiques de production favorables à la faune,
- l'entretien ou la conservation de zones favorables à la biodiversité ou de zones tampons, telles que la préservation de la végétation du sous-bois, d'îlots d'arbres dans les plantations, des habitats riverains
- Les suivis en continu de la pollution, des modifications des paysages et de leurs impacts sur la biodiversité ainsi que le suivi du potentiel invasifs des plantes exploitées, par exemple en développant des zones tampons pour repérer tôt les comportements envahissant et prévenir la propagation
- Une planification de l'utilisation des terres plus systématique pour atteindre les objectifs de production de bioénergie tout en évitant les effets en retour négatifs sur la biodiversité

Localisation de la production de bioénergie dans des secteurs marginaux, dégradés ou sur des terres sous-utilisées

Les terres marginales, dégradées ou sous-utilisées abritent peu de biodiversité, ce qui permet de minimiser les impacts de la production sur la biodiversité, mais aussi de permettre la restauration écologique de certains terrains dégradés. Par exemple, la plantation de saules dans les zones humides permet de purifier les eaux usées et le potentiel de bio-remédiation de certaines plantes telles que le *Miscanthus* ou le *Jatropha* permet de décontaminés des milieux pollués.

Conception de paysages bioénergétiques multifonctionnels

Il est possible de concevoir des paysages à vocation de production de bioénergie multifonctionnels utilisant une diversité d'éléments favorables à la biodiversité tels que les productions mixtes (nourriture et bioénergie), la rotation des cultures, les corridors d'habitats et les zones de conservation avec de la végétation indigène. De telles approches paysagères, couplées à une planification en amont, peuvent non seulement préserver la biodiversité, mais aussi les services qu'elle fournit comme la pollinisation, ce qui pourrait à terme, contribuer à des rendements plus élevés en bioénergie.

Les options d'atténuation décrites ci-dessus peuvent être promues par différents types de politiques, allant des instruments réglementaires aux mécanismes basés sur le marché tels que la certification.

6. Énergie océanique

6.1. Contexte

La production d'énergie à partir des océans inclut une large gamme de technologies d'ingénierie, notamment :

- piéger la marée montante et la relâcher lentement pour produire de l'électricité (installations marémotrices) (**section 4.1**)
- capturer l'énergie des courants océaniques et des marées à travers les dispositifs installés sous la surface de l'eau pour produire de l'énergie hydro-kinétique
- utiliser l'énergie des vagues pour produire de l'électricité à travers divers appareils installés à la surface de la mer
- utiliser la différence de température entre l'eau froide profonde des océans et l'eau de surface chaude (conversion de l'énergie thermique océanique);
- utiliser de l'énergie osmotique, (différentiel de pression entre eau salée et eau douce)
- obtenir de l'énergie à partir de générateurs éoliens offshore

Seules les installations marémotrices peuvent être considérées comme une technologie relativement « mature »²⁰. Cependant, au vu des investissements massifs nécessaires dans les infrastructures et leur impact environnemental potentiel, il n'est pas certain que ces installations soient économiquement viables. Par exemple, au Royaume-Uni, les installations marémotrices à grande échelle sont réévaluées alors même que l'opposition de l'Agence de l'environnement et d'autres groupes de pression rend peu probable la construction d'un projet de grande ampleur. Les petits projets tels que le Swansea Bay Tidal Lagoon pourraient avoir plus de chances d'arriver à terme.

Les autres technologies océaniques auraient pu se développer de manière significative au cours des dernières années, mais, à l'exception de l'énergie éolienne offshore, seuls des développements relativement limités ont effectivement eu lieu²¹. Malgré ce faible développement, la perception des impacts environnementaux (incluant la perturbation des écosystèmes côtiers près des fonds marins, connus pour être des habitats importants pour de nombreuses espèces), constitue un obstacle essentiel aux projets d'énergie océanique. Il existe donc peu de preuves empiriques de leurs effets réels sur les écosystèmes et la biodiversité. Ces effets sont essentiellement spéculatifs et ne permettent pas de déterminer si les installations d'énergie océanique auront le même impact sur la biodiversité que les unités isolées existantes (pré-commerciales), ce qui souligne la nécessité d'études plus approfondies dans ce domaine.

6.2. Facteurs de changement des écosystèmes et de perte de biodiversité

Perte et modification d'habitats

Le changement ou la perte d'habitats est probablement le facteur clé des modifications des écosystèmes et de la perte de biodiversité associée à l'énergie des océans. Tout type d'unité moderne d'énergie océanique ou tout pôle éolien offs-

20 - L'usine de La Rance en France (1966) a été la première usine marémotrice au monde et est toujours opérationnelle aujourd'hui. Elle a été suivie de projets au Canada, en Chine et en Russie. À l'heure actuelle, le seul pays qui s'efforce sérieusement de construire des usines marémotrices est la Corée du Sud, qui a récemment complété un tel dispositif de 254MW au lac Sihwa-ho, et a prévu une autre presque trois fois plus grand à Ganghwa.

21 - Alors que les premiers dispositifs marémoteurs devaient devenir opérationnels en 2016, il y a eu de nombreux revers chez plusieurs autres entreprises et projets d'énergie océanique. Par exemple, Pelamis Wave Power a rencontré des difficultés financières et a été placé en faillite en 2014, tandis que Aquamarine Power n'a plus qu'un personnel réduit. D'autres grandes entreprises ont abandonné les projets d'énergie océanique ou ont totalement disparues.

hore entraînera la perte directe d'une petite zone d'habitat, car la section de la mer et le fond occupé par ces unités ne seront pas disponibles pour les espèces aquatiques. Les installations marémotrices peuvent également entraîner une perte d'habitat liée à l'inondation permanente en amont des estuaires. Le changement d'habitat est généralement associé aux dispositifs qui modifient les milieux adjacents aux installations et entravent les processus hydrodynamiques et donc l'activité (notamment alimentaire ou de déplacement) des espèces aquatiques.

Les travaux de mise en place des générateurs éoliens offshore et des dispositifs d'énergie océanique installés ou ancrés dans les fonds marins peuvent provoquer des changements locaux dans la composition des espèces de poissons dus à la perte d'habitats, bien que les effets à long terme ne soient pas encore pleinement compris. Les mammifères marins évitent souvent les zones de construction sous-marine, en particulier les empilements, et n'y retournent que lentement après la construction. On peut s'inquiéter du fait que certaines espèces d'oiseaux marins peuvent s'éloigner du voisinage immédiat des parcs éoliens offshore et dans une zone tampon de 2 à 4 km, en raison de la perte de zones d'alimentation. Néanmoins, et en dépit de certaines différences entre les espèces, la plupart des oiseaux de mer semblent être relativement non impactés par la présence de parcs éoliens offshore, les effets généraux sur la population d'oiseaux étant négligeables. Enfin, une étude portant sur trois unités marémotrices pré-commerciales n'a montré aucun impact négatif sur la biodiversité locale sur les différents sites après 1 à 3 ans de suivi post-installation.

L'altération de l'hydrodynamique (vagues et courant) et les processus de sédimentation peuvent être un autre facteur de changement d'habitat induit par les dispositifs de captation d'énergie marémotrice et océanique. Les deux types de technologies pourraient affecter les processus de dépôt des sédiments, changer le courant et les vagues et modifier les substrats qui forment l'habitat des organismes benthiques qui vivent dans des zones où l'énergie associée aux marées et aux vagues est forte²², même si ces animaux sont susceptibles d'être relativement résistants aux faibles niveaux de perturbation causés par les dispositifs modernes d'énergie océanique. Les dispositifs de conversion de l'énergie thermique des mers peuvent également induire un changement d'habitat sur les écosystèmes côtiers dans les pays tropicaux²³, car ils pourraient absorber une eau riche en nutriments lors de l'extraction d'eau froide issue des couches profondes de l'océan.

Collisions et mortalités

Les installations marémotrices pourraient piéger des espèces, par exemple le piégeage des baleines observé à l'usine d'Annapolis au Canada. Les parcs éoliens offshore peuvent aussi présenter des risques de collision pour les oiseaux similaires à ceux des parcs éoliens terrestres (**section 2.2**), mais les évaluations de la mortalité sont plus difficiles à réaliser.

Bien que certaines espèces d'oiseaux évitent les parcs éoliens offshore, certaines études ont démontré que certains espèces migrantes nocturnes sont attirées par les obstacles éclairés, ce qui augmente le risque de collision²⁴. Les rotors des dispositifs de captation de l'énergie des vagues présentent aussi des risques de collision pour les espèces aquatiques. Enfin, les dispositifs de conversion de l'énergie thermique des mers peuvent être responsables de surmortalité des poissons tropicaux liée aux chocs de température dus aux remontées d'eau froide.

Modification des comportements biologiques

La proximité des parcs éoliens avec la côte peut perturber les espèces d'oiseaux migrateurs qui utilisent le trait de côte pour la navigation. De même, les rotors des

22 - Ils peuvent également affecter l'érosion côtière [26], bien que ces effets semblent être assez faibles.

23 - Les dispositifs de conversion de l'énergie thermique des mers doivent être situés dans des zones où il existe un différentiel de température de ~ 20 ° C entre l'eau de surface chaude et l'eau profonde froide qui ne doit être à plus de 1000 m sous la surface. Cela se produit généralement entre les latitudes 20 ° Nord et Sud de l'équateur.

24 - Il faut mentionner que les interactions entre oiseaux marins et éoliennes et les risques posés aux populations d'oiseaux, peuvent varier selon des échelles de temps plus longues.

dispositifs de captation de l'énergie des vagues pourraient affecter les trajectoires de déplacement, la navigation et les modes d'alimentation de certaines espèces migratrices, bien que les données probantes manquent en raison du petit nombre d'unités opérationnelles (**section 6.1**). Les turbines des usines marémotrices pourraient également interférer avec certaines espèces telles que les oiseaux plongeurs ou les poissons. Des mesures directes des animaux aquatiques autour de six installations marémotrices (projet Verdant RITE) ont montré que les poissons avaient tendance à percevoir chaque machine comme un objet indépendant et qu'au moins certaines espèces interagissaient étroitement avec elles. Aucun changement n'a été signalé dans la répartition et l'abondance d'espèces d'oiseaux et d'espèces benthiques telles que les homards.

Pollutions chimiques, sonores et électromagnétiques

A l'instar des barrages hydroélectriques classiques (**section 4**), les installations marémotrices modifient la charge en sédiments, la salinité et la turbidité de l'eau ou influencent les flux d'eau oxygénée conduisant à des cas de mortalité en masse de poissons et d'autres espèces benthiques. L'installation et le démantèlement des dispositifs d'énergie océanique pourraient dégrader temporairement la qualité de l'habitat et de l'eau en raison de la turbidité accrue de la colonne d'eau liée aux perturbations du fond marin. En outre, le bruit engendré par la construction puis l'exploitation de certains projets ou le mouvement rotatif des éoliennes côtières ou marines pourrait avoir un effet sur certaines espèces aquatiques. Bien que limités dans le temps, certains des impacts écologiques les plus importants des installations d'énergie océanique se manifestent pendant la phase de construction, en raison de la circulation des bateaux, du bruit et des perturbations du fond marin. En particulier, le bruit généré lors de la construction, comme la mise en place des pylônes, pourrait affecter les mammifères marins. L'installation de structures sous-marines, comme par exemple les fondations des parcs éoliens, peut également affecter les voies migratoires des poissons.

Les champs électromagnétiques pourraient affecter les espèces sensibles, bien que ces effets soient susceptibles d'être limités au voisinage des câbles de raccordement au réseau. Cependant, il est difficile d'établir de tels effets causaux pour les poissons et d'autres organismes. Enfin, il existe des interrogations sur la toxicité des lubrifiants et des peintures utilisées dans ces installations sur la vie marine.

Effets positifs

Certains résultats suggèrent que les fondations des éoliennes offshore entraînent l'augmentation d'espèces benthiques et de poissons, en raison des abris qu'elles procurent. Des effets similaires ont été signalés pour des dispositifs de captage de l'énergie des vagues et d'énergie marémotrice. Néanmoins, de tels impacts directs sur les habitats des fonds marins, qu'ils soient positifs ou négatifs, sont susceptibles d'être limités à moins de 100 à 200 m du dispositif, si les fonds marins sous les dispositifs ne sont pas perturbés.

6.3. Mesures d'atténuation des impacts

Sélectionner soigneusement les paramètres opérationnels des dispositifs d'énergie océanique

Le choix de la vitesse pales rotatives des dispositifs d'énergie marine peut permettre de minimiser la mortalité par collisions.

Le suivi des projets pilotes et commerciaux est indispensable pour recueillir de l'information et adapter la gestion comme ce fut le cas pour le premier dispositif marémoteur commercial Seagen situé à Strangford Narrows, en Irlande du Nord (vitesse de rotation de 12 tr par minute et vitesse maximale de pointe de la pale de rotor d'environ 12 m / s). Les études ont démontré l'absence d'impact sur les animaux capables de chasser dans une eau turbulente en mouvement rapide (et qui sont susceptibles de se heurter autant aux pales qu'aux roches existantes). D'autres études effectuées sur ce site n'ont montré aucune modification significative de la dynamique du courant associée à l'installation de la turbine : les pois-

sons n'évitent pas complètement la zone occupée par la turbine et aucune trace de poissons morts ou mourants après avoir traversé les turbines n'a été observée. Les rapports d'autres sites tels que le dispositif de démonstration de Cobscook Bay (USA), la turbine Verdant à New York (USA), la turbine GFE au Minnesota (USA) et OpenHydro (EMEC, Ecosse) font état de résultats similaires.

La réduction du bruit pendant le fonctionnement des dispositifs d'énergie océanique peut être obtenu par exemple par l'installation d'un blindage acoustique l'installation d'appareils de réglage pour fonctionner à différentes fréquences, ou pour fonctionner à des vitesses de rotation différentes.

Dans tous les cas, des études plus poussées restent nécessaires, mais compte tenu des impacts négligeables observés jusqu'à présent et du faible nombre d'installations, des mesures telles que le réglage des caractéristiques opérationnelles des dispositifs semble de nature à réduire significativement les impacts.

Localiser des installations d'énergie océanique dans des zones susceptibles de générer une perturbation minimale des habitats marins et du fond de la mer

Au cours des dernières années la tendance en Europe a été de positionner les parcs éoliens offshore plus loin et dans les eaux plus profondes, avec des dispositifs d'ancrage flottant plutôt que fixes. Ces nouveaux développements dans l'énergie éolienne offshore pourraient réduire la perte d'habitat associée aux fondations des éoliennes et minimiser leurs effets sur les environnements benthiques, notamment pendant la phase de construction.

Adopter des éléments favorables à la biodiversité dans la conception des installations marémotrices

Les usines marémotrices peuvent être équipées d'éléments favorables à la biodiversité comme :

- des zones de balancement des marées ou des lagunes qui pourraient fournir des zones d'alimentation pendant la période de hautes eaux à l'intérieur du dispositif,
- l'utilisation de passes à poissons similaires à ce qui existe pour les installations hydroélectriques
- barrage physique par une barrière perméable aux animaux marins.

Minimiser les perturbations pendant la phase de construction

- réduire le trafic maritime autant que possible
- utiliser des technologies qui minimisent le bruit en intensité ou en durée
- utiliser des technologies respectueuses de l'intégrité des fonds marins

Définir autour des installations d'énergie marine des zones interdites à la pêche et à d'autres activités maritimes

- créer des zones libres d'activités de pêche et de transports maritimes.
- transformer certaines zones maritimes autour d'installation d'énergie océanique en réserves marines pourrait permettre de préserver les stocks de pêche et d'autres espèces marines, ce qui peut avoir des avantages importants pour la conservation de la biodiversité

7. Géothermie

7.1 Contexte

L'énergie géothermique est la chaleur dérivée de la croûte terrestre : ressources hydrothermales à haute température, systèmes aquifères profonds à basse et moyenne température, et ressources associées à des pierres chaudes. Environ 6,5% seulement du potentiel mondial global d'énergie géothermique a été exploité, la capacité installée totale étant de l'ordre de 12,8 GW [13].

Chacun des composants des centrales géothermiques (forages, canalisations, turbines, tours de refroidissement...) a un impact environnemental, qu'il soit temporaire (par exemple pendant la construction) ou durable.

Les ressources géothermiques se situent souvent dans des zones vierges, voire protégées présentant une biodiversité endémique élevée. Les données sur les impacts de l'énergie géothermique sur la biodiversité sont rares dans la littérature académique. Pour cette raison, il a été suggéré d'envisager des effets écologiques potentiels lors de la planification d'installations géothermiques et d'adopter une approche axée sur la durabilité.

7.2. Facteurs de changement des écosystèmes et de perte de biodiversité

Perte et modification d'habitats

La production d'énergie géothermique associée à des écosystèmes fragiles ou très riches en biodiversité provoque des changements et perte d'habitat très impactant. Par exemple, au Kenya, les installations géothermiques et les infrastructures auxiliaires du projet d'Olkaria situé dans le parc national Hell's Gate, est responsable d'un haut niveau de perte d'habitats. Des préoccupations similaires ont été soulevées pour d'autres régions du Kenya et du Costa Rica. Le développement du tourisme lié à l'exploitation de l'énergie géothermique pourraient également impacter les habitats comme en Nouvelle-Zélande.

Modification du comportement biologique

Les activités telles que le déboisement du site, la construction de routes, le forage de puits et les sondages sismiques peuvent provoquer des perturbations qui pourraient affecter les processus de reproduction, de recherche de nourriture et de migration de certaines espèces.

Émissions de gaz à effet de serre et de polluants

Une usine géothermique typique utilisant de l'eau chaude et de la vapeur pour générer de l'électricité émet du CO₂, des polluants atmosphériques (NH₃, H₂S) et d'autres gaz (H₂, O₂, N₂) et des éléments (Rn, He, As, Hg, B) dont les niveaux varient selon les zones géothermiques. Alors que les émissions de gaz à effets de serre sont négligeables par rapport à celles émises par les installations de production d'électricité conventionnelle, l'émission de polluants toxiques tels que le H₂S et l'acide borique peut être augmentée et avoir un effet plus important sur la végétation environnante. L'activité géothermique peut également être à l'origine d'une concentration élevée d'arsenic dans l'eau et le sol, qui peut ensuite être absorbée par les plantes et les poissons, comme le montre l'exemple des rejets d'arsenic associés au développement géothermique autour de la rivière Waikito en Nouvelle-Zélande qui ont accentué les niveaux d'arsenic déjà élevés dans l'eau.

Pollution sonore ou thermique

Le bruit et la pollution thermique des installations géothermiques peuvent également avoir un impact écologique.

7.3. Mesures d'atténuation des impacts

Adopter des technologies géothermiques à faible impact écologique

Certaines technologies de production d'énergie géothermique empêchent l'émission de polluants atmosphériques et aquatiques. Par exemple, les dispositifs binaires qui sont des systèmes en boucle fermée n'émettent pas de gaz, tandis que les dispositifs à vapeur sèche et ceux à vapeur pulsée émettent de la vapeur d'eau contenant des gaz non condensables.

- des technologies de redirection des émissions pourrait empêcher la pulvérisation de saumure et la défoliation associée dans les zones forestières.
- la réduction des ouvertures et le forage directionnel pourraient permettre de rendre les zones de travail plus compactes, ce qui réduit les besoins fonciers globaux des installations géothermiques.

Promouvoir l'éco-tourisme autour des installations géothermiques appropriées

Les aires naturelles autour de certaines installations géothermiques pourraient devenir des sites d'écotourisme et être intégrées aux stratégies de conservation, comme par exemple : le champ de production géothermique Bacon-Manito (BGPF) à Sorsogon (Philippines), le Rotorua (Nouvelle-Zélande) et les Hautes terres centrales islandaises.

8. Discussion

8.1. Synthèse sur les facteurs de pression

Ces différentes études démontrent qu'il existe d'importantes interactions entre la biodiversité et le secteur des énergies renouvelables. Les différentes filières d'énergie renouvelables examinées sont liées à tout ou partie des cinq facteurs de pressions et d'altération des écosystèmes et de perte de biodiversité du Millenium Assessment. Cependant, en dépit d'une littérature croissante qui confirme ces liens de causalité, pour de nombreuses sources d'énergie renouvelables, telles que l'énergie océanique et la géothermie, on manque de résultats solides.

Les mécanismes réels à l'origine des impacts sur la biodiversité ou les écosystèmes varient en fonction de la technologie considérée, de ses caractéristiques opérationnelles²⁵ et du contexte environnemental dans lequel elle s'insère.

Aucune des filières d'énergie renouvelable examinées n'est directement associée à un processus de surexploitation, cependant, des effets de surexploitation indirecte dus au changement d'usage des terres peuvent apparaître, en particulier dans les contextes où les populations dépendent de manière significative des écosystèmes pour leur subsistance. Les effets de la surexploitation se manifestent alors via le déplacement et la réduction des zones de récolte des ressources naturelles (produits forestiers, pâturages) qui peuvent alors être surexploitées. De telles préoccupations ont émergé dans le cadre de l'expansion future des biocarburants en Afrique subsaharienne, de l'hydroélectricité dans l'Himalaya indien et de l'énergie océanique en Europe. Cependant, d'autres études sont nécessaires pour mieux comprendre l'ampleur réelle de ces effets indirects de surexploitation.

Enfin, plusieurs études démontrent que la construction, l'exploitation et les développements de structures auxiliaires telles que les routes participaient à la perte directe d'habitat et à la fragmentation plus large du paysage, ainsi qu'à la prolifération d'espèces envahissantes. De tels effets peuvent être des facteurs importants de changement des écosystèmes et peuvent être potentiellement très nuisibles à certaines espèces et à certains habitats.

8.2. Lacunes dans les connaissances et les pratiques et recommandations

Perte et modification d'habitats

Quoi que ceux ci varient selon les technologies, la géographie ou les espèces, toutes les filières d'exploitation des énergies renouvelables examinées dans cet article semblent avoir des effets sur les modifications et les pertes d'habitat qui constitue la pression la plus importante de ces filières.

C'est pour cela qu'une stratégie d'atténuation essentielle est la sélection minutieuse du site où l'infrastructure productrice d'énergie renouvelable sera implantée.

Les systèmes d'information géographique et autres outils d'analyse spatialisée sont très utiles pour comprendre les contraintes spatiales et donc choisir les emplacements appropriés pour développer les infrastructure d'énergie renouvelable sans compromettre la biodiversité critique. Par exemple :

- la télédétection a été utilisée dans l'évaluation et le suivi des fermes solaires

de capacité industrielle.

- des outils géospatiaux avancés ont été appliqués pour cartographier les sensibilités des oiseaux aux parcs éoliens onshore et offshore.
- certaines ONG ont produit des cartes de sensibilité des espèces vulnérables et des lignes directrices pour minimiser l'impact de ces projets.
- des informations sur les causes immédiates de l'activité migratoire des oiseaux, telles que les conditions météorologiques aux points de départ, peuvent être combinées avec des mécanismes de surveillance et de détection afin de réduire les effets négatifs des fermes éoliennes sur les espèces d'oiseaux migrateurs.
- la modélisation écologique pourrait également apporter des informations utiles à la mise en place et l'exploitation des installations d'énergie renouvelable, pour identifier la présence et l'abondance des espèces végétales menacées à proximité des centrales hydroélectriques.
- d'autres outils permettent de cartographier le potentiel énergétique des vagues et aider à la sélection des sites appropriés pour les installations d'énergie océanique susceptibles de fournir des rendements maximaux tout en évitant une concurrence spatiale avec d'autres utilisations marines.

Cependant, de telles techniques peuvent nécessiter beaucoup de données, ce qui freine leur adoption, car l'accès à des données appropriées sur la biodiversité peut être difficile, même lorsque des systèmes de surveillance sont en place.

En outre, certaines filières (solaire, éolienne, hydroélectrique, océanique, géothermique) peuvent identifier facilement de futurs emplacements de production et donc les risques potentiels pour la biodiversité, d'autres, comme la bioénergie, ont plus de mal, malgré des tentatives pour intégrer des modèles d'écologie et de planification énergétique afin de mieux comprendre les conflits potentiels entre biodiversité et développement de la bioénergie. En effet, s'il est relativement simple d'estimer les surfaces à convertir pour atteindre les objectifs en matière de bioénergie, il est très difficile d'identifier à l'avance l'endroit exact où cette conversion des terres aura lieu en raison de de facteurs multiples : la nature multifonctionnelle²⁶ des matières premières, la complexité des filières et le manque de jeux de données actualisées ayant une résolution spatiale ou une couverture globale suffisante.

Pollutions

Les impacts sur la biodiversité des pollutions issues de projets d'énergie renouvelable (principalement la bioénergie) sont très difficiles à évaluer, car le type et l'ampleur de ces émissions diffèrent entre les différentes étapes du cycle de vie. Par exemple, même pour les polluants pour lesquels des économies globales d'émissions sont réalisées sur l'ensemble du cycle de vie, il y a émissions de polluants lors de la production de matières premières ou raffinage des biocarburants, habituellement dans les zones rurales ou périurbaines et il y a économies d'émissions sur les sites de combustion, généralement les villes. La répartition spatiale des émissions et donc leur impact sur les écosystèmes et la biodiversité varient donc beaucoup.

En raison de ces difficultés, ces pollutions sont donc considérés séparément dans les évaluations d'impact ou ne sont pas intégrés efficacement dans les analyses du cycle de vie. L'inclusion d'un élément spatial dans les analyses de cycles de vie peut aider à identifier les zones les plus susceptibles d'être impactées négativement. Dans tous les cas, l'intégration d'options technologiques avancées pour atténuer la pollution et augmenter l'efficacité dans les usines de production des biocarburants peut réduire les émissions nocives pour les écosystèmes et la biodiversité.

Controverses sur les indicateurs d'impacts

La mise en place d'indicateurs pertinents pour la communication des impacts sur

²⁶ - Un point similaire a été fait pour les grands dispositifs hydro-électriques, où les réservoirs peuvent être utilisés pour l'irrigation et d'autres besoins humains. Cette multifonctionnalité complique l'évaluation de l'incidence de la production d'énergie réelle sur la biodiversité des eaux douces.

la biodiversité du secteur des énergies renouvelables a également attiré l'attention et la controverse. Par exemple, il a été défini que « la mortalité par MWh » était un des meilleurs indicateurs pour estimer la mortalité dans les parcs éoliens et la comparer aux effets sur la biodiversité des combustibles fossiles et de l'énergie nucléaire²⁷. Les querelles résultantes sur le calcul de cet indicateurs entre les écologues et les énergéticiens mettent en évidence la nécessité de prendre conscience des différences d'approches disciplinaires afin de prendre des décisions pertinentes en matière de planification.

Actuellement, la plupart des données concernant les interactions entre énergie renouvelable et biodiversité mettent l'accent sur les risques potentiels plutôt que sur des informations directes sur les impacts au niveau des espèces. Cependant, il existe un nombre croissant de publications sur les impacts à l'échelle des espèces, en particulier dans le sud-ouest des Etats-Unis ; par exemple pour le renard nain de San Joaquin (*Vulpes macrotis*), la tortue du désert et l'écureuil du Mojave.

Enfin, il convient de noter que, malgré les impacts négatifs sur la biodiversité examinés tout au long de cette revue de la littérature, certaines filières d'énergie renouvelable peuvent avoir un impact global plus faible (voire positif) sur la biodiversité que d'autres formes d'énergie. Par exemple, une évaluation des 12 impacts potentiels de l'énergie solaire sur la faune et les habitats montre que cette énergie avait un seul impact plus fort que ceux des filières énergétiques traditionnelles²⁸. Enfin, malgré les effets négatifs potentiellement importants de certaines filières de bioénergie sur les écosystèmes et la biodiversité, il reste possible que les impacts cumulés sur la biodiversité induit par l'expansion future des bioénergie pourraient être inférieurs à ceux de l'exploration et de l'extraction des combustibles fossiles.

8.3. Implications politiques relatives aux interactions entre énergies renouvelables et biodiversité

Lors de l'exploration des implications politiques, il est important d'examiner et de comprendre les raisons qui ont amené les différents pays à développer différentes filières d'énergies renouvelables. Les facteurs les plus courants en faveur de leur expansion sont la sécurité énergétique, le développement économique (par le biais souvent des « emplois verts ») et l'atténuation des changements climatiques (cf. la directive européenne sur les énergies renouvelables (2009/28 / CE). L'importance respective de ces différents facteurs diffère selon les pays. Par exemple, la plupart des pays ont promu les biocarburants pour atteindre les objectifs de sécurité énergétique et de développement économique plutôt que pour promouvoir la durabilité environnementale²⁹.

Cela suggère que la protection de l'environnement n'est pas toujours prise en considération lors de l'adoption de politiques d'énergies renouvelables, ou, lorsque l'environnement en est le moteur que ce soit dans l'objectif d'atténuer les changements climatiques, en traitant le climat comme synonyme de toute la gamme des problèmes environnementaux. À cet égard, les effets négatifs sur la biodiversité locale peuvent avoir été éclipsés par la croyance répandue selon laquelle les énergies renouvelables pourraient généralement représenter un risque plus faible pour les écosystèmes que les combustibles fossiles.

Quoi qu'il en soit, cette revue de la littérature a démontré que les énergies renouvelables ont une incidence sur la biodiversité. Pour les auteurs cela signifie que la conservation de la biodiversité doit être tout autant un objectif légitime de l'économie verte que la réduction des émissions de gaz à effet de serre et que les

27 - Des études comparatives similaires ont été menées pour des grandes et petites installations hydroélectriques et éoliennes, ce qui a également abouti à des résultats intéressants.

28 - En fait, les trois quarts des autres impacts ont été jugés bénéfiques pour la biodiversité, y compris les émissions plus faibles de polluants et de GES, même si l'on considère que les installations solaires auraient nécessité l'élimination des forêts.

29 - En outre, plusieurs pays ont adopté des stratégies de biocarburants pour réguler la demande, sans nécessairement compléter cet objectif avec des politiques visant à améliorer la performance environnementale des biocarburants.

politiques économiques vertes qui favorisent les énergies renouvelables devraient prendre en compte les effets potentiels sur la biodiversité.

Considérant les différents facteurs en faveur des énergies renouvelables, leur incidence très variable et souvent très contextuelle sur la biodiversité et les nombreux instruments politiques pouvant être mis en œuvre à l'interface entre énergies renouvelables et biodiversité, cette revue démontre qu'il n'est pas simple de formuler des recommandations concrètes en matière de gestion.

Les auteurs concluent que quatre facteurs doivent être sérieusement pris en compte lors de l'élaboration de politiques économiques vertes associant énergies renouvelables et conservation de la biodiversité :

- les différences d'échelles entre les objectifs politiques des énergies renouvelables et la conservation de la biodiversité ;
- l'importance croissante du secteur privé dans le débat sur l'économie verte;
- la définition appropriée de terres dégradées pour implanter
- des dispositifs d'énergie renouvelable ;
- les éventuelles oppositions entre l'expansion des énergies renouvelables et
- les instruments de conservation de la biodiversité basés sur le marché.

Différences d'échelles

Il existe un décalage évident entre l'ampleur des effets négatifs sur la biodiversité des énergies renouvelables (qui se situent au niveau local ou du paysage) et les avantages attendus de celles-ci tels que l'atténuation du changement climatique, la sécurité énergétique et la croissance verte (qui eux se situent aux échelles nationale, régionale et mondiale). Cette incompatibilité d'échelles peut conduire à des conflits de mise en œuvre entre les objectifs locaux de conservation de la biodiversité et les priorités nationales en matière d'énergie ou de lutte contre le changement climatique. Il existe des mécanismes pour résoudre ce problème en rendant obligatoire l'intégration de la biodiversité dans les autres politiques sectorielles (comme ce qui se passe dans l'UE). Cependant, en particulier dans les pays en développement, ceci est plus compliqué. Bien que différentes initiatives telles que le développement d'indicateurs d'efficacité énergétique, de systèmes de certification et d'instruments de conservation basés sur le marché soient en cours d'élaboration pour diverses filières d'énergie renouvelable, la plupart attendent d'être adoptés et mis en œuvre, car la production d'énergie renouvelable et la conservation de la biodiversité ne sont généralement pas appréhendés de manière intégrée. Pourtant, il existe de nombreux accords internationaux sur la biodiversité (par exemple, la CDB, la Convention de Ramsar sur les zones humides) avec des objectifs internationaux partagés pour la biodiversité (par exemple, les objectifs d'Aichi de la CDB) qui nécessitent une mise en œuvre au niveau national. Bien que souvent considérés séparément, ces instruments politiques peuvent offrir un espace pour aligner les politiques nationales sur l'énergie renouvelable et la biodiversité. À cette fin, l'identification des synergies potentielles entre les accords multilatéraux sur l'environnement tels que la CCNUCC et la CDB pourrait constituer une première étape pour remédier de manière appropriée à de telles incompatibilités d'échelles.

Importance du secteur privé

Dans le débat actuel, les entreprises privées sont des acteurs clés pour catalyser les transitions économiques vertes, y compris les transitions dans le secteur des énergies renouvelables. En fait, le secteur privé est considéré comme un investisseur majeur dans les technologies d'énergie renouvelable, une source de propriété intellectuelle nécessaire à l'innovation technologique et même un fournisseur de matières premières pour la production d'énergie renouvelable.

L'absence de lois claires sur l'occupation foncière et l'acquisition de terres pour la production de bioénergie constitue un défi politique majeur pour la gestion de la conservation de la biodiversité sur des terres appartenant à des particuliers ou des entreprises en particulier dans les pays en développement. Certains chercheurs affirment que, avec des mesures incitatives et des politiques appropriées (par exemple, le zonage), la conservation de la biodiversité dans les paysages privés dévolus à la bioénergie pourrait s'améliorer. Ceci suggère que la voie entre l'attrac-

tion des capitaux privés et la réglementation des usages pour la protection de la biodiversité est étroite.

Exploitation préférentielle des terres dégradées

Se pose alors la question du développement de la production d'énergie renouvelable sur des terres dégradées. Aux États-Unis par exemple, environ 683 000 km² de terres cultivées abandonnées pourraient permettre la production de 14 000 GW d'énergie solaire ou éolienne et de bioénergie. Cependant, il existe de grandes différences entre les définitions (et les politiques) relatives aux terres dégradées. Dans le contexte des énergies renouvelables, les termes de terres « dégradées » et « marginales » ont été utilisés de manière synonyme et interchangeable avec les terres inutilisées, inactives, abandonnées, non développées, en jachère et à faible biomasse.

Or, les terres marginales propices à la production d'énergie renouvelable peuvent avoir une grande valeur en matière de biodiversité ou fournir de multiples services écosystémiques. La perte d'accès aux services écosystémiques fournis par les terres dégradées utilisées pour la production de bioénergie peut avoir des conséquences importantes pour les moyens de subsistance de l'homme.

Oppositions entre l'expansion des énergies renouvelables et les instruments de conservation de la biodiversité basés sur le marché

Le secteur de l'énergie renouvelable peut construire des interactions intéressantes avec des instruments de conservation basés sur le marché qui ont gagné en popularité dans le débat actuel sur l'économie verte, tels que les systèmes de paiement pour les services écosystémiques (PSE), la compensation de la biodiversité et la certification des produits.

Certaines études relatives à l'hydroélectricité ont suggéré des synergies positives entre des systèmes de paiement pour services écosystémiques et la conservation des forêts pour récompenser la coopération à long terme des communautés locales dans la conservation et la protection des écosystèmes forestiers restaurés.

Par ailleurs, la normalisation et la certification de la bioénergie et de la production de matières premières ont proliféré au cours de la dernière décennie. Bien que ces normes favorisent souvent des pratiques de production respectueuses de l'environnement, leur incidence réelle sur la biodiversité doit encore être déterminée. Ceci en particulier en raison des indicateurs choisis, qui visent à respecter la législation existante plutôt qu'à assurer la durabilité environnementale.

Enfin, la compensation de la perte de biodiversité a également été perçue comme un moyen de minimiser les impacts écologiques négatifs de l'énergie hydroélectrique et de l'énergie éolienne, avec des résultats mitigés, cependant.

Ces exemples suggèrent que bien qu'il existe des synergies intéressantes entre les énergies renouvelables et la conservation de la biodiversité fondée sur le marché, leur interaction peut être assez compliquée.

9. Conclusions

Les filières d'énergie renouvelable sont souvent considérées implicitement comme étant favorables à l'environnement en raison de leur rôle crucial dans la lutte contre le changement climatique. En vérité, il n'existe pas de filière d'énergie renouvelable qui n'ait aucun impact sur l'environnement actuellement, surtout si elles doivent être déployées à grande échelle pour permettre une transition rapide vers une économie verte.

La présente revue de la littérature démontre que les filières actuelles d'énergie renouvelable sont associées (directement ou indirectement) aux cinq principaux facteurs de pression à l'origine de modifications des écosystèmes et de perte de biodiversité. Ces pressions, cependant, varient considérablement entre les différentes filières et les contextes environnementaux dans lesquels elles opèrent. Bien que les preuves soient plus fortes pour certaines filières (par exemple, la bioénergie, l'hydroélectricité) que d'autres (par exemple, solaire, éolienne, océanique,

géothermique), il reste certain que le déploiement à grande échelle d'énergies renouvelables peut avoir des conséquences pour la biodiversité.

Étant donné que le secteur de l'énergie renouvelable est essentiel pour la transition vers une économie verte, cela signifie que des compromis doivent être trouvés entre économie verte et secteurs économiques qui dépendent directement des ressources biologiques telles que l'agriculture, la foresterie et la pêche. De même, des compromis plus large concernant le bien-être humain, allant au-delà des simples pertes économiques, peuvent émerger en raison de la perte de services de régulation et de services écosystémiques culturels (par exemple de loisir) suite au déploiement à grande échelle de certaines énergies renouvelables.

L'adoption d'une démarche hiérarchique d'atténuation du type « éviter-minimiser-restaurer-compenser » semble appropriée. Le modèle de déplacement, diffusion et intensification qui a été utilisé pour comprendre les impacts des politiques sur les stocks de poissons pourrait également être utilisé pour hiérarchiser les impacts des énergies renouvelables et les mesures d'atténuation.

La chaîne de remontée d'informations doit également être repensée pour comprendre et atténuer les impacts des projets sur la biodiversité. En effet, souvent, les données écologiques brutes collectées sur les sites de production sont agrégées et interprétées par les écologues, puis transmises aux planificateurs pour la mise en œuvre d'une politique énergétique gouvernementale descendante qui définit des objectifs en matière d'énergie renouvelable qui n'intègrent pas les impacts potentiels sur la biodiversité.

Alors que les évaluations des impacts sur l'environnement peuvent être des outils utiles pour identifier et minimiser les conflits avec la biodiversité liés à l'expansion des énergies renouvelables, ces évaluations ne devraient pas se concentrer exclusivement sur les impacts négatifs, car cela entraîne le risque que soient ignorés les avantages potentiels pouvant découler d'une planification judicieuse.

La présente analyse met en évidence certains des avantages directs et indirects des énergies renouvelables sur la biodiversité. Dans tous les cas, pour combler le fossé entre l'analyse de l'adéquation d'un site particulier et une planification plus large de la prise en compte de la biodiversité, il faudra adopter des perspectives disciplinaires plus larges.

Cette revue, ne remet pas en question la logique fondamentale de la promotion des énergies renouvelables qui présentent des avantages environnementaux et socioéconomiques élevés. Cependant, elle souligne que certains impacts négatifs sur la biodiversité existent et doivent être pris en compte lors de l'élaboration de politiques en matière d'énergie renouvelable. Ceci est particulièrement important étant donné que des effets non linéaires peuvent apparaître lors du développement de ces filières et que des impacts apparemment faibles pourraient devenir considérables lorsque les technologies d'énergie renouvelable sont déployées à grande échelle correspondant aux objectifs requis pour une transition vers une économie verte.

En résumé, il est crucial de déterminer les compromis entre le développement économique et la protection de l'environnement cachés de l'expansion des énergies renouvelables pour mieux comprendre le rôle de la biodiversité dans la transition énergétique, ainsi que les coûts et bénéfices économiques que sa conservation peut générer. Bien qu'il existe des connaissances sur la nature de ces compromis, il faudra s'appuyer sur des fondements plus solides et développer des outils d'évaluation et de planification appropriés pour guider la transition vers une économie verte tout en évitant les effets négatifs sur la biodiversité.

synthèse Jean-François Silvain,
directeur de recherche à l'IRD et président de la FRB
relecture Hélène Soubelet,
docteur vétérinaire et directrice de la FRB