

Août
2020

ÉTAT DE L'ART DES IMPACTS DES ENERGIES RENOUVELABLES SUR LA BIODIVERSITE, LES SOLS ET LES PAYSAGES, ET DES MOYENS D'EVALUATION DE CES IMPACTS

Rapport d'analyse et de comparaison des
impacts des énergies renouvelables sur la
biodiversité, les sols et les paysages -
directs et indirects sur l'ensemble de leur
cycle de vie

ADEME

Agence de l'Environnement
et de la Maîtrise de l'Energie

En partenariat avec :

Deloitte.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier l'ensemble des experts du comité technique sollicités dans le cadre de l'étude, et plus particulièrement les relecteurs de ce rapport :

AFB (Agence Française pour la Biodiversité) : Gilles Landrieu, Sylvain Michel, Pierre Sagnes, Dominique Baril

Cerema : Léa Thiebaud

FEE (France Energie Eolienne) : Pierre Bourdier

FEM (France Energies Marines) : Nolwenn Quilien

FHE (France Hydro Electricité) : Cécile Bellot

FRB (Fédération pour la Biodiversité) : Barbara Livoreil

LPO (Ligue pour la Protection des Oiseaux) : Geoffroy Marx

Orée : Théo Mouton, Hélène Leriche

CITATION DE CE RAPPORT

ADEME, Chloé Devauze, Mariane Planchon, Florian Lecorps, Maxime Calais, Mathilde Borie. 2019. État de l'art des impacts des énergies renouvelables sur la biodiversité, les sols et les paysages, et des moyens d'évaluation de ces impacts – Rapport d'analyse et de comparaison des impacts des énergies renouvelables sur la biodiversité, les sols et les paysages - directs et indirects sur l'ensemble de leur cycle de vie. 201 pages

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

Numéro de contrat : 17MAR000159

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par : Deloitte Développement Durable, Biotope

Coordination technique - ADEME : Sébastien Billeau, Ingénieur

Direction/Service Direction Productions et Energies Durables - Service Réseaux et Energies Renouvelables

TABLE DES MATIERES

0.	Propos liminaires	8
0.1.	Les principaux impacts des combustibles fossiles : un bref aperçu.....	8
0.2.	Pour éliminer les impacts des combustibles fossiles : quelles sources d'énergies ?.....	12
0.3.	Pour limiter les impacts des énergies renouvelables : quelles actions ?	15
0.4.	Pourquoi cette étude ?.....	16
1.	Introduction.....	18
1.1.	La place actuelle et à venir des énergies renouvelables.....	18
1.1.1.	Les enjeux des énergies renouvelables.....	18
1.1.2.	Le cas de la France.....	18
1.2.	La préservation de la biodiversité, des sols et paysages, un enjeu essentiel pour l'humanité et l'environnement	19
1.2.1.	Les enjeux de la préservation de la biodiversité, des sols et des paysages	19
1.2.2.	Les impacts des activités humaines sur la biodiversité, les sols et les paysages	20
1.3.	Les impacts des énergies renouvelables sur la biodiversité, les sols et les paysages	21
1.4.	Objectifs du projet.....	22
1.5.	Objectifs du livrable	23
2.	Méthodologie mise en œuvre.....	24
2.1.	Périmètre de l'étude.....	24
2.1.1.	Périmètre thématique de la recherche bibliographique	24
2.1.2.	Périmètre temporel de la recherche bibliographique	26
2.1.3.	Périmètre géographique de la recherche bibliographique	26
2.1.4.	Périmètre relatif aux énergies conventionnelles et autres activités humaines, distinctes de la production d'énergies renouvelables	27
2.1.5.	Périmètre relatif aux étapes du cycle de vie des énergies renouvelables.....	27
2.2.	Protocole de recherche et collecte des données.....	28
2.2.1.	Mots clés utilisés dans les recherches.....	28
2.2.2.	Utilisation des opérateurs booléens et boucles de mots-clés.....	28
2.2.3.	Moteurs de recherche utilisés	29
2.2.4.	Exploitation de bases de données existantes.....	29
2.3.	Le fichier de <i>reporting</i>	29
2.3.1.	Fichier de <i>reporting</i> et analyse bibliographique	29
2.3.2.	Analyse bibliométrique	30
2.4.	Sélection des publications pertinentes pour analyse	30
2.4.1.	Critères d'éligibilité	30
2.4.2.	<i>Scoring</i> de pertinence des publications sur la biodiversité	31
3.	Impacts de l'énergie solaire.....	33
3.1.	Impacts de l'énergie solaire sur la biodiversité.....	34
3.1.1.	Destruction / altération des habitats, modifications des milieux	35

3.1.2.	Dérangement des individus et altération des activités.....	36
3.1.3.	Blessures et mortalité d'individus.....	38
3.1.4.	Modifications des paramètres écologiques des habitats naturels	39
3.2.	Impacts de l'énergie solaire sur les sols	40
3.2.1.	Impacts en termes de surfaces de sols	40
3.2.2.	Impacts physiques sur les sols	44
3.2.3.	Impacts chimiques sur les sols	46
3.2.4.	Impacts biologiques sur les sols et services écosystémiques	48
3.3.	Impacts de l'énergie solaire sur les paysages.....	49
3.3.1.	Visibilité et acceptabilité dans le paysage.....	49
3.3.2.	Des méthodes économétriques et visuelles	50
3.4.	Guides disponibles sur le territoire français.....	51
3.5.	Synthèse des impacts de l'énergie solaire	51
4.	Impacts de l'énergie éolienne terrestre	53
4.1.	Impacts de l'énergie éolienne terrestre sur la biodiversité	54
4.1.1.	Destruction / altération des habitats, modifications des milieux	56
4.1.2.	Dérangement des individus et modification des activités	57
4.1.3.	Blessures ou mortalité d'individus (en phase d'exploitation)	59
4.1.4.	Modifications des paramètres environnementaux	62
4.1.5.	Méthodes d'évaluation des impacts, méthodes de suivi et incertitudes	62
4.2.	Impacts de l'énergie éolienne terrestre sur les sols	63
4.2.1.	Impacts en termes de surfaces de sols	64
4.2.2.	Impacts physiques sur les sols	66
4.2.3.	Impacts chimiques sur les sols	67
4.2.4.	Impacts biologiques sur les sols et services écosystémiques	67
4.3.	Impacts de l'énergie éolienne terrestre sur les paysages	68
4.3.1.	Visibilité n'est pas paysage	68
4.3.2.	Des outils et méthodes trop visuels	69
4.3.3.	Des planifications pas suffisamment tournées vers une logique de projet paysager	70
4.3.4.	Des conflits d'usage potentiels, contradictoires et difficiles à évaluer	70
4.3.5.	La question de l'acceptation sociale comme outil de participation et de collaboration autour des projets.....	71
4.3.6.	Eviter les impacts par le paysage plutôt que tenter de les quantifier	73
4.3.7.	Des guides très centrés sur la visibilité et l'aménagement plus que sur l'acceptation	73
4.4.	Synthèse des impacts de l'énergie éolienne terrestre.....	74
5.	Impacts de l'énergie éolienne en mer	77
5.1.	Impacts de l'énergie éolienne en mer sur la biodiversité	78
5.1.1.	Destruction / altération des habitats, modifications des milieux	79
5.1.2.	Dérangement des individus et modification des activités	80

5.1.3.	Blessures ou mortalité d'individus (en phase d'exploitation)	83
5.1.4.	Modifications des paramètres environnementaux	83
5.1.5.	Méthodes d'évaluation des impacts, méthodes de suivi et incertitudes	86
5.2.	Impacts de l'énergie éolienne en mer sur les sols et les sédiments	86
5.2.1.	Impacts en termes de surfaces de sols et fonds marins.....	87
5.2.2.	Impacts physiques sur les sols et sédiments.....	88
5.2.3.	Impacts chimiques sur les sols et sédiments.....	89
5.2.4.	Impacts biologiques sur les sols et sédiments, et services écosystémiques	90
5.3.	Impacts de l'énergie éolienne en mer sur les paysages	91
5.3.1.	Pas de grandes différences entre éolien en mer et éolien terrestre	91
5.3.2.	Focus sur le(s) guide(s) disponible(s).....	92
5.4.	Synthèse des impacts de l'énergie éolienne en mer	93
6.	Impacts des énergies marines	95
6.1.	Impacts des énergies marines sur la biodiversité.....	97
6.1.1.	Destruction / altération des habitats, modifications des milieux	98
6.1.2.	Dérangement des individus et modification des activités	100
6.1.3.	Blessures ou mortalité d'individus.....	103
6.1.4.	Modifications des paramètres environnementaux	104
6.1.5.	Méthodes d'évaluation des impacts, méthodes de suivi et incertitudes	105
6.2.	Impacts des énergies marines sur les sols et les sédiments	106
6.2.1.	Impacts en termes de surfaces de sols et fonds marins.....	106
6.2.2.	Impacts physiques sur les sédiments	107
6.2.3.	Impacts chimiques sur les sols et sédiments.....	110
6.2.4.	Impacts biologiques sur les sédiments, et services écosystémiques.....	111
6.3.	Impacts des énergies marines sur les paysages.....	112
6.3.1.	Acceptation sociale et usagers de la mer (tourisme, pêche, transport).....	112
6.3.2.	Méthodes et outils d'évaluation	113
6.3.3.	Focus sur le(s) guide(s) disponible(s)	113
6.4.	Synthèse des impacts des énergies marines	113
7.	Impacts de l'hydroélectricité	116
7.1.	Impacts de l'hydroélectricité sur la biodiversité	118
7.1.1.	Destruction / altération des habitats par emprise directe ou ennoiment.....	118
7.1.2.	Rupture de la continuité écologique.....	120
7.1.3.	Modifications des paramètres environnementaux	123
7.1.4.	Blessures ou mortalité d'individus.....	124
7.1.5.	Méthodes d'évaluation des impacts, méthodes de suivi et incertitudes	126
7.2.	Impacts de l'hydroélectricité sur les sols et les sédiments	127
7.2.1.	Impacts en termes de surfaces de sols	128

7.2.2.	Impacts physiques sur les sols et sédiments.....	130
7.2.3.	Impacts chimiques sur les sols et sédiments.....	132
7.2.4.	Impacts biologiques sur les sols et sédiments, et services écosystémiques	133
7.3.	Impacts de l'hydroélectricité sur les paysages	134
7.3.1.	Visibilité et appropriation paysagère	134
7.3.2.	Focus sur le(s) guide(s) disponible(s)	136
7.4.	Synthèse des impacts de l'hydroélectricité.....	136
8.	Impacts de la géothermie	138
8.1.	Impacts de la géothermie sur la biodiversité	139
8.1.1.	Destruction / altération des habitats, modifications des milieux	139
8.1.2.	Dérangement des individus et modification des activités	140
8.1.3.	Blessures ou mortalité d'individus.....	141
8.1.4.	Modifications des paramètres environnementaux	141
8.1.5.	Méthodes d'évaluation des impacts, méthodes de suivi et incertitudes	142
8.2.	Impacts de la géothermie sur les sols	144
8.2.1.	Impacts en termes de surfaces de sols	144
8.2.2.	Impacts physiques sur les sols	145
8.2.3.	Impacts chimiques sur les sols	147
8.2.4.	Impacts biologiques sur les sols et services écosystémiques	148
8.3.	Impacts de la géothermie sur les paysages	148
8.3.1.	Impacts visuels et médiatisation	148
8.3.1.	Méthodes d'évaluation et préconisations.....	149
8.4.	Synthèse des impacts de la géothermie.....	149
9.	Impacts des systèmes de transport et stockage	151
9.1.	Impacts des systèmes de transport et stockage sur la biodiversité	152
9.2.	Impacts des systèmes de transport et stockage sur les sols et les sédiments	153
9.2.1.	Impacts en termes de surfaces de sols	153
9.2.2.	Impacts physiques sur les sols et les sédiments	154
9.2.3.	Impacts chimiques sur les sols	155
9.3.	Impacts des systèmes de transport et stockage sur les paysages	155
9.4.	Synthèse des impacts des systèmes de transport et stockage.....	156
10.	Analyse comparée.....	157
10.1.	Mise en perspective des différents impacts des EnR entre elles	157
10.1.1.	Synthèse des enjeux sur la biodiversité, les sols, les sédiments et les paysages	159
10.1.2.	Typologie finale des impacts identifiés	162
10.2.	Analyse comparée des impacts des EnR par rapport aux autres activités humaines	163
10.2.1.	Focus sur les impacts sur la biodiversité	165
10.2.2.	Focus sur les impacts sur les sols	167

10.2.3. Focus sur les impacts sur les paysages	170
10.3. Manques de connaissance et besoins de recherche identifiés	171
11. Conclusions	174
Références bibliographiques	176
Index des tableaux et figures	194
Annexes	196
Annexe 1 – Glossaire	196

0. Propos liminaires

Le travail présenté dans ce rapport s'inscrit dans un contexte global, et national aujourd'hui caractérisé par une forte attente sociétale pour trouver des solutions opérationnelles à court, moyen et long termes aux crises énergétiques et environnementales, en cours depuis plusieurs décennies. Les missions et actions de l'ADEME s'inscrivent dans cette perspective historique et visent spécifiquement à promouvoir et à faciliter l'émergence d'alternatives, tout particulièrement à l'utilisation des combustibles fossiles. Comme toutes les activités humaines, le développement des énergies renouvelables a des impacts, qu'il faut évaluer, connaître et réduire au maximum. C'est l'objectif premier de cette étude, qui vise à réaliser un état de l'art des impacts des énergies renouvelables (EnR) sur la biodiversité, les sols et les paysages, Afin de mettre en perspective les résultats détaillés et précis présentés dans ce rapport, l'ADEME a souhaité présenter dans les propos liminaires :

- Les principaux impacts des combustibles fossiles, en mentionnant quelques exemples emblématiques qui démontrent des impacts à l'échelle globale dépassant ceux des EnR ;
- du côté de l'offre d'énergie, les principales sources d'énergies pour éviter ces impacts¹ ;
- les principales actions réalisées par l'ADEME depuis plus de deux décennies pour limiter les impacts des énergies renouvelables, et les organiser autour d'une feuille de route permettant une massification du déploiement des énergies renouvelables en minimisant les impacts, notamment sur la biodiversité, les sols et les paysages.

0.1. Les principaux impacts des combustibles fossiles : un bref aperçu

Les grandes organisations (AIE², OCDE³, PNUE⁴) et groupements d'experts internationaux (GIEC⁵, PIBSE⁶, WHO⁷) en matière d'énergie, matériaux, environnement (climat, biodiversité, etc.) et santé humaine ont bien mis en évidence au cours des dernières années, par la publication de travaux références et consensuels en la matière, l'ampleur de la crise énergétique, environnementale et sanitaire qui touche le monde, et la nécessité d'une rapide et profonde mutation et transition énergétique et écologique.

Leurs travaux ont démontré que les émissions de gaz à effet de serre (GES : CO₂, CH₄ et N₂O, voir Figure A) issus en grande partie de l'usage des énergies fossiles ont une responsabilité majeure dans la crise environnementale globale. Par ailleurs, la combustion des fossiles est à l'origine de la pollution de l'air et de l'eau à travers l'émission directe, ou la production indirecte, d'ozone, d'oxydes d'azote, de particules, de composés organiques volatils non méthaniques⁸, de dioxyde de soufre, de monoxyde de carbone, de métaux lourds (notamment plomb, mercure, arsenic, cadmium et nickel), et d'ammoniac. On estime, par exemple, que 10 % des émissions mondiales annuelles⁹ de mercure sont la conséquence directe de l'utilisation des combustibles fossiles. En ce qui concerne les émissions de CO₂, elles ont pour conséquence directe l'acidification des océans (Voir Figure B) ; ainsi de l'ordre de 30% de toutes les émissions auraient été absorbées par les océans depuis l'ère pré-industrielle, et le pH de l'océan pourrait descendre jusqu'à 7,7 en 2100 (contre 8,1 actuellement), si les émissions continuent d'augmenter. De plus, environ 15 à 30%¹⁰ de l'ensemble des pertes de biodiversité constatées dans les écosystèmes maritime, d'eau douce et terrestre seraient attribuables aux

¹ Le premier levier à mobiliser pour réduire les impacts étant bien entendu la réduction de la production et de la consommation d'énergie.

² AIE, « World Energy Outlook », 2019.

³ OCDE, « Global Material Resources Outlook to 2060 : Economic drivers and environmental consequences », 2018.

⁴ PNUE, « Global Resources Outlook, Natural Resources for the Future We Want », 2019.

⁵ GIEC, « Climate Change », 2014 ; « Global Warming of 1.5 °C », 2018 ; « Climate Change and Land », 2019

⁶ PIBSE, « Global Assessment on Biodiversity and Ecosystem Services », 2019.

⁷ WHO, « Ambient Air Pollution », 2016.

⁸ Gaz composés d'au moins un atome de carbone, combiné à un ou plusieurs des éléments suivant : hydrogène, halogènes, oxygène, soufre, phosphore, silicium ou azote.

⁹ Source : US Environmental Protection Agency, <https://www.epa.gov/international-cooperation/mercury-emissions-global-context#worldwide>, 2019.

¹⁰ A travers le changement climatique et la pollution directement générée par les combustibles fossiles.

changements climatiques et aux pollutions résultant pour l'essentiel de l'utilisation des combustibles fossiles (Voir Figure C).

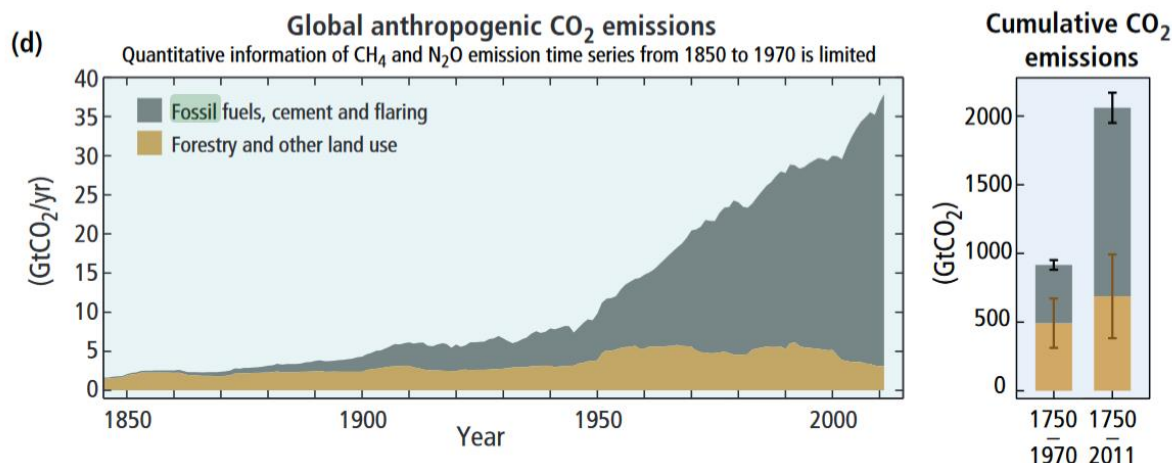
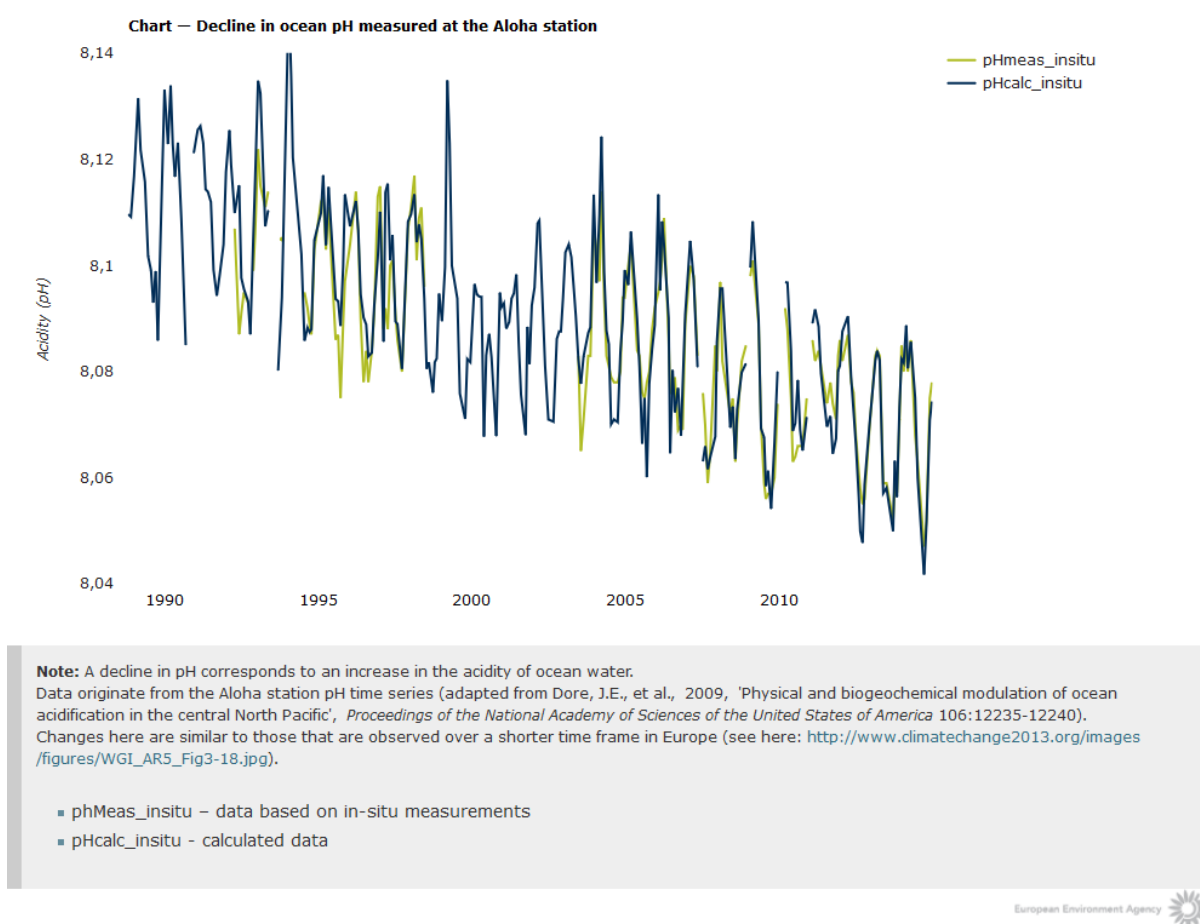


Figure A : Global anthropogenic CO₂ emissions from forestry and other land use as well as from burning of fossil fuel, cement production and flaring. Source : GIEC, Climate Change, Figure SPM.1, page : 3, 2014



Data sources:

■ Station ALOHA Surface Ocean Carbon Dioxide provided by The Laboratory for Microbial Oceanography (Hawaii)

Figure B : Decline in ocean pH measured at the Aloha station. Source : European Environment Agency, <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/ocean-acidification-1/assessment#tab-used-in-publications>, 2019

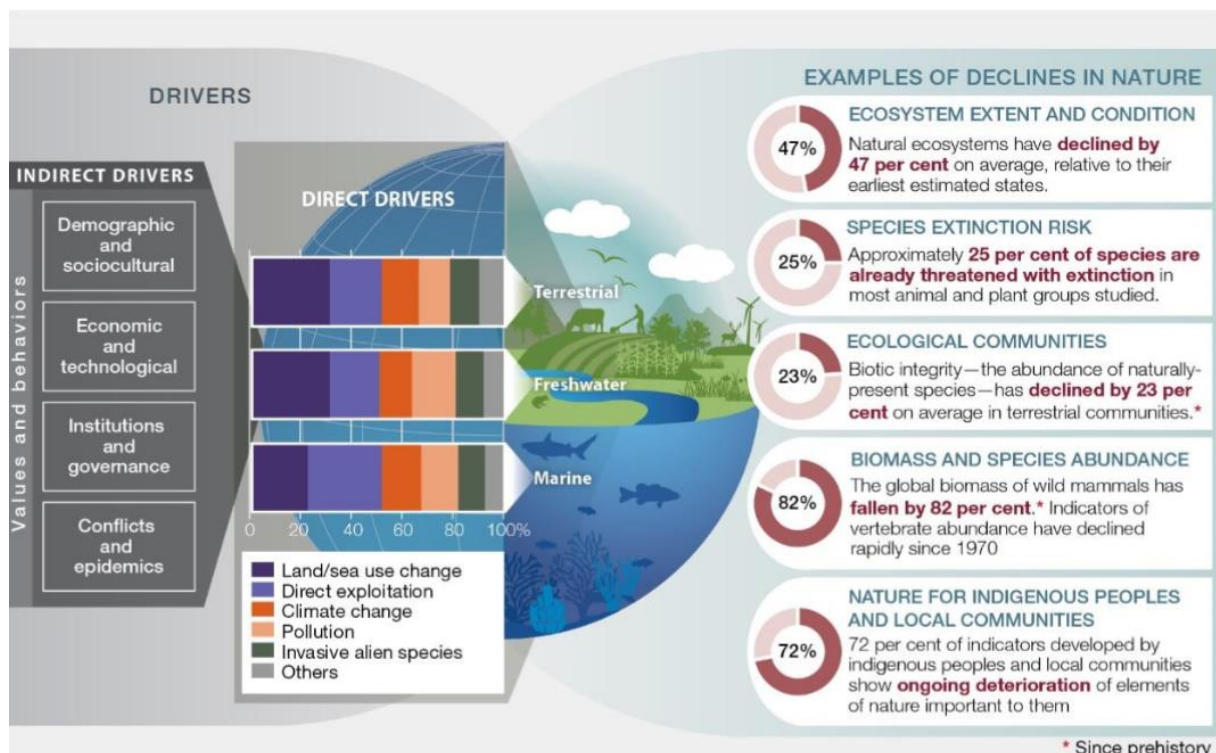


Figure C : Examples of global declines in nature, emphasizing declines in biodiversity, that have been and are being caused by direct and indirect drivers of change. The direct drivers (land/sea use change; direct exploitation of organisms; climate change; pollution; and invasive alien species) result from an array of underlying societal causes. The colour bands represent the relative global impact of direct drivers from top to bottom on terrestrial, freshwater and marine nature as estimated from a global systematic review of studies published since 2005. Source : Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science, Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, page 13, 2019

De plus, le programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE, 2019), estime à environ 5% les pertes globales de biodiversité qui seraient directement attribuables à l'extraction et à la première transformation des combustibles fossiles, en raison de l'impact sur les terrains de ces activités et des pertes d'habitats qui en résultent.

Par ailleurs, les combustibles fossiles mettent en péril la sécurité alimentaire en raison de leur impact sur les changements climatiques : augmentation des températures, des changements dans les précipitations, et de la fréquence des événements extrêmes (GIEC, 2019). Selon la même source, les projections des impacts des changements climatiques indiquent que le prix des céréales pourrait augmenter de 29% d'ici 2050, ce qui pourrait augmenter le nombre de personnes risquant la famine de 183 millions. Au même horizon temporel, on entrevoit aussi une perte de qualité nutritionnelle des aliments (par exemple, le blé pourrait perdre 6 à 12% de sa teneur en protéines, 4 à 7% du zinc et 5 à 8% du fer), ainsi qu'une distribution géographique des ravageurs et des maladies de plantes qui pourrait affecter négativement leur production, tout en augmentant les risques de disruption dans les approvisionnements.

L'impact très important de l'utilisation des combustibles fossiles sur la santé humaine est très bien documenté (voir Figure D) : les émissions directes, ou la production indirecte de divers polluants ont des impacts sur plusieurs organes. Par exemple, selon l'organisation mondiale de la santé (WHO, 2019), la pollution de l'air pourrait être le risque environnemental le plus important pour la santé humaine. En particulier, les particules fines de diamètre < 2.5 µm (PM2.5), dont les combustibles fossiles sont en grande partie responsables, seraient le cinquième facteur de mortalité dans le monde, causant environ 3 millions de morts en lien avec la pollution de l'air extérieur et la perte d'environ 103 millions « of disability-adjusted life years lost in 2015 ».

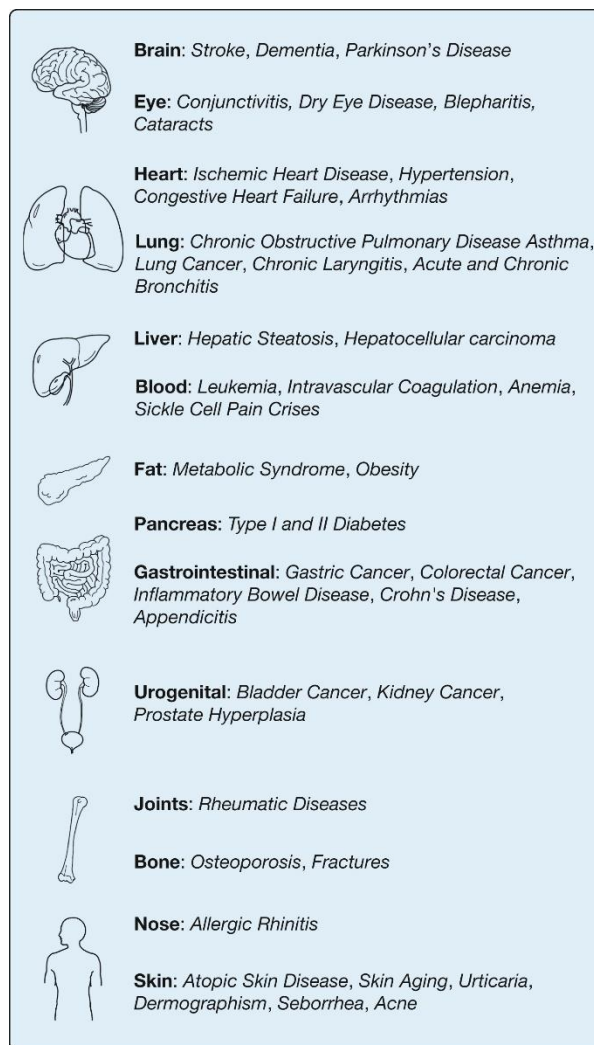


Figure D : Many conditions are associated with air pollution. This figure lists diseases linked to air pollution according to organ systems. Source : Air Pollution and Noncommunicable Diseases: A Review by the Forum of International Respiratory Societies' Environmental Committee, Part 1: The Damaging Effects of Air Pollution, et Part 2: Air Pollution and Organ Systems, CHEST Journal, 2019

Les différentes phases du cycle de vie des combustibles fossiles sont aussi responsables de pluies acides et de la pollution des eaux. En fonction des besoins en eau sur ces phases, et sans tenir compte de l'eau de mer utilisée, notamment pour les installations en mer, on estime¹¹ qu'au niveau mondial environ 15 à 18 milliards de m³/an d'eau douce seraient pollués à divers degrés. Comme l'exploitation des combustibles fossiles est généralement localisée sur des sites géographiquement limités, ces volumes peuvent contribuer localement de manière très importante au stress hydrique. Selon PNUE (2019), l'extraction et la première transformation des combustibles fossiles seraient d'ailleurs directement responsables à hauteur de 5% du stress hydrique global.

Ces quelques exemples d'impacts soulignent l'urgence climatique, environnementale, sociale et sanitaire de réduire à court terme l'utilisation des combustibles fossiles, et à long terme d'en éliminer l'usage. D'autant plus qu'il a été évalué par le Fonds Monétaire International¹² que les subventions accordées aux combustibles fossiles, incluant les externalités environnementales, représenteraient un coût annuel de l'ordre de 5000 milliards de dollars US, soit environ 7% du produit mondial brut, sachant que 85% de ces coûts sont attribuables au charbon et au pétrole. A ces considérations s'ajoute un rythme d'extraction actuel de 41 millions de tonne par jour (PNUE, 2019), qui n'est pas soutenable sur le long terme. En effet, les énergies fossiles constituent une énergie primaire non renouvelable à

¹¹ The World's Water, The Biennial Report on Freshwater Resources, Volume 7, Chapter 4 : « Fossil Fuels and Water Quality », 2011.

¹² Coady et al., « Global Fossil Fuel Subsidies Remain Large : An Update Based on Country-Level Estimates », IMF Working Paper, 2019.

l'échelle de temps des sociétés humaines ; elles ne peuvent donc pas constituer un socle énergétique durable propre à assurer la pérennité des services énergétiques nécessaires aux populations humaines.

A contrario, il faut souligner que les grandes organisations, groupements d'experts internationaux et notamment les articles scientifiques consultés dans le cadre de l'étude bibliométrique réalisée pour ce travail, ne mettent pas en avant d'impact systémique des énergies renouvelables à l'échelle de la planète, mais plutôt des impacts locaux ou régionaux qui peuvent être significatifs dans le cas de projets spécifiques. Par ailleurs, on peut aussi mentionner que PNUE (2019) dans son rapport sur l'utilisation des ressources naturelles souligne que : « les modèles d'utilisation des ressources naturelles ont des effets de plus en plus négatifs sur l'environnement et la santé humaine. L'extraction et la transformation des ressources en matières, combustibles et denrées alimentaires représentent environ la moitié des émissions de gaz à effet de serre de la planète (sans prise en compte des impacts climatiques liés à l'utilisation des terres) et plus de 90 % de la perte de biodiversité et du stress hydrique. L'utilisation des ressources naturelles et les avantages et impacts environnementaux connexes sont inégalement répartis dans les pays et les régions. Ces résultats montrent que les ressources doivent figurer au centre des politiques relatives au climat et à la biodiversité, pour rester dans un espace de fonctionnement sécurisé et permettre que les objectifs internationaux communs soient atteints. L'agriculture, et notamment la consommation alimentaire des ménages, est la principale force motrice de la perte de biodiversité et du stress hydrique au niveau mondial. Cela diffère des impacts sur le changement climatique et sur la santé dus aux particules, pour lesquels les ressources de tous ordres représentent une part notable des impacts globaux ».

Ainsi, cette analyse ne fait pas apparaître les énergies renouvelables, à l'échelle de déploiement actuelle, comme un facteur primaire et déterminant dans les pertes de biodiversité, la génération de stress hydrique, dans la production de particules ou dans le changement climatique. Elle met plutôt l'accent sur la responsabilité très importante des activités extractives et de première transformation des matériaux comme déterminants majeurs.

En conclusion, le lecteur est invité à prendre connaissance en détail des travaux cités en référence pour mesurer plus précisément toute l'ampleur des impacts liés à l'utilisation des combustibles fossiles sur le climat, l'environnement et la santé humaine. Rappelons que ces travaux font pour la plupart l'objet d'un processus de construction et de partage d'expertise, qui mobilise des milliers de chercheurs et scientifiques dans tous les domaines pertinents, et qu'il s'appuie (1) sur une revue systématique des publications les plus récentes dans la littérature scientifique ; publications ayant généralement fait l'objet de revues critiques de la part des pairs, et (2) sur des travaux dédiés pour répondre collectivement aux questions scientifiques qui nécessitent de mobiliser l'expertise multidisciplinaire d'une très large part de la communauté scientifique internationale, par exemple le développement des scénarios, et des modélisations, permettant de respecter les 1,5°C de l'accord de Paris (2015).

0.2. Pour éliminer les impacts des combustibles fossiles : quelles sources d'énergies ?

Selon les grandes organisations (AIE (2019), IRENA¹³) et groupements d'experts internationaux (GIEC¹⁴, WEC¹⁵), l'alternative principale à l'utilisation des combustibles fossiles du côté de l'offre d'énergie repose sur l'utilisation des sources d'énergies renouvelables, et réside tout particulièrement dans la massification du déploiement des technologies de conversion (modules photovoltaïques, éoliennes, etc.) qui sont déjà existantes. Par exemple, la substitution des énergies fossiles par des énergies renouvelables limiterait drastiquement la quantité de GES rejetée dans l'atmosphère. En prenant en compte tous les impacts sur leur cycle de vie, la production d'électricité par énergie éolienne émet 150 fois moins de CO₂ que celle résultant du charbon, et 6 à 16 fois moins de CO₂ pour le solaire photovoltaïque en fonction du lieu de fabrication des panneaux¹⁶. C'est pourquoi, selon la plupart des scénarios institutionnels de transition énergétique et sociétale envisagés notamment pour respecter les 1,5°C de l'accord de Paris (2015), **la part des énergies renouvelables dans la fourniture d'énergie**

¹³ IRENA, « Global energy transformation: A roadmap to 2050 », 2019.

¹⁴ GIEC, « Global Warming of 1.5 °C », 2018.

¹⁵ WEC, « Innovation Insights Brief - Global Energy Scenarios Comparison Review », 2019.

¹⁶ Base Carbone. ADEME. <http://www.bilans-ges.ademe.fr/>

primaire devrait atteindre entre 40 et 65% de la fourniture totale d'énergie primaire en 2050, à l'échelle mondiale, contre environ 16% aujourd'hui. Par ailleurs, depuis 2004, plus de 180 travaux¹⁷ dont la plupart ont fait l'objet d'une revue de pairs, ont évalué la faisabilité, les conditions, les capacités à installer et les ressources à capter pour aller jusqu'à une énergie primaire fournie à 100% par les sources d'énergies renouvelables, rendant cette option de plus en plus crédible pour de nombreux pays. Début 2019, l'IRENA¹⁸ répertoriait déjà plus de 53 pays qui s'engagent pour réaliser un objectif de 100% d'énergie renouvelable sur tout, ou partie du système énergétique, notamment le secteur électrique. D'un point de vue géographique, on retrouve ainsi 18 pays en Afrique, 13 en Asie, 9 en Océanie, 8 en Amérique Centrale et les Caraïbes, 4 en Europe et 1 pays d'Amérique du sud.

En France, de par sa mission d'accompagnement au développement des énergies renouvelables qui lui a été confiée par l'Etat, et dans le cadre de son scénario de prospective énergétique reposant sur la maîtrise de la consommation énergétique et le développement de l'offre d'énergies renouvelables¹⁹, l'ADEME évaluait en 2013 qu'en 2050, les énergies renouvelables pourraient représenter entre 60% et 70% de la production totale d'énergie primaire. Plus récemment, l'ADEME a elle aussi exploré plus finement et en détail la possibilité d'une couverture à 100% des besoins en électricité²⁰ ou en gaz²¹ par les énergies renouvelables, au niveau national, et dans les DOM.

Au travers de ces différents travaux nationaux ou internationaux, on peut estimer que les capacités de production installées d'ici 2050 pourraient représenter, pour les deux filières les plus emblématiques :

- Au niveau mondial, de l'ordre de 8 000 GW²² pour l'éolien (600 GW à fin 2018), et jusqu'à 64 000 GW pour le photovoltaïque (480 GW à fin 2018).
- Au niveau national, de l'ordre de 90 GW²³ pour l'éolien (15 GW à fin 2018), et 110 GW pour le photovoltaïque (8,5 GW à fin 2018).

Sachant que les impacts des énergies renouvelables sont généralement qualifiés de faibles par rapport aux impacts environnementaux et sanitaires globaux des énergies conventionnelles (ADEME, 2017²⁴ ; GIEC, 2018), et qu'il est déjà possible de réaliser des projets et installations à très faibles impacts, il n'y a pas lieu de remettre en cause les objectifs de développement des filières d'énergies renouvelables dans la transition énergétique, à l'échelle mondiale ou nationale. Néanmoins, il faut tenir compte de l'ampleur du déploiement des EnR à venir, notamment des EnR électriques (cf. ci-dessus), mais pas seulement. En effet, en référence à l'année 2016 et à l'échelle mondiale (IRENA²⁵), stabiliser le climat à l'horizon 2050 pourrait nécessiter une multiplication de la contribution des EnR à la consommation d'énergie finale par un facteur de l'ordre de 6. Dans le même objectif, en référence à l'année 2010 et selon l'ADEME²⁶, une multiplication de la production d'énergie à partir de sources primaires EnR par un facteur de l'ordre de 3 est attendue à l'horizon 2050. Ces chiffres montrent l'importance des déploiements des EnR nécessaires pour réussir la transition écologique, et soulignent en filigrane tout l'enjeu de mieux connaître, et de développer la maîtrise des impacts environnementaux des EnR. Ceci passe par une meilleure caractérisation et évaluation des impacts locaux, régionaux, nationaux, globaux et cumulatifs des déploiements à l'échelle envisagée. Sur cette base de connaissance enrichie, il devient alors possible de prioriser les technologies de conversion des EnR, et les sites propices présentant les plus faibles impacts. En effet, de nombreuses pistes existent pour atténuer les impacts environnementaux résiduels, et la diversité des filières EnR peut permettre d'adapter l'installation aux

¹⁷ Hansen et al., « Status and perspectives on 100% renewable energy systems », Energy, Volume 175, Pages 471-480, 2019 ; Jacobson et al., « 100% Clean and Renewable Wind, Water, and Sunlight All-Sector Energy Roadmaps for 139 Countries of the World », JOULE, Volume 1, Issue 1, Pages 108-121, 2017.

¹⁸ IRENA, « Towards 100% Renewable Energy: Status, Trends and Lessons Learned », 2019.

¹⁹ ADEME, « Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050, Document technique complet et Synthèse avec évaluation macro-économique », 2013 ; « Actualisation du scénario énergie-climat ADEME 2035-2050 », 2017.

²⁰ ADEME, « Mix électrique 100% renouvelable ? Analyses et optimisations, Un travail d'exploration des limites du développement des énergies renouvelables dans le mix électrique métropolitain à un horizon 2050 », 2016 ; « Vers l'autonomie énergétique en ZNI à l'horizon 2030 – La Réunion - Rapport Final. », 2018 ; « Vers l'autonomie énergétique en ZNI à l'horizon 2030 – La Guadeloupe - Rapport Final. », 2018. « Vers l'autonomie énergétique en ZNI à l'horizon 2030 – La Martinique - Rapport Final. », 2018.

²¹ ADEME, « La France indépendante en gaz en 2050, Un mix de gaz 100% renouvelable en 2050 ? : Etude de faisabilité technico-économique », 2018.

²² LUT University & Energy Watch Group, « Global Energy System Based on 100% Renewables. Power, Heat, Transport and Desalination Sectors », 2019.

²³ ADEME, « Trajectoires d'évolution du mix électrique 2020-2060 », 2018.

²⁴ ADEME, « Energies renouvelables et de récupération », Avis et Fiche technique, Décembre 2017.

²⁵ IRENA, « Global energy transformation: A roadmap to 2050 », 2019.

²⁶ ADEME, « Actualisation du scénario énergie-climat ADEME 2035-2050 », 2017.

contextes environnemental et social des sites d'implantation. Par exemple, implanter une installation géothermique de production de chaud/froid pour les besoins d'un bâtiment patrimonial et de grande valeur architecturale, ou historique permet de valoriser une EnR en toute discrétion, et avec des impacts très faibles. Autre exemple, pour la filière photovoltaïque, un dispositif a été mis en place dans les appels d'offres en France pour favoriser les modules ayant l'impact CO₂ le plus faible, ce qui conduit les manufacturiers à privilégier les procédés de fabrication les moins émetteurs. Grâce à une meilleure connaissance des impacts, il devient aussi possible d'envisager les mesures et actions spécifiques permettant de réduire, éviter ou compenser les impacts résiduels, pour atteindre les objectifs de déploiement des technologies des énergies renouvelables tout en limitant au minimum les impacts associés à chaque projet et installation.

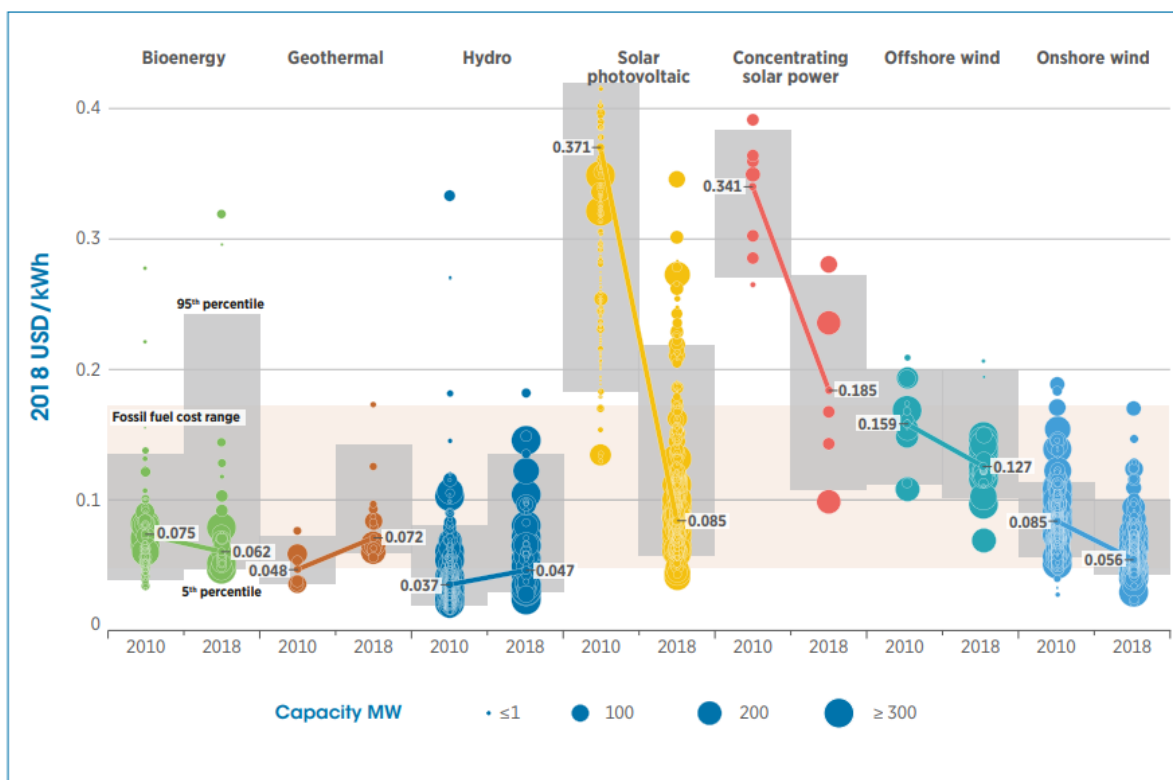
En complément, on peut rappeler brièvement les autres atouts principaux des énergies renouvelables (ADEME, 2017) qui en font, au-delà de leurs impacts environnementaux globalement faibles, les sources d'énergie à privilégier pour remplacer les combustibles fossiles :

- **Une compétitivité croissante des EnR** : les progrès technologiques et l'industrialisation des EnR ont permis une baisse des coûts qui mènent les filières les plus matures à des niveaux compétitifs avec les technologies conventionnelles, notamment en France²⁷, et il existe encore des marges de progrès importantes pour la plupart des filières. La Figure E résume très bien les baisses des coûts des EnR électriques, notamment solaire et éolienne, entre 2010 et 2018, à partir de la base de données de l'IRENA qui recense plus de 17 000 projets représentant 1 700 GW de capacité installée ;
- **Des filières industrielles et des retombées économiques en croissance** : en France, le marché des énergies renouvelables et de récupération a plus que doublé entre 2006 et 2017, avec une augmentation de 39% des emplois²⁸. Le chiffre d'affaires représente ainsi 26 Md€ en 2017. Ce secteur emploie désormais plus de 86 000 ETP. Au niveau mondial, les EnR représentaient déjà 11 millions d'emplois à fin 2018²⁹;
- **Des filières de production au service d'une réappropriation locale de l'énergie** : les différentes filières des EnR génèrent des retombées économiques locales en s'appuyant sur la mise en valeur de gisements d'énergie disponibles localement, et constituent aussi des vecteurs de développement économique dont plusieurs collectivités territoriales s'emparent pour en faire la colonne vertébrale de leur projet de territoire. Dans un climat d'incertitudes géopolitiques, les territoires peuvent ainsi s'assurer d'une plus grande indépendance énergétique. Par exemple, une installation photovoltaïque permet des recettes fiscales locales annuelles d'environ 13 000 €/MW, chiffre d'environ 12 400 €/MW pour l'éolien. Par ailleurs, la même installation photovoltaïque ou éolienne permet des recettes de location du terrain entre 3 000 et 5000 €/MW environ.

²⁷ ADEME, Coûts des énergies renouvelables et de récupération en France, données 2019, 2020.

²⁸ ADEME, « Marchés et emplois concourant à la transition énergétique et écologique dans les secteurs du transport, du bâtiment résidentiel et des énergies renouvelables - Situation 2014-2016 et perspectives à court terme », 2019.

²⁹ IRENA, «Renewable Energy and Jobs Annual Review 2019», 2019.



Note: This data is for the year of commissioning. The diameter of the circle represents the size of the project, with its centre the value for the cost of each project on the Y axis. The thick lines are the global weighted-average LCOE value for plants commissioned in each year. Real weighted average cost of capital (WACC) is 7.5% for OECD countries and China and 10% for the rest of the world. The single band represents the fossil fuel-fired power generation cost range, while the bands for each technology and year represent the 5th and 95th percentile bands for renewable projects.

Figure E : Global LCOE of utility-scale renewable power generation technologies, 2010–2018. IRENA, « Renewable power generation costs in 2018 », 2019

0.3. Pour limiter les impacts des énergies renouvelables : quelles actions ?

Depuis plus de deux décennies, l'ADEME s'emploie à mettre en place un ensemble d'actions et mesures visant l'excellence environnementale dans le développement des projets, et sur l'ensemble du cycle de vie des installations et technologies, afin d'accompagner les acteurs des filières dans l'appropriation et la mise en œuvre de démarches exemplaires.

L'ADEME a réalisé de nombreuses analyses du cycle de vie (ACV), notamment dans les secteurs de l'éolien, du photovoltaïque, du solaire thermique, et de la géothermie volcanique. La contribution à une meilleure connaissance de ces filières permet d'améliorer la conception et la fabrication des équipements EnR, en cherchant à diminuer les impacts des différentes phases du cycle de vie des technologies EnR. Néanmoins, les indicateurs généralement considérés dans les ACV (réchauffement climatique à 100 ans, absorption de particules fines, utilisation d'eau, unité toxique comparative pour l'homme, etc.) ayant un caractère global, ils ne permettent pas une prise en compte fine et précise des impacts à l'échelle locale, notamment ceux liés aux sites d'implantation des projets. Si la présente étude vise à pallier ces limites, tout particulièrement en matière de biodiversité, sols et paysages, il faut noter que l'ADEME a également travaillé en parallèle durant les deux dernières décennies sur ces enjeux, notamment en matière de compréhension et limitation des impacts des EnR sur la biodiversité.

L'ADEME s'est ainsi engagée dès 2004 auprès de la LPO (Ligue de Protection des Oiseaux) pour améliorer l'intégration environnementale de l'éolien. Cet engagement s'est concrétisé pendant plus de 15 ans, par un partenariat entre la LPO, l'ADEME et le ministère en charge de l'écologie autour du

programme national « éolien - biodiversité » visant à favoriser une intégration environnementale de qualité des parcs éoliens. Animé en étroite collaboration avec les professionnels de l'éolien, le Syndicat des énergies renouvelables (SER) et France Énergie Éolienne (FEE), ce programme a permis de mutualiser les expériences, d'accumuler et de partager les connaissances, de progresser sur de nouvelles technologies d'observation et surtout, de créer un espace d'échange au travers du site Internet du programme <https://eolien-biodiversite.com/> et des séminaires « éolien et biodiversité ». La bibliographie sur l'éolien, ses impacts potentiels sur la biodiversité et les moyens de les éviter n'a jamais été aussi riche : près de 900 références issues d'une trentaine de pays peuvent être consultées sur simple demande (soit 44 576 pages).

Un comité de pilotage est également en place depuis 2012 avec l'UICN (Union Internationale de Conservation de la Nature) sur la thématique de la conciliation du développement des EnR, marines dans un premier temps, et de la conservation de la biodiversité. Il s'agit d'une instance unique d'expression des attentes de tous les acteurs, à la fois du développement des EnR (Etats, développeurs, bureaux d'études, etc.) et de la protection de l'environnement. Cette instance de dialogue a permis d'identifier non seulement les besoins de connaissance et d'accompagnement des différents acteurs, d'identifier des actions et des recommandations, mais également de créer une synergie d'actions permettant un développement durable des énergies marines renouvelables, de l'éolien terrestre, et depuis 2018, sur l'ensemble des EnR : <https://uicn.fr/energies-renouvelables-biodiversite/>. A l'instar de la collaboration ADEME-LPO, ce partenariat avec l'UICN a permis à l'ADEME de se positionner aux côtés des associations environnementales pour promouvoir le déploiement des EnR dans le respect de l'environnement, en métropole et en outremer, en s'appuyant sur les recommandations les plus appropriées en matière de développement de projets.

Ces partenariats historiques ont ouvert plus récemment la voie à des rapprochements avec de nouveaux acteurs. L'ADEME travaille actuellement avec le Museum National d'Histoire Naturel pour améliorer les connaissances et modalités d'exploitation des données issues des suivis « biodiversité » des parcs éoliens. Ces travaux devraient conduire, à court et moyen terme, à une amélioration de l'évaluation des impacts de l'éolien sur les chiroptères, l'avifaune et les impacts cumulés des EnR. L'ADEME a également développé un partenariat avec France Nature Environnement pour favoriser la mise en œuvre des meilleures pratiques de développement des projets EnR et contribuer au dialogue territorial avec les acteurs locaux.

En outre, un rapprochement est en cours entre l'ADEME et l'Office Français de la Biodiversité, (impliqué dans le suivi et pilotage de la présente étude), pour travailler plus efficacement et rapidement sur l'amélioration de la connaissance et le développement des bonnes pratiques en matière d'évitement, de réduction et de compensation des impacts environnementaux des EnR.

Enfin, l'ADEME contribue aussi à l'amélioration des connaissances et pratiques en matière de réduction des impacts par un ciblage explicite des sujets biodiversité, sols et paysages dans ses appels à projets recherche et le financement des projets du Programme d'investissements d'avenir (PIA). Parmi les nombreux projets financés on trouve notamment le développement :

- de systèmes visant à une meilleure qualité de l'observation de la faune (volante ou marine) et des milieux ;
- de systèmes de bridage plus performants des éoliennes ;
- de pratiques pour améliorer l'intégration écologique des infrastructures EnR dans leur milieu.

0.4. Pourquoi cette étude ?

Dans la continuité des actions de l'ADEME présentées ci-dessus, et dans l'objectif de mettre en cohérence les actions dans ses différents domaines d'intervention (air, déchets, économie circulaire, sites et sols pollués, économie d'énergie et de matières premières, énergies renouvelables, technologies propres et économes, nuisances sonores) tout en anticipant les futures activités à réaliser dans le cadre de ses missions, l'ADEME a souhaité réaliser une étude de référence dressant un bilan des connaissances actuelles relatives aux impacts des énergies renouvelables sur trois domaines identifiés comme critiques en lien avec une massification de leur déploiement. Il s'agit de la biodiversité, des sols et des paysages ; ces domaines présentant aussi une forte connexion avec l'acceptabilité sociale du déploiement des EnR en France, et de forts enjeux. En effet, la pérennité et la durabilité de

la biodiversité, des sols et des paysages est très fortement remise en cause par l'ensemble des activités humaines (PNUE, 2019 ; GIEC, 2019). Bien que la biodiversité et les paysages ne fassent pas partie des domaines d'intervention directs de l'agence, la réalisation de cette étude lui a permis d'engager dans l'analyse des impacts, et dans la construction d'une feuille de route, deux acteurs de premier plan sur la biodiversité, l'Office Français de la Biodiversité, et sur les paysages, l'Ecole Nationale Supérieure de Paysage de Versailles.

Le présent travail achevé début 2019 répond ainsi à plusieurs objectifs, un objectif global qui s'inscrit dans la ligne des actions historiques de l'ADEME sur la biodiversité, les sols et les paysages, et trois objectifs spécifiques :

- Objectif global :
 - Progresser, selon un processus d'amélioration continue, dans la réalisation de projets et d'installations d'énergies renouvelables les plus vertueux possibles du point de vue environnemental et social.
- Objectifs spécifiques :
 - Réaliser un état de l'art bibliographique sur les connaissances actuelles en matière d'impacts des énergies renouvelables sur la biodiversité, les sols et les paysages ;
 - Mettre en évidence les enjeux et les éventuels manques qui ressortent de cette analyse bibliographique ;
 - Dresser une feuille de route pour améliorer les connaissances et les pratiques de développement de projets, d'installations et de technologies EnR, pour en diminuer les impacts.

Dans sa lecture, le lecteur est invité à prendre du recul et à considérer que le premier objectif spécifique d'analyse exhaustive des impacts, conduit à présenter de manière très détaillée, précise, qualitativement et moins souvent quantitativement, des impacts essentiellement locaux ou régionaux, mais qui pourraient apparaître « démesurément » importants, notamment en raison du nombre de travaux référencés. Ces impacts restent à mettre en perspective de ceux des combustibles fossiles brièvement présentés dans cette introduction, et dans la littérature présentée en référence. Dans le cadre du présent travail, il n'a pas été trouvé de synthèse complète des impacts³⁰ des combustibles fossiles sur la biodiversité, les sols et les paysages ; ce travail est identifié comme restant à réaliser. **Ainsi, les résultats de cette étude ne remettent en rien en question la pertinence et la nécessité du développement des énergies renouvelables, dans une perspective d'amélioration continue des pratiques de développement de projets, d'installations et de technologies EnR, pour limiter leurs impacts environnementaux et sociaux.**

³⁰ Sur l'ensemble de leur cycle de vie (de l'extraction au démantèlement de l'ensemble des infrastructures).

1. Introduction

1.1. La place actuelle et à venir des énergies renouvelables

1.1.1. Les enjeux des énergies renouvelables

Le développement des énergies renouvelables est, avec la réduction de la production et de la consommation d'énergie, un des moyens majeurs pour lutter contre le changement climatique et pour faire face à l'épuisement inéluctable des ressources fossiles. En un siècle, la température de la surface terrestre a augmenté de 1 °C et pourrait atteindre +4 °C d'ici 2100³¹. L'Accord de Paris, approuvé par 195 pays en décembre 2015 et entré en vigueur le 4 novembre 2016, a fixé comme objectif de limiter l'augmentation de la température de la surface terrestre à 2 °C par rapport à l'ère préindustrielle³¹. Or, la production d'électricité via les combustibles fossiles est responsable de 42 % des émissions mondiales de CO₂³², principal gaz responsable de l'effet de serre. La substitution des énergies fossiles par des énergies renouvelables limiterait la quantité de gaz à effet de serre rejetée dans l'atmosphère (par exemple la production d'électricité par énergie éolienne terrestre émettant 80 fois moins de CO₂ que celle résultant du charbon³³, et 6 fois moins que le mix électrique français³⁴).

Par ailleurs, l'augmentation rapide de la population mondiale et le développement économique des pays émergents impliquent une hausse de la consommation d'énergie dans le monde, et donc de la demande liée. Ainsi l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) prévoit une augmentation de plus de 25 % de la consommation d'énergie dans le monde d'ici 2040³⁵.

Enfin, le développement des énergies renouvelables permet d'ancrer la production d'énergie localement. Les territoires peuvent ainsi s'assurer d'une plus grande indépendance énergétique et jouer un rôle dans la création d'emplois locaux – dans le cas où l'essentiel de la conception et de la production des composants des ENR (pales, panneaux solaires, batteries, turbines, etc.) soit bien effectué sur place.

1.1.2. Le cas de la France

Fin 2016, les énergies renouvelables ne représentaient que 16 % du mix énergétique français³⁶. Or, le développement de ces énergies est un formidable enjeu pour la France dans la mesure où le pays possède le 2^{ème} gisement de vent en Europe, le 5^{ème} en matière d'ensoleillement et bénéficie notamment de la 2^{ème} Zone Économique Exclusive maritime mondiale³⁶. Ce potentiel est d'autant plus important à développer que la France souffre d'une forte dépendance vis-à-vis des importations d'énergie : d'après le bilan énergétique de la France pour 2015, le pétrole, le gaz et l'uranium représentent 91 % du déficit commercial français. La loi relative à la transition énergétique, adoptée par le Parlement le 22 juillet 2015, fixe à 32 % la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique français en 2030³⁶.

Le déploiement des énergies renouvelables en France représente également un enjeu économique, et pourrait donner lieu à la création de plus de 800 000 emplois en France d'ici 2050³⁷. Dans un contexte de désindustrialisation dans certaines régions de France, le déploiement des énergies renouvelables permettrait une redynamisation des territoires. Étant donné que les sites de production d'énergie sont souvent implantés dans des territoires faiblement peuplés où les entreprises de taille moyenne ou grande sont rares, l'implantation d'unités de production d'énergies renouvelables pourrait, par le biais de la fiscalité notamment, représenter une ressource financière pour les collectivités locales.

³¹ Gouvernement.fr. 2017. La COP 21.

³² IFPEN. 2017. Le changement climatique. <http://www.ifpenergiesnouvelles.fr/Espace-Decouverte/Les-cles-pour-comprendre/Le-changement-climatique>

³³ Base Carbone. ADEME. <http://www.bilans-ges.ademe.fr/>

³⁴ ADEME. 2015. Impacts environnementaux de l'éolien français. <https://www.ademe.fr/impacts-environnementaux-leolien-francais>

³⁵ AIE. 2018. World Energy Outlook. <https://www.iea.org/weo2018/>

³⁶ Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, Commissariat général au Développement Durable. 2018. Chiffres clés des énergies renouvelables – Edition 2018. <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publications/p/2764/994/chiffres-cles-energies-renouvelables-edition-2018-1.html>

³⁷ ADEME. 2016. Mix électrique 100 % renouvelable à 2050 – Evaluation macro-économique. <https://www.ademe.fr/mix-electrique-100-renouvelables-a-2050-evaluation-macro-economique>

1.2. La préservation de la biodiversité, des sols et paysages, un enjeu essentiel pour l'humanité et l'environnement

1.2.1. Les enjeux de la préservation de la biodiversité, des sols et des paysages

D'après l'Évaluation des écosystèmes pour le Millénaire réalisée par le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) en 2005, les activités humaines ont causé ces cinquante dernières années des destructions de biodiversité plus importantes et rapides qu'à n'importe quelle autre période. L'érosion de la biodiversité constitue un enjeu environnemental évident, d'autant plus qu'elle menace les services de pollinisation, fertilisation, capacités de production primaire, offre alimentaire, etc.

Les sols³⁸ constituent une ressource très faiblement renouvelable ; il faut par exemple deux millénaires pour constituer 10 centimètres de sol. Or, l'agriculture intensive expose de plus en plus les sols à l'érosion, si bien que 24 milliards de tonnes de sols fertiles ont été dissipées pour la seule année 2011 au niveau mondial. De plus, les forêts, principales protectrices des sols, souffrent de plus en plus du défrichement : 13 millions d'hectares de forêt sont défrichés tous les ans à travers le monde. Enfin, l'urbanisation galopante au niveau global, notamment en raison du développement économique des pays du Sud et du développement démographique, constitue un autre facteur important de l'érosion des ressources en sols, à tel point qu'il y aura moitié moins de terres arables par habitant sur Terre d'ici 2050 (comparé à 2011). Cette situation est particulièrement inquiétante au vu des fonctions essentielles des sols pour l'humanité : production agricole dans un contexte d'augmentation tant quantitative que qualitative de la demande alimentaire, rétention et régulation des émissions de GES et, enfin, en tant que support de biodiversité et étape essentielle dans le cycle du carbone, de l'azote, du phosphore et de l'eau.³⁹

Les paysages⁴⁰ sont également de plus en plus menacés. Le phénomène de métropolisation induit le plus souvent une consommation importante des espaces entourant les noyaux urbains. Le développement du tourisme et des pratiques de loisirs sature les littoraux tandis que le changement climatique induit une modification profonde des écosystèmes. Enfin, le phénomène de privatisation des paysages est de plus en plus prégnant et remet en cause le statut de bien commun conféré aux paysages (n'appartenant à personne individuellement et destinés à l'usage de la part de tous les êtres humains ainsi que des autres êtres vivants). Il soulève également la difficulté d'une planification cohérente des territoires, déjà soumis à une superposition de contraintes, entre lesquelles les arbitrages ne sont pas toujours gérés de manière optimale.

La « Loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages⁴¹ » du 8 août 2016 renforce certains principes existants du droit de l'environnement et en intègre d'autres. Sur le plan du développement et de l'aménagement, elle renforce le principe de prévention des atteintes à l'environnement et consacre l'objectif d'absence de perte nette de biodiversité. Dans le champ de la compensation des impacts à la biodiversité, la loi prévoit ou consacre plusieurs outils (obligations réelles environnementales, sites naturels de compensation, etc.). Les espaces de continuités écologiques voient leur prise en compte et leur protection renforcées par la loi du 8 août 2016 (instruments réglementaires de protection) ; une section du Code de l'urbanisme est modifiée pour encadrer la définition des espaces de continuités écologiques dans les documents d'urbanisme. Enfin, la loi du 8 août 2016 amène à la création de l'Agence française pour la biodiversité, qui regroupe plusieurs entités historiques (Office national de l'eau et des milieux aquatiques, Parcs nationaux de France, Agence des

³⁸ AFES. Roland Poss. La gestion durable des sols, un enjeu planétaire http://edd.ac-reunion.fr/ressources/sols/gestion_durable.pdf

³⁹ Les matières organiques du sol constituent le réservoir de carbone organique le plus important. Le premier mètre des sols mondiaux stocke entre 1 500 et 2 400 milliards de tonnes de carbone organique. La teneur de matière organique dans les sols est le résultat d'entrées (sous forme de débris végétaux, d'exsudats racinaires et d'organismes du sol) et de sorties de carbone organique (sous forme de CO₂ principalement, liées à la dégradation de la matière organique par les organismes du sol), le résultat du bilan étant ce qui est stocké (ou déstocké) du sol. La teneur de matière organique dans les sols dépend donc de l'occupation des sols (couverture végétale notamment), des pratiques humaines (gestion des résidus de culture, apport de compost ou de fumier, intensité de la collecte des rémanents forestiers, etc.), mais aussi des caractéristiques des sols (les sols argileux et très acides étant généralement plus riches en matières organiques) et des conditions climatiques.

⁴⁰ DREA Provence Alpes-Côte d'Azur. 2015. La préservation des paysages, du patrimoine et du cadre de vie : un enjeu majeur pour la région <http://www.paca.developpement-durable.gouv.fr/2-la-preservation-des-paysages-du-patrimoine-et-du-a8888.html>

⁴¹ Legifrance. 2016. LOI n° 2016-1087 du 8 août 2016 pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000033016237&categorieLien=id>

aires marines protégées, Atelier technique des espaces naturels, Fédération des conservatoires botaniques nationaux), et à la reconnaissance des sols comme patrimoine naturel.

1.2.2. Les impacts des activités humaines sur la biodiversité, les sols et les paysages

Le secteur des transports⁴² constitue la principale source d'émission de GES en France (28 % en 2014). Le changement climatique modifie les écosystèmes en profondeur tandis qu'il affecte les sols en en accélérant l'érosion. Par ailleurs, le développement des infrastructures de transport⁴³ artificialise les paysages et asphyxie les sols en le imperméabilisant (ce qui entraîne la modification locale du cycle de l'eau) et en les compactant. A cet effet d'imperméabilisation d'ajoute une potentielle pollution (hydrocarbures issus des enrobés, des pneus de voiture, des gaz d'échappement, etc.) et la fragmentation des sols et paysages. La biodiversité, à travers la destruction des habitats naturels spécifiques et la rupture des continuités écologiques, s'en trouve menacée.

La production d'énergie conventionnelle⁴⁴ affecte également l'environnement. Tirée des combustibles fossiles (gaz naturel, charbon, pétrole), elle rejette dans l'atmosphère des gaz responsables de l'effet de serre, des composés responsables de l'acidification des milieux et des composés (éléments traces métalliques, HAP, etc.) ou particules nocifs pour la santé humaine. De même, les étapes amont de leur cycle de vie (extraction des matériaux et fabrication des structures permettant d'extraire le gaz, le pétrole, le charbon, activités d'extraction des combustibles fossiles eux-mêmes) impactent fortement la biodiversité, les sols et les paysages. L'énergie nucléaire, bien que très faiblement émettrice en GES, affecte les écosystèmes aquatiques se trouvant à proximité des centrales, du fait de la chaleur qui y est rejetée. En plus des 200 tonnes de déchets de haute activité produites par les centrales nucléaires françaises chaque année (pour lesquelles aucune solution de fin de vie n'existe à ce jour outre l'entreposage, qui n'est pas une solution pérenne), leur activité représente un risque de contamination des sols et aquifères, et de menace sur la faune environnante, en particulier sur les sites d'extraction du minerais ou lors d'accidents nucléaires (l'accident de Tchernobyl a provoqué la contamination par des radionucléides d'une superficie de 12,5 millions d'hectares en Biélorussie, Russie et Ukraine, avec des niveaux de césium radioactif très importants).

L'urbanisation⁴⁵, quant à elle, aboutit à l'artificialisation des sols et réduit notablement les fonctions écologiques et les services écosystémiques assurés par les sols. Elle induit une diminution de la diversité biologique à travers la destruction de l'habitat naturel spécifique et contribue à la fragmentation des paysages.

D'autre part, les impacts de l'industrie sur l'environnement sont principalement liés aux rejets atmosphériques et liquides de polluants organiques ou inorganiques, au prélèvement excessif de ressources naturelles et à la production de déchets potentiellement dangereux, une mauvaise gestion des effluents et des déchets dangereux, ainsi que les accidents et pollutions pouvant avoir des effets irréversibles sur la biodiversité, les sols et les paysages.

Enfin, en milieu terrestre, l'agriculture⁴⁶ intensive est l'une des principales causes de la diminution de la biodiversité dans la mesure où elle réduit voire détruit les habitats naturels des espèces présentes, ou encore contribue à une altération généralisée des écosystèmes et notamment à l'appauvrissement des cortèges floristiques et faunistiques par l'utilisation de produits chimiques. L'homogénéité des types de cultures et la fréquence des travaux (labours) appauvrissent fortement les sols, les détruisent et détruisent une partie de leur biodiversité. La culture et l'élevage constituent également une source importante d'émissions de GES : près de la moitié des émissions de méthane sont du fait de l'élevage. L'agriculture est aussi responsable de la contamination des eaux par les pesticides, les nitrates et les phosphates. Les sols sont également sujets à une salinisation excessive (notamment en raison d'une mauvaise gestion de l'irrigation) et à une dégradation accrue. On estime ainsi qu'actuellement, à

⁴² Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, Commissariat général au Développement Durable. 2016. Chiffres clés du climat France et Monde – Edition 2017 <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publications/p/2587/1072/chiffres-cles-climat-france-monde-edition-2017.html>

⁴³ OCDE. 2006. L'impact environnemental des transports ; comment la découpler de la croissance économique.

⁴⁴ Natura-Sciences. Matthieu Combe. 2011. Quels sont les impacts environnementaux d'une centrale nucléaire ? <http://www.natura-sciences.com/energie/impacts-environnementaux-nucleaire.html>

⁴⁵ Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, Commissariat général au Développement Durable. 2016. L'essentiel sur l'industrie et l'environnement. <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/l'essentiel/s/industrie-environnement.html>

⁴⁶ FAO, Département Economique et Social, Perspectives pour l'environnement. L'industrie et l'agriculture <http://www.fao.org/docrep/004/y3557f/y3557f11.htm>

l'échelle mondiale, 25 % des sols sont fortement dégradés ou subissent un taux élevé de dégradation, 41 % des sols cultivés sont déjà dégradés et chaque année, ce sont 12 millions d'hectares supplémentaires de sol qui sont perdus (Lal, 2001; FAO, 2011; UNCCD, 2011).

En milieu marin, les impacts de l'agriculture intensive sur le milieu marin sont également très importants: eutrophisation conduisant à l'augmentation des blooms de micro algues toxiques, aux marées vertes, etc. De plus, la pêche industrielle engendre une exploitation soutenue de nombreuses espèces (pouvant conduire à un effondrement des stocks de certaines espèces), des captures accidentelles et des dégradations des milieux (notamment des techniques avec chaluts de fond).

Il ressort de l'ensemble de ces impacts environnementaux liés aux activités humaines que l'imperméabilisation des sols est l'un des mécanismes les plus dommageables, qu'il s'agisse de menace pour la biodiversité, pour la régulation de l'eau (en termes de qualité et de quantité), pour la production de biomasse, et plus généralement en termes de services écosystémiques rendus par les sols.

1.3. Les impacts des énergies renouvelables sur la biodiversité, les sols et les paysages

Les ENR visent avant tout à lutter contre le changement climatique, la principale menace pour la biodiversité, les sols et les paysages. Les ENR ont un impact global positif, mais sont également, tout au long de leur cycle de vie, source d'impacts sur la biodiversité, les sols et les paysages. Il convient alors d'évaluer et de maîtriser les impacts négatifs pour optimiser leur potentiel de contribution positive à ces trois composantes. Outre certains impacts positifs de l'installation d'infrastructures de production d'énergie renouvelable (par exemple en milieu aquatique, on peut citer l'effet récif, l'effet réserve, augmentation de la connaissance des milieux marins par les mesures réalisées pour les états initiaux et les suivis environnementaux des parcs), des impacts moins bénéfiques peuvent être observés.

Ainsi la production d'énergie hydraulique⁴⁷, notamment à travers l'installation de barrages, modifie les paysages et est susceptible de fragmenter les cours d'eau. La création de retenues d'eau peut aussi provoquer une sous-oxygénation du milieu aquatique et une modification du transit sédimentaire des cours d'eau. Les ouvrages hydroélectriques fragmentent les cours d'eau et constituent des barrières physiques aux déplacements de poissons migrateurs, par exemple. Ils modifient la courantologie locale et donc la biodiversité (espèces inféodées aux eaux calmes versus espèces adaptées au courant), tout comme les habitats aquatiques, aussi bien à l'amont qu'à l'aval. D'éventuelles émissions de méthane (dues à la décomposition des matières organiques par les microorganismes des sols ennoyés et de la végétation submergée) dans les lacs de barrages sont également à prendre en compte, notamment lors des premières décennies qui suivent la mise en eau des barrages.

Les énergies marines, elles, ont des effets sur la biodiversité marine. L'installation des équipements peut entraîner un remaniement des fonds de même que des émissions de bruits potentiellement fortes. En phase opérationnelle, la présence des installations peut engendrer des modifications des comportements d'animaux marins à leurs abords (évitement) et produire des mortalités par barotraumatisme). Les énergies marines peuvent aussi impacter la courantologie locale et donc la biodiversité.

L'installation d'éoliennes implique une modification des paysages (infrastructures mobiles de grande taille) et un impact sur les sols (béton nécessaire au socle des éoliennes). Par ailleurs, elles peuvent perturber les comportements des oiseaux en vol, ou bien leurs activités de reproduction ou d'alimentation. Les éoliennes en fonctionnement peuvent engendrer des mortalités ou des blessures d'oiseaux et de chiroptères par collision ou par barotraumatisme.

La production d'énergie solaire implique la pose de panneaux solaires sur des supports, nécessitant des travaux préparatoires du sol lorsqu'ils ne sont pas installés en toiture, ainsi qu'une gestion de la végétation présente (contrôlée généralement par herbicides). Les parcs solaires engendrent une modification paysagère locale et induisent une fragmentation des habitats notamment en raison des clôtures qui constituent des obstacles à la circulation de la grande faune terrestre. Les panneaux solaires peuvent également constituer des pièges écologiques pour les oiseaux et insectes aquatiques car la lumière polarisée réfléchiée par les panneaux photovoltaïques engendrerait une confusion entre la surface des cellules et une surface aquatique. Néanmoins, les parcs solaires peuvent avoir des impacts

⁴⁷ ADEME, Ma Terre. 2017. L'impact de l'énergie hydraulique sur l'environnement. <http://www.mtaterre.fr/dossiers/comment-ca-marche-lenergie-hydraulique/les-impacts-de-lhydraulique-sur-lenvironnement>

positifs, notamment en recréant des milieux attractifs pour la biodiversité dans des lieux de culture intensive telle que la forêt landaise, créée par l'homme.

L'énergie géothermique peut nécessiter des travaux de terrassement conséquents (notamment pour les dispositifs à capteurs horizontaux), avec des atteintes aux milieux en surface ; certains types de forage profond augmentent le facteur de risque géologique (affaissement ou gonflement potentiel du sous-sol, glissement de terrain, pollution de nappe phréatique, etc.). Le fonctionnement de centrales géothermiques peut également être à l'origine de nuisances sonores et d'émission de gaz sulfuré. Enfin, la production d'énergie géothermique peut se faire sous forme de chaleur ou d'électricité, avec des impacts associés variables : ainsi le stockage et le transport de la chaleur peuvent générer des élévations de température plus importantes que dans le cas de l'électricité.

Les impacts des énergies renouvelables sur la biodiversité, les sols et les paysages diffèrent selon le type de technologie, le site d'implantation, la phase du projet mais aussi la manière dont ces technologies sont développées. De plus, ils ne sont pas limités à la production d'énergie (phase d'installation et d'utilisation des structures associées). Par exemple, l'extraction et la purification de terres rares ou de cuivre, respectivement utilisées dans les aimants de certaines éoliennes en mer ou de turbines hydroélectriques, ainsi que dans les raccordements électriques, sont à l'origine de pollutions des sols environnants, et impactent la biodiversité locale du site d'extraction. Les résultats observés lors de la production d'énergie renouvelable sur site d'exploitation doivent donc être mis en perspective des impacts générés lors des étapes en amont (activités d'extraction des matières premières et de traitement des matériaux utilisés dans les structures, de fabrication des composants, etc.) et en aval (activités relatives à la gestion de la structure de production d'énergie en fin de vie). Il convient cependant de garder à l'esprit que les impacts sur la biodiversité, les sols, et les paysages par les étapes amont et aval du cycle de vie sont également présents pour les énergies conventionnelles.

1.4. Objectifs du projet

Les énergies renouvelables se trouvent au cœur de la transition énergétique et leur développement est considéré comme un élément indispensable à la réduction des émissions des gaz à effet de serre et donc à la lutte contre le changement climatique.

La France avait inscrit pour objectif 23 % d'énergie renouvelable dans la consommation énergétique finale en 2020 (lois du 15 décembre 2009 et du 14 octobre 2014), mais est en retard pour l'atteinte de cet objectif. Plus récemment, la loi de programmation sur la transition énergétique du 14 octobre 2014 prévoit plusieurs objectifs à long terme, dont une part d'énergie renouvelable de 32 % de la consommation énergétique finale en 2030.

Lors de l'annonce du Plan climat en juillet 2017, le Ministre de la transition écologique et solidaire Nicolas Hulot a confirmé la volonté d'atteindre cet objectif à 2030⁴⁸ ; il est même allé plus loin en fixant comme objectif pour la France d'atteindre la neutralité carbone en 2050.

Les objectifs de développement des énergies renouvelables en France ont été étudiés dans le cadre de la révision de la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE). Celle-ci couvrira les périodes 2018-2023 et 2024-2028. De façon générale, elle présente les orientations et priorités d'action des pouvoirs publics pour la gestion de l'ensemble des formes d'énergie sur le territoire métropolitain continental, afin d'atteindre les objectifs de la loi de transition énergétique pour la croissance verte votée (LTECV) en 2015. D'autres PPE sont élaborées pour les Zones non interconnectées (ZNI) au réseau métropolitain continental.

Bien que globalement positive dès lors qu'elle se substitue à des énergies polluantes, la production d'énergies renouvelables n'est cependant pas neutre en termes d'impacts environnementaux ; ces impacts touchent notamment la biodiversité, les sols et les paysages. L'objectif de l'étude, qui couvre l'ensemble des filières de production des énergies renouvelables à l'exception des filières de la biomasse et des centrales solaires à concentration, est ainsi multiple :

- Dresser un panorama des connaissances actuelles sur les impacts des énergies renouvelables (structures de production et systèmes de transport et de stockage associés) sur la biodiversité,

⁴⁸ Plan Climat de la France pour accélérer la transition énergétique et climatique, 6 juillet 2017, https://www.ecologie-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/2017.07.06%20-%20Plan%20Climat_0.pdf

les sols et les paysages sur l'ensemble de leur cycle de vie, à la fois en termes de résultats mais aussi d'approches et de méthodes (c'est à ce point que le présent livrable répond) ;

- Pour les impacts identifiés, réaliser des fiches de synthèse mettant en évidence les enjeux, mécanismes et méthodes existant (ou non) pour leur évaluation ;
- Définir des indicateurs permettant d'évaluer les impacts sur la biodiversité, les sols et les paysages d'une installation de production d'énergie renouvelable ;
- Identifier les thèmes qui nécessiteraient un développement et/ou un approfondissement des connaissances et/ou des méthodes, afin d'identifier les travaux à engager à la suite de l'étude.

Deloitte Développement Durable et Biotopie ont été mandatés par l'ADEME pour effectuer l'étude.

1.5. Objectifs du livrable

La première étape du projet consiste en une recherche bibliographique sur les impacts des énergies renouvelables sur la biodiversité, les sols et les paysages. Les éléments identifiés ont été analysés dans un premier temps pour rendre compte de la volumétrie des publications pertinentes et de potentiels sujets peu couverts, sur lesquels des recherches complémentaires s'avèrent nécessaires. Une analyse plus fine des publications retenues a ensuite été réalisée, afin de faire ressortir les impacts traités et les méthodes d'évaluation proposées. Les résultats de cette première étape ont été synthétisés dans un précédent livrable, le « Rapport d'analyse bibliométrique ».

Le présent livrable vise à fournir une analyse synthétique des impacts identifiés des énergies renouvelables sur la biodiversité, les sols et les paysages, et des moyens de les caractériser. Une attention particulière est portée à l'identification et à l'analyse des points de convergence ou de divergence entre les études.

La méthodologie mise en œuvre pour la recherche et la collecte de données, la sélection des publications jugées pertinentes dans le cadre de l'étude et leur analyse bibliographique est présentée dans le chapitre 2. La stratégie de recherche est détaillée et justifiée en regard des objectifs de l'étude, et les limites de cet exercice sont mises en avant.

Les chapitres 3 à 9 présentent, pour chacune des énergies renouvelables étudiées, l'analyse des impacts sur la biodiversité, les sols et les paysages, ainsi que les méthodes d'évaluation existantes. Une synthèse comparée entre les différentes énergies renouvelables (EnR) de ces différents impacts est fournie au chapitre 10.

Un glossaire est inclus en annexe.

2. Méthodologie mise en œuvre

Afin de répondre aux objectifs de l'étude, les recherches ciblent les impacts relatifs aux énergies renouvelables (EnR) sur la biodiversité, les sols et les paysages pour le territoire français et les écosystèmes similaires (à l'étranger), générés lors des différentes étapes du cycle de vie des EnR.

Le présent chapitre rassemble les principaux points d'attention relatifs au périmètre et à la stratégie de recherche mis en place pour l'analyse bibliographique et bibliométrique. Il permet de cibler au mieux la collecte et l'analyse des données, mais également d'orienter les axes prioritaires d'analyse mis en valeur dans les livrables. Les limites de l'exercice sont donc identifiées en séparant les aspects qui seront effectivement étudiés de ceux qui seront seulement mentionnés ou encore exclus du périmètre des recherches.

2.1. Périmètre de l'étude

La définition précise du périmètre est un enjeu particulier dans le cadre de cette étude, en raison de la multitude de publications sur certaines énergies ou catégories d'impact (biodiversité notamment), mais également en raison d'une volonté de ne pas quantifier des impacts des EnR d'une manière « absolue » (sans référentiel de comparaison), mais plutôt de manière « relative » par rapport à d'autres activités humaines, ou selon certaines activités liées au cycle de vie de ces installations.

Seule la littérature faisant mention à la fois d'une technologie EnR et d'un impact sur la biodiversité, les sols ou les paysages entre dans le cadre du présent état de l'art. La littérature faisant mention d'impacts pouvant être applicables aux EnR au cours de leur cycle de vie mais non mentionnés comme tels (en particulier, sur les impacts générés par les activités d'extraction de matériaux, utilisés entre autres dans les structures de production d'EnR – voir section 2.1.5) n'est donc pas retenue lors dans le périmètre de l'étude. Cela constitue un biais quant à l'exhaustivité des impacts connus des EnR, mais reflète la disponibilité de la littérature sur les impacts des EnR sur la biodiversité, les sols et les paysages – et est abordé dans le livrable présentant la feuille de route à l'ADEME sur les actions à conduire pour combler les manques de recherche.

Le périmètre a été discuté au cours des premiers mois de l'étude, conjointement par l'équipe projet et l'ADEME, puis révisé dans la mesure du possible sur la base des commentaires émis lors de la première réunion du comité d'experts ; il a été validé par l'ADEME. Les sections suivantes rassemblent les principaux points d'attention relatifs au périmètre. En particulier, les recherches ne visent pas à l'exhaustivité des publications, mais plutôt à donner une vision représentative des impacts considérés. En raison des ressources et du temps disponibles pour ce projet, ainsi qu'au vu des objectifs de l'étude (voir section 2.4 sur ce sujet), le corpus de texte analysé ne peut donc pas être considéré exhaustif sur certains aspects.

2.1.1. Périmètre thématique de la recherche bibliographique

La recherche bibliographique est réalisée selon une double approche, à la fois globale (impacts des énergies renouvelables sur la biodiversité, les sols, les paysages) et thématique (entrée « type d'énergie renouvelable » et/ou « type d'impact »).

Les différentes technologies liées aux énergies renouvelables investiguées sont les suivantes :

Tableau 1 : Technologies liées aux énergies renouvelables étudiées

Dispositifs de production d'énergie	
Solaire	Solaire photovoltaïque (sur toiture ou au sol) Thermique basse température (sur toiture ou au sol)
Éolien	Terrestre En mer (posé ou flottant)
Hydroélectricité	Barrages à retenue Hydroélectricité au fil de l'eau
Énergies marines	Énergie hydrolienne

	Énergie houlomotrice Énergie marémotrice Énergie thermique des mers Énergie osmotique
Géothermie	Géothermie très basse température (superficielle) Géothermie intermédiaire Géothermie profonde (chaleur ou électricité) Géothermie volcanique (électricité) Thalassothermie (rivières, lacs, mer) Cloacothermie (eaux usées)
Transport et stockage d'énergie	
Raccordements	Electrique De chaleur
Réseaux	Electrique De chaleur De froid Gaz Smart grids
Stockage	Production d'hydrogène Pompage turbinage

La filière biomasse est exclue du périmètre, tout comme les centrales solaires à concentration. La revue bibliographique n'inclut pas de recherche dédiée aux dispositifs de transport et stockage non spécifiques aux énergies renouvelables.

La liste des impacts investigués, présentée en Tableau 2, a été complétée au fur et à mesure de la revue bibliographique, et prend en compte les retours de l'ADEME et du comité d'experts. La terminologie employée dans cette liste est générique, elle peut être adaptée au cas par cas dans les chapitres relatifs à une EnR. Dans le cas particulier des sols, il convient de distinguer les enjeux et les impacts sur les sols terrestres de ceux sur les sédiments ou les fonds marins (par exemple, occupation des sols terrestres et planification des fonds marins).

Tableau 2 : Impacts étudiés

Impacts sur la biodiversité	
Destruction / altération de milieux	Modification / destruction d'habitat Risque de pollutions accidentelles ou chroniques Fragmentation d'habitat Modification du fonctionnement d'un écosystème
Perturbation et dérangement d'individus d'espèces de faune et de flore	Effet barrière / perturbation des animaux Déplacement / éloignement lié aux infrastructures Perturbations sonores (y compris vibrations, ultrasons et infrasons) Perturbations visuelles, dont lumineuses
Mortalité ou blessure d'individus d'espèces de faune sauvage	Collision (avec ou sans mortalité) Variation de champ de pression (avec ou sans mortalité) Electrocution Brûlures
Modification des paramètres environnementaux	Pollutions Modifications physico-chimiques (dont concentration en oxygène) Apport de champs électromagnétiques Modifications de température Modifications hydrodynamiques
Impacts sur les sols et les sédiments	
Impacts en termes de surfaces de sols	Occupation du sol Changement d'affectation du sol Artificialisation du sol Co-usage du sol

	Recouvrement du sol
Impact physique	Imperméabilisation du sol Erosion / Ruissellement Tassement / Compaction du sol Perturbation physique autre (altération de la structure, réchauffement du sol, apports de matériaux exogènes, etc.)
Impact chimique	Contamination / pollution du sol Perturbation chimique autre (salinisation, acidification, etc.) Perte de matière organique du sol
Impact biologique et services écosystémiques	Perturbation de la faune du sol (macro, micro, méso) Perturbation de la microflore du sol (champignons, bactéries, micro-algues, etc.) Perte de fertilité du sol Perturbation des services écosystémiques du sol
Impacts sur les paysages	
Impact lié à l'aménagement	Planification, localisation des sites Esthétique/design Mise en site, agencement Densité Paysages de l'énergie
Impact lié aux usagers	Acceptation sociale Visibilité Usages

2.1.2. Périmètre temporel de la recherche bibliographique

L'étude bibliographique est réalisée sur une période 2005-mi-2018. Toutefois, les recherches intègrent également des publications plus anciennes lorsque cela s'avère pertinent, par exemple dans le cas de l'hydroélectricité ou des énergies marémotrices, pour lesquelles des études d'impact ont été réalisées avant 2005, sur des technologies similaires à celles actuellement en place. Un certain nombre de publications datant d'avant 2005 ont ainsi été ajoutées à la revue bibliographique (près de 10 % du total), portant principalement sur les impacts relatifs à la biodiversité.

2.1.3. Périmètre géographique de la recherche bibliographique

La revue bibliographique est centrée sur le périmètre français (métropole et outre-mer). A noter que le contexte des impacts est décrit, notamment leur localisation ; et aucune généralisation trans-géographique n'est effectuée si cela n'est pas pertinent. Par exemple, les impacts générés dans un territoire d'outre-mer ne sont pas extrapolés à la France métropolitaine, et vice-versa.

Les recherches incluent également les pays ayant des écosystèmes et des contextes de production d'énergie typiques de ceux rencontrés en France, permettant une extrapolation des résultats au cas français ; en priorité des pays d'Europe et d'Amérique du Nord (Etats-Unis et Canada). Au vu de la diversité des écosystèmes rencontrés sur le périmètre français outre-mer, la revue bibliographique sur les territoires équivalents est décidée au cas par cas par l'équipe projet et validée par l'ADEME.

Les spécificités relatives au territoire métropolitain ou aux territoires d'outre-mer sont relevées afin de refléter les différents cas de figure, parfois directement liés au portage politique et l'investissement sur un territoire donné.

La revue bibliographique réalisée sur les étapes d'extraction de matériaux utilisés pour les EnR, de fabrication et de fin de vie des EnR a été élargie à d'autres territoires, lorsque cela était pertinent (par exemple, les recherches sur les impacts générés par l'extraction des terres rares couvrent le territoire de la Chine, où la quasi-totalité de la production annuelle est réalisée).

La plupart des publications retenues pour la revue bibliographique portent sur un périmètre géographique autre que la France (plus de 80 % du total) ; cependant seuls les impacts jugés similaires au cas français (métropolitain et/ou outre-mer) sont inclus dans le cadre de l'état de l'art.

2.1.4. Périmètre relatif aux énergies conventionnelles et autres activités humaines, distinctes de la production d'énergies renouvelables

Les énergies conventionnelles et les autres activités humaines (transports et mobilité, bâtiment, agriculture, industries) ne sont pas directement couvertes par l'état de l'art et l'analyse bibliométrique. Il n'y a donc pas de recherche dédiée sur les impacts associés sur la biodiversité, les sols et les paysages. Cependant, les analyses comparatives identifiées dans la revue bibliographique sont utilisées dans la suite du projet, afin de mettre les impacts des énergies renouvelables en regard des impacts connus des énergies conventionnelles et des autres activités humaines.

Malgré l'attention particulière portée sur le sujet, un nombre très réduit de publications met en regard avec des indicateurs comparables l'impact relatif des énergies renouvelables face aux énergies conventionnelles ou autres activités humaines (voir sélection en section **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Cela reste une limite importante pour pouvoir relativiser l'impact des énergies renouvelables par rapport aux autres activités humaines. Ceci est évoqué dans les manques de connaissances et de recherche identifiés ainsi que dans la feuille de route à l'ADEME sur les actions à conduire pour combler ces manques.

2.1.5. Périmètre relatif aux étapes du cycle de vie des énergies renouvelables

Les impacts sur la biodiversité, les sols et les paysages ne sont pas limités à l'étape de la production d'énergie renouvelable (sous forme d'électricité ou de chaleur), qu'il s'agisse des phases d'installation de la structure, de fonctionnement et maintenance, ou de démantèlement de la structure sur le site de production d'énergie. Les étapes en amont (par exemple, activités d'extraction des matières premières) et en aval (activités relatives à la gestion et au traitement de la structure de production d'énergie en fin de vie) peuvent être des contributeurs importants à ces impacts.

Des recherches dédiées sont effectuées pour couvrir la littérature existante portant sur les impacts des phases d'extraction, de fabrication et de fin de vie des énergies renouvelables, et des matériaux associés. En plus des recherches ciblant les EnR de façon générale, la revue de littérature se focalise sur les matériaux qui, parmi ceux utilisés dans les EnR, sont considérés stratégiques en raison des problématiques pouvant leur être associées : raréfaction des ressources primaires ; dépendance de l'approvisionnement à un nombre limité de pays ou d'organisations ; production en zone de conflit ; etc. Malgré les recherches complémentaires menées à ce sujet, la quasi-totalité de la littérature relative aux impacts des EnR se limite aux activités d'installation et de fonctionnement ; seules quelques publications s'attachent à analyser les impacts des EnR sur l'ensemble de leur cycle de vie (parfois sans permettre de comparaison par étape).

Ce constat est particulièrement vrai pour les impacts sur la biodiversité, les sols et les paysages. En effet, si les ACV disponibles sur certaines technologies peuvent prendre en compte tout le cycle de vie des installations, les indicateurs ne sont généralement pas bien adaptés pour l'identification des impacts considérés ici. Les difficultés d'obtention d'informations sur certaines étapes doivent être prises en compte à la lecture de ce livrable – ces limites sont rappelées dans l'analyse, lorsque pertinent. Les résultats de l'analyse bibliométrique sont détaillés dans un livrable dédié, le « Rapport d'analyse bibliométrique ».

La littérature reflétant les impacts générés lors de l'extraction de matériaux, mais ne faisant pas mention d'EnR, n'entre pas dans le cadre du présent état de l'art. En effet, les matériaux extraits pour les EnR sont utilisés dans de nombreuses autres applications, et l'évaluation des impacts des énergies renouvelables lors de ces phases serait l'objet d'une étude à part entière.⁴⁹ Des éléments d'analyse préliminaire pourront être fournis dans la suite de l'étude sur les impacts de la phase d'extraction des principaux matériaux utilisés dans les EnR, en combinant les recherches faites par l'équipe projet et les informations communiquées par l'ADEME à partir du projet sur l'impact de la transition énergétique en France sur les matières premières.

⁴⁹ Deux approches peuvent être envisagées : calcul des impacts alloués aux EnR via la quantification des parts de marché des EnR pour un matériau donné (méthode dite top-down), ou calcul des impacts d'une structure de production d'EnR en connaissant sa composition et les impacts par unité de matériau produite (méthode dite bottom-up)

2.2. Protocole de recherche et collecte des données

Le protocole de recherche et de collecte des données a été défini lors des premiers mois du projet conjointement par l'équipe projet et l'ADEME. Il prend également en compte les commentaires émis lors de la première réunion du comité d'experts, et a été validé par l'ADEME.

2.2.1. Mots clés utilisés dans les recherches

Pour réussir la collecte d'informations pertinentes sur les sujets et les questions de recherche de l'étude, des combinaisons appropriées de mots-clés sont utilisées pour cibler la recherche. La liste de mots-clés utilisés a été complétée au fur et à mesure de la revue afin de refléter au mieux les recherches effectuées dans le cadre de la collecte de données, et prend en compte les retours de l'ADEME et du comité d'experts.

Les recherches sont effectuées à partir de mots-clés en anglais (orthographes anglaise et américaine) et en français pour couvrir la portée internationale de l'étude.

Tableau 3 : Mots-clés utilisés (en anglais) – liste non exhaustive

Catégories	Mots-clés
Technologies = SET 1	<i>Renewable energy Wind turbine, off-shore wind turbine, on-shore wind turbine, grid-connected turbine, stand-alone wind turbine, windmill, wind generator, wind power plant, wind farm, wind facility, wind energy, windpump, airborne wind turbine, on-shore wind farm, monopole, compact wind acceleration turbine Solar panels, solar cells, solar-thermal systems, solar electric system, solar thermal power plants, solar water heating systems, photovoltaics, PV system, agrivoltaic, agrovoltaix, agri-voltaic, agrophotovoltaic, solar power plant Small-scale hydro, electricity grid system, storage system, power lines, water turbine, "zero head" turbine, river current turbine, water current turbine, run-of-river hydropower, hydropower system, hydropower plant, hydroelectric plant, SHP installation, hydroelectricity, fluvial system, dam, impoundment hydropower Wave power, tidal power, tidal turbine, osmotic power Geothermal</i>
Impacts = SET 2	<i>Impact, influence, effect, assessment, degradation, loss, hazard, limits, disturbance, destruction, mortality, pollution, contamination, light pollution, noise pollution, vibration, collision, risk, fragmentation</i>
Biodiversité = SET 3	<i>Biodiversity, fauna, flora, mammals, birds, fish/fishes, natural habitat, species habitat, chiroptera, bats, insects, species, community ecology, ecosystem ecology, marine species, plants, biosphere, biocoenosis, marine mammals, seabirds, species, ecological function</i>
Sol = SET 4	<i>Land occupation, land area occupation, land use, land use change, LUC, land take, land transformation, transformed land, land requirement, disturbed soil/land, soil/land disturbance, soil sealing, land co-use, soil quality, soil compaction, soil abrasion, soil degradation, soil porosity, soil health, erosion, run-off, contamination, organic matter, soil fungi, soil microorganisms, rhizosphere, ecosystem services, , soil functions, organic carbon, release, spreading, leaching, nutrient, land take, carbon sequestration, soil organic matter, soil organic carbon, land cover, deforestation, subsoil, topsoil, soil mechanic, soil water, soil moisture, soil matrix, soil-atmosphere, soil solution, minerals, soil formation, seabed, sediments</i>
Paysages = SET 5	<i>Landscape, coastline, coastal, aesthetics, visibility, heritage, cumulative effects, saturation, insertion, use, practices, transformation, evolution, design, siting, layout, ownership</i>

2.2.2. Utilisation des opérateurs booléens et boucles de mots-clés

L'utilisation des opérateurs booléens AND et OR sont la base d'une recherche efficace et ciblée, et sont utilisables universellement dans tous les moteurs de recherche. La boucle complète est la suivante : SET 1 AND SET 2 AND (SET 3 OR SET 4 OR SET 5). Cependant, des boucles partielles sont également utilisées pour une meilleure précision des recherches : SET 1 AND SET 2 AND SET 3 ; SET

1 AND SET 2 AND SET 4 ; SET 1 AND SET 2 AND SET 5. Un test préliminaire est effectué pour chaque boucle afin de réduire ou élargir le cadre de la recherche selon le nombre de résultats obtenus.

2.2.3. Moteurs de recherche utilisés

La revue bibliographique est effectuée en utilisant les boucles de mots-clés dans différents moteurs de recherche, dont les principaux sont Science Direct et Google Scholar. Web of Science et Web of Knowledge n'ont pas été utilisés car des recherches préliminaires ont montré un fort taux de recouvrement des résultats avec Science Direct et Google Scholar, ne justifiant ainsi pas l'abonnement onéreux nécessaire pour y faire des recherches approfondies.

Certains de ces moteurs de recherche donnant le plus souvent accès uniquement à de la littérature scientifique à comité de lecture (i.e. articles de journaux scientifiques, revues scientifiques, etc.), des recherches complémentaires sont réalisées afin de collecter des informations disponibles sur d'autres supports (rapports institutionnels, rapports d'étude, synthèses, guides, livres, thèses, actes de conférences et colloques, études réglementaires, etc.). Ces recherches couvrent notamment les sites internet des agences ou ministères pertinents, aux niveaux nationaux ou européens, ainsi que des instances internationales, et les documents issus d'universités ou instituts de recherche.

Le fond est apporté principalement par des articles scientifiques, ce qui peut engendrer un biais partiel dans la représentativité des informations collectées. Un effort complémentaire a été réalisé, en particulier concernant les impacts sur la biodiversité, pour inclure des informations issues de guides thématiques, dans la mesure du possible. Les données issues d'études d'impact n'ont pas été utilisées, étant trop spécifiques pour être synthétisées dans le présent livrable.

2.2.4. Exploitation de bases de données existantes

Afin de compléter la recherche de publications et articles spécifiques, plusieurs bases de données existantes ont été exploitées, en particulier la base de données Tethys, qui porte sur les impacts de l'éolien et des énergies marines sur la biodiversité.

2.3. Le fichier de reporting

2.3.1. Fichier de reporting et analyse bibliographique

Les études sélectionnées sont regroupées et caractérisées dans un fichier de *reporting*, transmis à l'ADEME. La base de données ainsi constituée est utilisée dans le projet pour les analyses consécutives, et consigne donc toutes les informations pertinentes sur les publications. La structure du fichier de *reporting* prend en compte les retours de l'ADEME et du comité d'experts, collectés suite à la réunion de lancement, et a été validée par l'ADEME. Elle est organisée de la façon suivante :

- Un onglet « Résumé » donnant des informations sur la nature du document et l'identification des sujets (type de technologie ; type d'impact) auxquels ils se rattachent, ainsi que le score de pertinence des publications biodiversité (cf. section 2.4.2) ;
 - Toutes les publications identifiées sont reportées dans cet onglet, y compris celles non analysées dans les onglets thématiques mais intégrées à l'analyse bibliométrique ;
- Trois onglets thématiques (pour chaque type d'impact biodiversité / sols / paysages) détaillant chaque document retenu pour la revue bibliographique :
 - Information sur la nature du document ;
 - Informations sur le contenu du document : périmètre géographique de l'étude, type d'énergie(s) étudiée(s), type(s) de sous-impact(s), étape(s) du cycle de vie couvert(s), contenu détaillé du document (description des objectifs, des résultats, des mécanismes en jeu et facteurs d'influence, des incertitudes, et de l'évaluation) ;
 - Informations spécifiques à chaque thématique :
 - Biodiversité : contexte biogéographique, cibles concernées, types d'impacts spécifiques traités ;
 - Sols : type de sols, types d'impacts spécifiques traités ;

- Paysages : type de paysages, types d'impacts spécifiques traités.

Ce type d'organisation des informations collectées permet une analyse rapide et efficace des informations recueillies, par exemple par technologie, par type d'impact, par type de sous-catégorie d'impact, etc.

2.3.2. Analyse bibliométrique

Le corpus de publication ainsi construit est exploité statistiquement afin de faire ressortir les sujets de recherche (impacts) les plus investigués et ceux qui le sont moins, l'évolution de la volumétrie de publications scientifiques et grises selon les sujets, les pays et les acteurs principaux de la recherche sur cette thématique, ainsi qu'une cartographie des auteurs les plus influents. A noter que sur un sujet donné, la volumétrie des publications peut ne pas être corrélée à la qualité et la pertinence des résultats présentés.

Un livrable dédié, le « Rapport d'analyse bibliométrique » fournit les résultats de l'analyse bibliométrique, réalisée dans un premier temps à partir des informations de l'onglet « Résumé » (comprenant également les publications écartées de l'analyse approfondie) puis sur les onglets thématiques. Quelques éléments de synthèse issus de ce livrable sont présentés en introduction du chapitre 10.

2.4. Sélection des publications pertinentes pour analyse

L'étude n'a pas pour objectif d'analyser de façon exhaustive l'ensemble de la littérature concernant les impacts des EnR sur la biodiversité, les sols et les paysages ; une telle approche aboutirait à des résultats portant sur un périmètre trop large, et rendrait plus difficile leur exploitation. Le protocole de recherche vise cependant à établir une cartographie des connaissances sur les impacts des EnR sur la biodiversité, les sols et les paysages (exhaustivité des impacts considérés dans le cadre de l'étude), à partir des résultats disponibles dans les publications. Cette cartographie doit permettre d'identifier, dès le début de la revue de littérature, les problématiques les plus traitées par la recherche, celles les moins traitées, et les manquements actuels. Cette approche basée sur le nombre de publications permet d'orienter les recherches complémentaires effectuées sur les deux dernières catégories, moins traitées. Elle ne reflète cependant pas la qualité des informations traitées dans les documents : d'autres recherches sont effectuées pour compléter l'analyse bibliographique détaillée, par la suite, et assurer au mieux l'exhaustivité des impacts considérés. L'ensemble de cette analyse est utilisé pour la rédaction de la feuille de route pour l'ADEME sur les actions à conduire pour combler ces manques.

Bien que l'approche privilégiée dans le cadre de l'étude ne se rattache pas à une méthodologie systématique existante, un certain nombre de principes similaires sont visés ; la transparence sur les recherches, par exemple, est ainsi un principe clé de notre approche. Cette transparence passe notamment par la publication du fichier de *reporting* et de l'approche méthodologique (dont les mots clés), ainsi que par la transparence relative aux critères de sélection identifiés au cours de l'étude, en lien avec la méthodologie mise en œuvre.

2.4.1. Critères d'éligibilité

La prise en compte des informations relevées dans les documents collectés est soumise à plusieurs critères d'éligibilité, avec pour objectif de s'assurer que chaque information recueillie est appropriée, pertinente et non obsolète. Ces critères d'éligibilité sont les suivants :

- Le titre ou l'abstract mentionne un impact et une énergie renouvelable couverts par l'étude ;
- Les informations correspondent au cadre de l'étude et entrent dans le périmètre défini dans la présente note méthodologique ;
- Les études sont réalisées dans des pays appartenant aux périmètres géographique et temporel définis dans la présente note méthodologique ;
- Les résultats sont démontrés : le détail des calculs, des données et des paramètres, ainsi que la méthodologie sont fournis ;

- Les résultats sont présentés dans des journaux reconnus ou dans des rapports présentés par des organisations ou des établissements reconnus sur les thèmes des énergies renouvelables, de la biodiversité, des sols ou des paysages.

Chacune des publications récupérées est analysée et sélectionnée (ou non) pour l'inclusion dans la revue de littérature sur la base de son adéquation avec le périmètre de l'étude et les critères d'éligibilité ainsi définis. Lorsqu'une publication n'est pas retenue, elle est conservée dans le fichier de *reporting* avec une explication de l'exclusion. Si en revanche, elle est conforme aux critères, elle est analysée pour la revue de littérature.

2.4.2. Scoring de pertinence des publications sur la biodiversité

En raison du nombre élevé de publications relatives aux impacts des énergies renouvelables sur la biodiversité, et du caractère parfois très technique ou au contraire très théorique de certaines études, un système de *scoring* supplémentaire aux critères d'éligibilité est appliqué pour la sélection des publications relatives à ce type d'impact en vue de l'analyse bibliographique. Le détail du système de *scoring* et le niveau d'analyse des publications sont présentés dans le Tableau 4.

A la suite d'une réunion avec le comité d'experts, l'équipe projet a étudié la possibilité de recouper ce système de *scoring* avec d'autres méthodologiques existantes et reconnues par la communauté scientifique internationale, afin d'assurer notamment une certaine comparabilité de la base de données avec d'autres bases existantes. L'étude n'ayant pas pour objectif de réaliser une revue de littérature exhaustive concernant les impacts des EnR sur la biodiversité, le système de *scoring* appliqué a pour objectif de centrer l'analyse sur les publications les plus pertinentes, tout en permettant d'identifier de potentiels manquements dans la littérature, par exemple concernant certains EnR ou sous-impacts. Ainsi, ce système de *scoring* permet de mieux couvrir des types d'énergies renouvelables peu couvertes, ou des thématiques de biodiversité peu couvertes pour des énergies déjà bien connues. A l'inverse pour certaines EnR et certaines thématiques, il n'y aura pas besoin de réaliser des analyses complémentaires.

Cette approche a été complétée par l'expertise de l'équipe projet, pour s'assurer que les publications pertinentes et faisant référence (à la connaissance des experts, de l'équipe projet ou citées comme telles dans d'autres ouvrages) ou apportant des éléments non identifiés par ailleurs soient bien prises en compte.

Remarque : le système de notation mis en œuvre ne vise pas à qualifier la qualité d'une étude ou d'une publication mais à faciliter l'identification des plus pertinentes dans le cadre de la présente étude. En conséquence, des études de grande qualité scientifique mais non pertinentes pour la présente étude peuvent avoir ainsi été mises de côté.

Seules les publications portant sur les impacts biodiversité sont ainsi scorées et potentiellement écartées de l'analyse détaillée menée dans le cadre de l'étude ; au contraire des impacts sur les sols et les paysages où toutes les publications pertinentes ont pu être analysées, en raison de la quantité « raisonnable » de documentation disponible.

Tableau 4 : Système de *scoring* – Publications portant sur les impacts biodiversité

Critères d'éligibilité		Scoring
Nature de la publication	Article scientifique publié dans revue scientifique de rang A à comité de lecture	3
	Article scientifique dans revue scientifique sans comité de lecture	2
	Littérature grise	1
Support	Revue scientifique ou d'institutions	3
	Articles scientifiques, rapports de recherche privée ou publique, thèses, conférences scientifiques, etc.	2
	Textes / documents réglementaires	1
	Autres supports (rapports d'étudiants, rapports de suivi de parcs, codes de bonnes pratiques, guide, résumé / acte de colloque, note de synthèse, etc.)	0

Contenu	Le document traite spécifiquement des liens entre un ou plusieurs types d'EnR (ou entre une EnR et une autre activité humaine - y compris énergies conventionnelles) et la biodiversité (étude à scope large : 1 groupe d'espèces ou plusieurs groupes d'espèces)	3
	Le document évoque, au sein d'une analyse globale, des informations précises sur les liens entre biodiversité et EnR (et potentiellement d'autres activités humaines) (étude à scope large : 1 groupe d'espèces ou plusieurs groupes d'espèces)	2
	Le document ne traite que d'une espèce donnée (en lien avec une EnR) <u>et</u> est peu généralisable	1
	Le document ne fournit que des informations très générales sur les liens entre EnR et la biodiversité, sans traitement spécifique	0
Contexte	L'étude se situe sur des installations d'EnR en France métropolitaine et / ou Outre-Mer	3
	La technologie, le contexte biogéographique et les espèces cibles sont similaires à celles que l'on trouve généralement en France	2
	La technologie, le contexte biogéographique et les espèces cibles sont peu similaires à celles que l'on trouve généralement en France (difficilement extrapolables)	0
Choix d'analyse des documents		Scoring
Analyse des documents	Analyse systématique de la publication	10 à 12
	Etude au cas par cas	6 à 9
	Document non analysé dans tous les cas	1 à 5

3. Impacts de l'énergie solaire

Ce chapitre présente une synthèse des impacts de l'énergie solaire sur la biodiversité, les sols et les paysages identifiés lors de l'analyse bibliographique. Une attention particulière a été portée à la prise en compte du contexte géographique, temporel et institutionnel. Les résultats qualitatifs et quantitatifs sont mis en avant autant que possible, tout comme les méthodes d'évaluation de ces impacts et l'identification des points de divergence et de convergence entre publications.

Les technologies de production d'énergie solaire étudiées incluent le solaire photovoltaïque et thermique (basse température), sur toiture et au sol. La filière solaire thermodynamique à concentration n'est pas incluse dans le cadre de cette étude.

Les **technologies solaires photovoltaïques** permettent de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Plusieurs types de technologies de cellules PV existent. Les cellules de première génération représentent la majorité du marché PV, elles sont basées sur des **technologies en silicium cristallin** (silicium polycristallin et monocristallin représentent respectivement pour 60 % et 38 % de la filière silicium). Les cellules peuvent se différencier aussi en fonction du type de jonction (types p ou n). Les cellules de seconde génération (dites **technologies sur couches minces**) sont constituées de matériaux semi-conducteurs reposant sur un support (verre, acier, plastique, etc.). Outre le silicium amorphe utilisé historiquement, les principaux matériaux utilisés actuellement par ces filières sont le tellure de cadmium (CdTe), l'alliage de cuivre indium gallium sélénium (CIGS) ou l'arséniure de gallium (Ga-As). Les cellules de troisième génération se composent de cellules à concentration et de cellules organiques, non incluses dans le cadre de cette étude.

Les **technologies solaires thermiques** sont utilisées pour la production d'énergie calorifique (chaleur et froid), et dans certains cas d'électricité. Trois types de technologies permettent l'exploitation de l'énergie solaire thermique : la technologie dite active (sites à basse et moyenne températures) requérant des capteurs solaires thermiques afin de recueillir l'énergie solaire, la technologie dite passive ne nécessitant pas de capteurs solaires et se basant sur l'emploi de matériaux spéciaux et la technologie solaire thermodynamique ou concentrée (hors périmètre de cette étude). Différents capteurs solaires peuvent être utilisés : capteurs plans non-vitrés ou vitrés, capteurs à tube sous vide. Enfin, les types de panneaux et le système de raccordement varient en fonction de la nature du fluide caloporteur transportant la chaleur (eau, mono-propylène glycol, air, etc.).

Les cellules solaires photovoltaïques et thermiques sont protégées, souvent par une plaque en verre en face avant et un film en matériau polymère en face arrière.

Différents **types d'installation** existent : les panneaux peuvent être posés au sol et soutenus grâce à des fondations au sol sur des châssis en bois ou en métal ; ou installés sur des bâtiments existants, on parle alors de solaire sur bâti (en surimposition de toiture, ou intégré comme élément de toiture). Dans le cas d'installations au sol, les parcs solaires sont privilégiés sur d'anciennes friches et/ou des terrains relativement plats. Les alignements de panneaux au sol peuvent être fixes (orientation Sud de préférence) ou mobiles, alors équipés de suiveurs (*trackers* en anglais) à rotation mono-axiale ou bi-axiale pour un rendement optimisé. Les installations peuvent être raccordées au réseau électrique (pour des grands parcs, en mutualisant certains composants comme les onduleurs) ou fonctionner en site isolé.

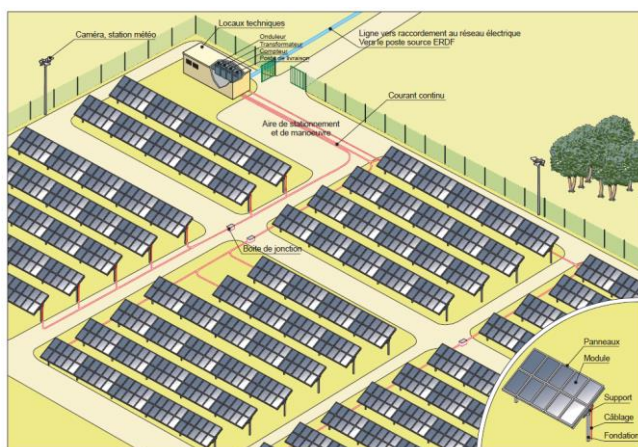


Figure 1 : Schéma de principe des installations de type photovoltaïque au sol (à gauche) (MEDDE, 2010) et sur bâti en surimposition (à droite) (othermie.fr)

Il convient par ailleurs de noter qu'un programme de recherche et de valorisation de connaissances est en cours de finalisation dans le contexte méditerranéen français : le projet PIESO (Processus d'Intégration Écologique de l'Énergie Solaire). Ce projet, financé par l'ADEME, a pour partenaires le bureau d'études en environnement naturel ECO-MED, coordonnateur du projet, un centre de recherche en écologie, l'IMBE (Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Ecologie marine et continentale), et QUADRAN, société de développement et d'exploitation d'installation EnR. Ce projet, lancé en 2015, a pour objectifs⁵⁰ :

- De proposer une typologie des impacts et des mesures d'intégration écologique de la filière solaire ;
- D'aborder les aspects d'évaluation de l'impact des mesures d'intégration écologique en y associant des propositions de protocoles ;
- De tester la mise en œuvre de mesures types mises en œuvre sur une dizaine de sites et leurs conséquences à court terme (2 ans) ;
- De construire un système d'aide à la décision pour l'intégration écologique de la filière solaire et une boîte à outils pour en évaluer le succès (indicateurs).

Ce programme est en phase de finalisation, avec la publication d'un guide opérationnel de synthèse, de retours d'expérience envisagée en 2019. Unique à ce jour en France, il devrait permettre d'apporter d'enrichir les connaissances sur les impacts du solaire au sol, en particulière du solaire photovoltaïque en domaine méditerranéen français.

3.1. Impacts de l'énergie solaire sur la biodiversité

Les parcs de production d'énergie solaire au sol peuvent affecter les écosystèmes au sein desquels ils s'inscrivent, à travers de nombreux types d'interactions (Smith, et al., 2016; Gibson, et al., 2017; Hastik, et al., 2015), notamment les remaniements puis le recouvrement partiel du sol, les changements microclimatiques et les modifications de comportements de différentes espèces d'animaux. Ces enjeux sont principalement identifiés lors des phases de construction, opération et démantèlement (Lovich, et al., 2011)

Bien qu'il s'agisse d'une technologie largement développée dans le monde, les impacts sur les milieux naturels, la faune et la flore de l'énergie solaire au sol ne sont, à l'heure actuelle, pas parfaitement bien appréhendés (Gibson, et al., 2017; Gasparatos, et al., 2017). Certains des effets sur la biodiversité demeurent insuffisamment étudiés et constituent des hypothèses encore peu soutenues par des travaux évalués par les pairs, notamment sur les aspects de perturbation comportementale (Northrup, et al., 2013). Plusieurs auteurs suggèrent cependant que, parmi les sources de production d'énergie, l'énergie solaire peut s'avérer relativement bénigne pour l'environnement si les installations sont dimensionnées, développées et gérées de façon appropriée (Gibson, et al., 2017).

Les impacts environnementaux des installations de production d'énergie solaire au sol font l'objet de plus d'attention (études d'impacts, autres études scientifiques, etc.), sont plus suivis que les impacts relatifs aux installations sur toiture et ont fait l'objet d'un certain nombre de synthèses et de guides. La littérature fournit principalement des informations sur le solaire photovoltaïque au sol (Gasparatos, et al., 2017; Hastik, et al., 2015; Hernandez, et al., 2014; Lovich, et al., 2011). La littérature analysée ne s'attache pas spécifiquement à l'énergie solaire thermique au sol et ne fournit pas de données particulières à cette technologie quant aux impacts sur la biodiversité. Enfin, les préoccupations environnementales du solaire sur toiture (photovoltaïque ou thermique) sont considérées comme très faibles (Hastik, et al., 2015). Une quarantaine de publications a été rassemblée mentionnant des impacts de l'énergie solaire au sol sur la biodiversité, les milieux naturels, la faune et la flore. Concernant la biodiversité, le solaire sur toiture n'est pas considéré comme un enjeu prioritaire, et n'est pas traité spécifiquement dans la suite de cette partie : en effet, au-delà des considérations générales d'extraction nécessaires à la fabrication des panneaux, puis les aspects de transport et de traitement en fin de vie des panneaux, les phase d'installation, d'exploitation et de démantèlement n'ont qu'un impact négligeable sur la biodiversité lorsque les panneaux sont installés sur des bâtiments existants.

⁵⁰ <http://www.pieso.fr/>

Le guide de référence de 2011 « Installations photovoltaïques au sol, Guide de l'étude d'impact » a été porté par le Ministère de l'Environnement (MEDDTL, 2011). Il développe notamment des critères à considérer ainsi que des éléments de cadrage qui permettent au porteur de projet de soulever certains enjeux avant la réalisation des études, pendant les phases en amont du projet. Il détaille également les données à recueillir et les organismes à consulter, ainsi que les thématiques à aborder dans l'étude d'impact. Des guides départementaux sont peu à peu déclinés et permettent d'appréhender plus spécifiquement les caractéristiques locales des territoires et des paysages, au-delà des enjeux relatifs à la biodiversité.

3.1.1. Destruction / altération des habitats, modifications des milieux

Comme toute infrastructure, la construction d'une installation solaire photovoltaïque ou thermique au sol nécessite des travaux de terrassement, nivellement et de voirie. 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 (Visser, 2016). Le développement des infrastructures de captages de l'énergie solaire nécessite en effet des surfaces importantes de terres, modifiant et fragmentant parallèlement les habitats naturels et semi-naturels.

Néanmoins, en fonction du choix du site, de l'occupation historique ou précédente, de l'orientation générale de ce dernier (orientation la plus favorable face au soleil) et de son aménagement, ces travaux peuvent être peu à très impactant (Hastik, et al., 2015). Compte tenu de la souplesse des structures porteuses et des choix d'implantation, les mesures d'évitement et de réduction d'impact peuvent être très efficaces. Comme pour tous les projets d'aménagement d'installation EnR, la planification (le choix du site) et le *micro-siting* (design du projet) sont les meilleurs moyens de limiter les impacts.

La pose ne nécessite généralement pas de travaux lourds de génie civil, cependant les emprises cumulées à l'échelle d'un parc solaire au sol peuvent ne pas être négligeables au regard du nombre important et de la densité des panneaux, auxquels s'ajoutent le raccordement interne ainsi que les accès. Les fondations, du fait d'une faible prise au vent, peuvent être remplacées par des pieux enfoncés ou des lests constitués par des socles de béton posés à même le sol ; ces caractéristiques d'installation favorisent, dans la majorité des cas, la réversibilité des impacts à l'issue de la fin d'exploitation, une fois le parc démantelé (Miquel, 2009).

Les infrastructures de captage de l'énergie solaire et, en particulier, les fermes solaires de capacité industrielle occupent des étendues de plus en plus vastes, mais leur conception, leur empreinte et leur efficacité peuvent varier considérablement (Hernandez, et al., 2014). 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 entre 1,5 et 2,5 fois la surface des panneaux eux-mêmes (Gasparatos, et al., 2017; Turney, et al., 2011).

Les opérations de travaux sont multiples : construction de terrasses, de fondations, élargissement ou création d'accès, circuit d'entretien entre les lignes de panneaux, réseaux électriques enterrés, poste électrique, clôtures périphériques, éléments et zones de stockage, aménagements paysagers. Dans certains types de milieux humides, des effets de drainage sont également possibles. Les effets peuvent perdurer durant plusieurs années après la construction.

Comme tous travaux d'aménagement, la construction de centrales solaires au sol et les activités de préparation des sols associées, peuvent engendrer des impacts directs et indirects sur la faune. Ces impacts se caractérisent par la destruction ou l'altération d'habitats naturels ou semi-naturels supports ou nécessaires au bon accomplissement de son cycle biologique (notamment par la suppression des strates arborées et herbacées, décapage de terre végétale, ou simple modification de la couverture végétale par ombrage de la couverture des panneaux, colmatage par l'érosion ou émanation de poussière, etc.). L'impact physique et visuel du site et du périmètre clôturé à l'intérieur du territoire d'une espèce animale donnée est aussi à prendre en compte et à mettre en lien avec les effets cumulés des aménagements sur les corridors écologiques des espèces et plus largement sur la Trame Verte et Bleue⁵¹.

⁵¹ <http://www.trameverteetbleue.fr/> - La Trame verte et bleue est un réseau formé de continuités écologiques terrestres et aquatiques identifiées par les schémas régionaux de cohérence écologique ainsi que par les documents de planification de l'État, des collectivités territoriales et de leurs groupements. La Trame verte et bleue contribue à l'amélioration de l'état de conservation des habitats naturels et des espèces et au bon état écologique des masses d'eau.

Les effets des travaux des installations solaires photovoltaïque et thermique au sol sur les végétations et habitats sont assez peu documentés mais il est possible de se référer à d'autres guides traitant de ce sujet sur tout type de travaux d'aménagement. Les différentes documentations (Lovich, et al., 2011; Turney, et al., 2011; Katzner, et al., 2013) abordent de façon générale les effets directs et indirects sur la biodiversité : des terrassements, de la non protection et du tassement des sols et des végétations, d'utilisation d'engins inadaptés, des phénomènes d'érosion et des risques liés aux espèces invasives.

Concernant les conséquences de l'ombrage des panneaux, la section 3.2 relative aux impacts sur les sols détaille les études portant sur les effets de l'ombrage des panneaux sur la température et les caractéristiques pédologiques du sol, qui ont des effets directs sur le développement de la végétation. Les conséquences sur la faune et la flore sont encore relativement peu documentées. Le projet PIESO (Processus d'Intégration Écologique de l'Énergie Solaire), financé depuis 2015 par l'ADEME, vise à tester des protocoles d'évaluation *in situ* des effets en phase d'exploitation sur les communautés végétales, les populations d'espèces végétales patrimoniales, les orthoptères, les rhopalocères (lépidoptères), les oiseaux et les reptiles. Ces expérimentations se déroulent sur 5 sites photovoltaïques dans l'Aude et le Gard. Le développement de la végétation (richesse spécifique et recouvrement), sous les panneaux et en dehors des panneaux, est spécifiquement testé dans le cadre de ce programme, dont les résultats seront publiés en 2019.

Perez et al. (2013) ont testé sur deux parcs solaires espagnols les taux de croissance et de mortalité de 8 espèces d'arbustes et arbres méditerranéens plantés en haie à proximité des rangs de panneaux solaires et en condition d'ombrage sous les panneaux. Leurs résultats indiquent des taux de survie variables selon la localisation et les espèces. Les taux de survie, pour une même espèce de plante, sont nettement supérieurs lorsque les plants sont situés en limite de panneaux (dans ce contexte, 3 espèces sur 6 présentent des taux de survie des plants supérieurs à 95 %, notamment l'Olivier) tandis qu'en condition d'ombrage, seules deux espèces parmi les 8 plantées présentent des taux de survie supérieurs à 50 % (dont *Phillyrea angustifolia* à presque 100 %). Par ailleurs, quelle que soit la localisation, les espèces du genre *Quercus* ont présenté des taux de survie faibles (inférieurs à 30 %). Ces résultats ne sont pas généralisables, et ne peuvent être extrapolés qu'aux mêmes espèces dans des contextes similaires. Cette étude indique des réactions parfois très différentes entre espèces natives à la modification des conditions d'ensoleillement notamment.

Les effets de la construction d'une installation photovoltaïque ou thermique au sol sur la biodiversité sont fortement associés aux contraintes et sensibilités écologiques du site d'implantation (Hernandez, et al., 2014). Ils sont difficilement généralisables. Les effets de seuil jouent aussi de façon importante que ce soit dans la dimension du projet ou par effets cumulés d'aménagement sur un même domaine vital d'une population d'espèce ou d'un cortège d'espèces.

Comme pour tout aménagement, avec les altérations ou destructions localisées de milieux, des impacts sur tous les groupes faunistiques sont possibles (invertébrés et vertébrés).

Les aspects relatifs aux destructions localisées et dégradations de milieux lors de travaux de construction sont bien renseignés dans les documents concernant l'énergie solaire photovoltaïque au sol. Les impacts réels sont très variables selon les sites (contexte environnemental) et les projets (emprises nécessaires, modalités d'installation). Les effets de l'ombrage des panneaux sur les milieux en place sont également abordés, avec des travaux en cours visant à mieux comprendre les conséquences sur le développement de la flore et les activités de la faune. Les impacts sur le long terme dépendent également beaucoup des mesures de gestion mises en œuvre (fauche différenciée, fauche tardive, pâturage, etc.). La littérature analysée ne fournit pas de synthèse ou d'analyse comparative des effets de choix techniques (espacement des rangs) et très peu de retours sur les effets à moyen terme de la gestion des milieux. En France, le projet PIESO, en cours de finalisation, devrait permettre de constituer une base de retours d'expérience et recommandations intéressante.

3.1.2. Dérangement des individus et altération des activités

Destruction / altération d'individus d'espèces animales et végétales, dérangement des individus et modification des activités en phase de travaux

En phase de travaux, la présence des engins, les bruits de travaux et les destructions / altérations des habitats peuvent engendrer des perturbations des activités des espèces faunistiques présentes, d'autant plus s'ils sont proches de zones de repos ou quiétude. Il est généralement admis que les

travaux de démantèlement présentent des caractéristiques similaires (bruits, présence d'engins, mouvements) (Tsoutsos, et al., 2005).

La qualification et la quantification des impacts en phase de construction sont complexes à étudier : la durée courte de suivi du chantier ne permet pas de gommer les variations interannuelles, et il est difficile d'isoler individuellement les facteurs d'influence. Néanmoins, la formation des conducteurs d'engins, la sensibilisation des équipes de chantier, la responsabilisation du chef de chantier, la désignation d'un coordinateur environnemental et la présence régulière d'écologues permettent de traiter au cas par cas un grand nombre de situations à risque et ainsi limiter les effets du chantier sur la biodiversité.

Les perturbations d'individus et altérations d'activités en phase travaux ne sont pas spécifiques aux installations de production d'énergie solaire au sol. Ces aspects sont classiquement bien pris en compte dans les études d'impacts (et mesures associées).

Dérangement des individus et modification des activités en phase d'exploitation

La perte ou l'altération d'habitats induites par la phase de construction peuvent perdurer et maintenir, à moyen terme, une perte d'habitat (Katzner, et al., 2013).

En phase d'exploitation, les réactions d'éloignement des abords des installations par les oiseaux peuvent engendrer des pertes d'habitats définitives (Hernandez, et al., 2014). Par exemple, sans que ce soit un retour d'expérience consolidé, le suivi sur 7 ans d'un parc photovoltaïque au sol à proximité d'Aix-en-Provence a montré que le couple d'Aigle de Bonelli historiquement présent sur l'aire d'étude, exploitant toujours le territoire et les vignes avoisinantes de façon régulière, n'est pas revenu chasser dans le périmètre clôturé une fois l'implantation effectuée. En revanche, les autres espèces du cortège des milieux ouverts (garrigues et plaines agricoles méditerranéennes), rapaces compris, exploitent toujours le site (Biotope, 2017).

Par ailleurs, le guide méthodologique national (MEDDTL, 2011) évoque les effets liés aux éventuels courants thermiques créés par les installations de grande taille sur l'activité des oiseaux.

Les effets sur les déplacements peuvent présenter plusieurs niveaux d'intensité, mais se traduisent généralement par une réduction plus ou moins forte du territoire de chasse et des activités à proximité et dans le site, notamment du fait de la présence d'une clôture en périphérie (qui peut notamment constituer une barrière pour les grands animaux mais est généralement perméable aux reptiles et à la majorité des petits mammifères). Concernant la faune volante, notamment les oiseaux, les perturbations peuvent concerner les activités de stationnement, d'alimentation, de chasse, de nidification ainsi que les activités de vol (au-delà de la présence physique, les panneaux solaires pouvant être considérés, vus du ciel, comme une surface artificielle homogène étendue, parfois assimilée à une surface en eau). La multiplicité de ce type d'aménagements fragmente les habitats et constitue un obstacle au déplacement des espèces terrestres, perturbe les stratégies des prédateurs et affecte les zones de refuge et la disponibilité en nourriture (Hernandez, et al., 2014).

Dans le cadre du programme PIESO, deux protocoles spécifiques sont mis en place pour tester la perméabilité écologique des centrales photovoltaïques – l'un portant sur l'effet local des clôtures (orthoptères) et l'autre concernant les continuités écologiques à plus grande échelle (rhopalocères). Les résultats de ce programme seront rendus publics en 2019.

Les effets de la présence d'un parc photovoltaïque au sol sur la distribution, la densité, les activités des oiseaux et les effets d'accoutumance sont encore peu étudiés et dépendent principalement de la spécificité du site (Smith, et al., 2016; Hernandez, et al., 2014). Certaines espèces de passereaux pourraient subir des réductions de densité à proximité, mais ces effets sont souvent délicats à étudier (Visser, 2016). Les effets de déplacement ne sont pas observés sur tous les parcs ; (Montag, et al., 2016). Cela met au contraire en évidence une augmentation de la diversité et de l'abondance d'oiseaux au sein d'un parc solaire au Royaume-Uni, en comparaison de sites témoins.

Il existe peu de bibliographie décrivant le site d'implantation des installations comme étant un refuge possible pour la petite faune. Cela pourrait être le cas pour les « espèces à terrier ». Les retours d'expérience sur certaines espèces d'oiseaux nichant au sol (BSG Ecology, 2014) sont plus fournis sans pour autant être consolidés par des protocoles scientifiques. Les suivis au sein d'installations photovoltaïques allemandes révèlent que de nombreuses espèces d'oiseaux peuvent utiliser les zones entre les modules et les bordures d'installations photovoltaïques au sol comme terrain de chasse, d'alimentation ou de nidification.

Peschel (2010) indique sur des parcs suivis en Allemagne que les mesures d'entretien et de conservation régulières, exécutées pendant la construction et la phase d'exploitation, garantissent la conservation de landes à haute valeur naturelle. Montag (2016) montre sur le suivi de 11 parcs en Grande-Bretagne réalisé entre 2013-2015, que l'entretien et la gestion de la végétation sous et entre les panneaux peuvent avoir des effets plus significatifs que l'aménagement en tant que tel ; et pour cette étude, des effets bénéfiques sur les effectifs floristique, entomologique et avifaunistique ont été démontrés. En effet, la fauche ou le pâturage des prairies ont permis une augmentation des effectifs pour ces trois groupes sans pour autant avoir d'effet notable sur la diversité des espèces. En revanche, l'activité des chauves-souris a baissé. L'hypothèse avancée est la difficulté des chauves-souris à discerner les surfaces artificielles lisses.

S'attacher à prendre en compte l'influence de la gestion des milieux sur la qualité écologique des milieux est fondamental à l'intégration environnementale des parcs solaires au sol, dont les emprises peuvent être conséquentes. Les démarches en cours visent notamment à identifier des pratiques favorables à la biodiversité et adaptées aux contextes propres à chaque installation. Le programme PIESO aborde également, dans le contexte méditerranéen français, l'influence de pratiques de gestion de la végétation.

La présence d'installations de production d'énergie solaire au sol peut engendrer des déplacements d'espèces sensibles à la présence des panneaux ou à la modification de leur habitat, mais les réactions sont très variables selon les espèces (pour les oiseaux notamment, certaines espèces ne sont pas sensibles) et selon les écosystèmes remplacés. La gestion des milieux au sein des parcs solaires au sol peut modifier localement l'utilisation qui en est faite par certaines espèces animales (perte d'intérêt ou au contraire accroissement des capacités d'accueil).

3.1.3. Blessures et mortalité d'individus

En phase de travaux

Les travaux de terrassement et les travaux sur la végétation peuvent engendrer des destructions directes d'individus d'espèces. En période de nidification, les oiseaux nichant au sol sont particulièrement sensibles, les impacts allant jusqu'à l'abandon du nid et l'échec de la reproduction. Par ailleurs, les risques de destruction d'individus en phase de travaux sont plus importants sur les espèces pionnières, notamment les amphibiens, ou les espèces comme les œdicnèmes ou les gravelots, qui apprécient les surfaces nues des chantiers. En cas de travaux impactant des vieilles haies ou des boisements, des risques de destruction de gîtes de chiroptères existent.

En phase d'exploitation

À ce jour, il existe peu de données sur la mortalité des installations solaires sur les oiseaux⁵² et les chiroptères. Les techniques d'estimation de la mortalité aviaire ne sont pas spécifiques au solaire. Elles ont été développées pour d'autres sources de mortalité aviaire (éolien notamment). Il existe actuellement 2 types de mortalité connus (Visser, 2016; Leroy, et al., 2016) : (1) la mortalité directe causée par collision ; ce type de mortalité est documenté sur tout type de technologie et (2) la mortalité liée aux flux thermiques ou à la chaleur générés par les centrales à concentration (non traitées dans le cadre de cette étude) (McCrary, 1986 cité dans BSG Ecology (2014)). Les taux de mortalité varient considérablement en fonction des contextes, des configurations des sites et des types de technologies utilisées (Kagan, et al., 2014). Les auteurs sont peu explicites sur ce point, essentiellement car les sites étudiés sont trop peu nombreux, la mortalité induite par les centrales solaires classiques ne constituant pas un point d'attention particulier. Les principales données concernant la mortalité proviennent de centrales à concentration, hors du champ de cette étude, qui génèrent des taux nettement plus importants, estimés aux Etats-Unis entre 2,8 et 9,9 cas de mortalité d'oiseaux/MW/an (Leroy, et al., 2016).

Les blessures et mortalité pouvant être associées à la présence de parcs solaires au sol sont peu abordés dans la littérature et ne constituent pas a priori un enjeu particulier pour les types de centrales solaires traités dans le cadre de cette étude. Les rares documents abordant ces

⁵² McCrary cité dans Leroy et Leroy 2017

aspects le font de façon théorique ou bien sont basés sur des situations non comparables au cas français (milieux désertiques aux Etats-Unis d'Amérique).

3.1.4. Modifications des paramètres écologiques des habitats naturels

Outre les altérations localisées comme la pollution des sols et de l'eau qui sont traitées dans la section 3.2 relative aux impacts sur les sols, les modifications microclimatiques et les champs électromagnétiques peuvent engendrer des modifications des paramètres écologiques du site et des habitats naturels et semi-naturels.

Pollution des sols et de l'eau et changements physico-chimiques

A noter que les impacts relatifs à la pollution chimique des sols sont détaillés en section 3.2.3.

Les travaux de construction ainsi que les opérations de maintenance des structures sont susceptibles d'engendrer une pollution des sols et des risques de contamination des organismes et de la chaîne trophique (fuites d'huile, anti-poussières et autres contaminants chimiques). Toutefois, ces risques ne sont pas spécifiques aux EnR : ils sont globalement bien appréhendés et les solutions sont connues des opérateurs.

Afin de maintenir l'efficacité des panneaux solaires, les terrains sous-jacents peuvent être traités avec des herbicides, en plus des produits utilisés pour l'entretien des panneaux solaires (Hernandez, et al., 2014). L'importance de l'utilisation de tels produits ne fait néanmoins pas l'objet de synthèse identifiée lors de l'analyse bibliographique ; les effets potentiels sont nécessairement à rattacher aux usages faits de ces produits, dans le contexte particulier français. L'utilisation de suppresseurs de poussière peut augmenter le ruissellement (Grippio, et al., 2014).

Enfin, la phase d'extraction des matériaux utilisés dans les panneaux peut avoir un impact non négligeable sur la pollution des sols et de l'eau. Ces impacts ne sont cependant pas étudiés dans le cadre spécifique de structures EnR, ainsi qu'expliqué en section 3.2.3.

Modification des microclimats locaux et de la lumière

Le guide méthodologique national (MEDDTL, 2011) évoque également, sans plus de détail, des effets potentiels liés à la modification du microclimat sous les modules en raison des effets de recouvrement, et au-dessus des modules par le dégagement de chaleur. Voir également la section 3.2.2 pour plus de détails. La lumière polarisée générée par la réflexion sur les surfaces peut aussi perturber la faune volante (Horváth, et al., 2010). Certains insectes (abeilles, bourdons, etc.) ont l'aptitude de percevoir la lumière polarisée dans le ciel et de se guider sur elle. Horváth va plus loin en affirmant que les panneaux solaires sont une nouvelle source de pollution lumineuse polarisée et un piège pour les éphémères, les trichoptères (ordres d'insectes), les dolichopodidés et les tabanidés (familles d'insectes diptères). Il précise enfin que la conception du panneau avec une grille apparente et contrastée et des cloisons blanches qui ne renvoient donc pas la lumière polarisée suffirait à limiter fortement l'attrait sur les insectes. L'étude d'Horváth (2010) constitue une étude très spécifique sur un sujet par ailleurs peu abordé dans la littérature.

En outre, l'éclat lumineux des installations attire les insectes, puis des oiseaux prédateurs qui peuvent avoir des comportements à risque ou soumis à des prédateurs supérieurs, ce qui pourrait transformer l'installation en piège écologique (Kagan, et al., 2014).

Les parcs photovoltaïques ou thermiques peuvent affecter les microclimats locaux (Turney, et al., 2011). 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 (Gasparatos, et al., 2017). Les travaux sur les effets microclimatiques sont encore rares (Gasparatos, et al., 2017) et des améliorations notamment pour créer des flux d'air plus importants sont déjà expérimentées sur certains parcs en France. Des éléments spécifiques aux effets sur les sols (sous les panneaux et à proximité) sont fournis en section 3.2.2.

Effet des champs électromagnétiques

Les champs électriques et magnétiques, qui ne concernent que le solaire photovoltaïque et pas le solaire thermique, sont émis au niveau des câbles de transport d'électricité entre les unités de production et le poste électrique, ainsi que vers le poste de raccordement. Les champs électromagnétiques produits par un parc photovoltaïque sont sensiblement identiques à ceux émis par les lignes de moyenne ou de basse tension. Étant donné que les postes électriques sont confinés dans des bâtiments et que les lignes électriques de raccordement sont enterrées, les champs électromagnétiques produits restent très faibles et localisés entre 1 et 10 mG, soit ceux émis par les lignes de distribution des villages (pour comparaison, un champ magnétique naturel alternatif se situe autour de 0,13 à 0,17 mG, le champ magnétique mesuré sous une ligne à haute tension à pleine charge est de 300 mG, le champ magnétique terrestre est de l'ordre de 470 mG en France métropolitaine). Le champ magnétique diminue avec la tension et le courant, également en fonction de la distance.

L'installation et la présence de centrales de production d'énergie solaire au sol peuvent être à l'origine d'apports de produits chimiques (variables selon les sites et les pratiques), d'une modification des microclimats locaux (effets assez mal étudiés) ainsi que d'apports localisés de champs électromagnétiques (de faible ampleur au sein des parcs solaires photovoltaïques).

3.2. Impacts de l'énergie solaire sur les sols

La production d'énergie solaire requiert des infrastructures distinctes selon le type de technologie utilisée (thermique ou photovoltaïque) et les aménagements requis pour chaque installation solaire sont spécifiques à chaque projet. Ainsi, les infrastructures peuvent être raccordées au réseau électrique ou de chaleur local ou fonctionner en site isolé ; les panneaux peuvent être implantés sur des bâtiments ou au sol ; etc. Dans le cas du photovoltaïque / thermique au sol, les alignements de panneaux peuvent être fixes, mobiles ou orientables. Les enjeux et les impacts attendus sur les sols peuvent par conséquent être différents.

Les impacts sur les sols identifiés au travers de la revue bibliographique couvrent dans leur grande majorité la phase d'exploitation de la structure, ainsi que d'installation et démantèlement.

Les impacts du solaire au sol sont les plus traités dans la littérature, en comparaison du solaire sur bâti. Ils font l'objet d'une analyse plus poussée dans cette section : les informations présentées se focalisent plus sur les impacts observés dans les zones peu voire non urbanisées, en dehors des systèmes greffés au bâti. La mise en place de solaire sur bâti existant profite d'installations déjà présentes ; de la même façon que pour la biodiversité, les enjeux sur les sols associés à l'aménagement et l'exploitation des structures peuvent être considérés négligeables en comparaison de ceux relatifs à l'énergie solaire au sol.

Dans le corpus de littérature analysé, les impacts relatifs aux installations solaires photovoltaïques sont les plus étudiés en comparaison du solaire thermique. Malgré les recherches complémentaires effectuées par l'équipe projet, seules cinq publications relatives au solaire thermique ont été incluses dans la présente analyse. Parmi les impacts identifiés, certains sont indépendants du type de panneau solaire (par exemple, emprise sur les sols analogue pour un panneau photovoltaïque ou thermique au sol) ; les résultats sont alors applicables au solaire photovoltaïque comme thermique. Dans d'autres cas, notamment du fait du raccordement au réseau de chaleur ou de l'extraction de matériaux utilisés dans les panneaux, les impacts sur les sols peuvent différer. Les différents cas de figure sont indiqués pour éviter toute généralisation des impacts sur les sols à des technologies non applicables.

A noter que la typologie des sols n'est en général pas mentionnée dans les publications, et peut seulement être déduite des informations fournies concernant les milieux étudiés.

3.2.1. Impacts en termes de surfaces de sols

Les impacts en termes de surfaces de sols sont parmi les plus mentionnés et illustrés dans la littérature sur le solaire. L'occupation des sols – en termes de surface occupée – est bien connue, bien que les résultats puissent différer selon les projets. À l'inverse, les questions d'artificialisation des sols et de co-usage sont mentionnées mais aucune évaluation de ces impacts n'a été identifiée à date dans le corpus. Dans l'ensemble, il n'existe pas de consensus sur le vocabulaire, les définitions, les méthodes d'évaluation et leur mise en pratique ; les limites et incertitudes relatives aux méthodes et aux mesures

restent peu connues et les éléments de contexte sont rarement indiqués. Une lecture critique de ces résultats reste donc nécessaire pour conclure sur leur répliquabilité. A noter que les étapes liées à la fabrication des panneaux, ainsi qu'au démantèlement et à la fin de vie des centrales sont très peu couvertes dans la littérature.

Les impacts relatifs à l'**occupation des sols** concernent principalement les infrastructures de production d'énergie solaire (photovoltaïque ou thermique) au sol. Dans le cas du solaire sur bâti existant, les panneaux sont installés en toiture ou en façade, et profitent donc de surfaces déjà occupées. L'occupation des sols se limite alors aux potentiels locaux techniques et systèmes de raccordements associés, communs à toute infrastructure de production d'énergie. La comparaison entre le solaire sur bâti existant et au sol est étudiée dans plusieurs publications, pour le cas de l'énergie photovoltaïque (Pointereau, et al., 2009).

L'intensité d'occupation des sols, dans le cas d'une centrale solaire au sol, est déterminée par les infrastructures installées pour l'exploitation de la centrale. Il s'agit principalement de l'emprise relative aux panneaux photovoltaïques ou thermiques et, dans une moindre mesure, aux câbles de raccordement, aux locaux techniques, aux voies d'accès et aux zones de stockage (MEDDTL, 2011). Au niveau national, le scénario Négawatt estime ainsi que les panneaux photovoltaïques au sol en France pourraient représenter environ 900 km² (soit 90 000 ha) en 2050, pour une puissance associée de 80 GW.⁵³ A noter que le besoin d'espace pour la mise en place d'installations photovoltaïques reste relativement faible en comparaison à la surface agricole annuellement artificialisée, estimée à 66 000 ha/an (Pointereau, 2008). Dans le scénario ADEME de mix énergétique 100 % renouvelable en France, il est estimé que les grandes centrales solaires au sol pourraient représenter 500 km² (soit 50 000 ha) sur un total 18 500 km² (soit 1,85 Mha) de surfaces occupées au sol par des installations EnR (ADEME, et al., 2015).

A noter que les publications sur le solaire au sol font principalement référence à une technologie photovoltaïque. Les puissances ramenées à une unité de surface étant différentes entre les technologies solaires photovoltaïque et thermique, les résultats présentés dans le cas du photovoltaïque au sol ne sont pas applicables à l'énergie thermique au sol, l'énergie produite est variable d'une technologie à l'autre.

Deux types de surfaces peuvent être évalués dans les publications : la surface directement couverte par les structures captant l'énergie solaire ou la surface totale d'une installation. Cependant, il est rarement indiqué dans les publications ce que recouvre réellement la surface étudiée, ni la façon dont cette surface est estimée, limitant ainsi toute comparaison entre projets.

Les résultats relatifs à l'emprise sur les sols peuvent être ramenés à une unité de puissance ou de production d'électricité solaire. Dans le cas d'une installation photovoltaïque au sol, l'emprise au sol est évaluée entre 1 et 3 ha/MW selon les sources : 1 ha/MW (10 km²/GW) installé (Hong, et al., 2013), 1,12 ha/MW (estimation à partir des valeurs publiées dans le scénario Négawatt), ou entre 2 à 3 ha par MW d'après le guide de l'étude d'impact des installations photovoltaïques au sol du Ministère (MEDDTL, 2011). Concernant le solaire thermique, l'emprise au sol est de 0,2 à 0,5 ha/MW thermique, soit 700 W thermique/m². La technologie employée (fixe *versus tracker*) et l'ensoleillement jouant sur les rendements énergétiques, vont également influencer la surface occupée par le parc solaire PV au sol : selon une étude, il faut 438 m²/GWh pour des panneaux multi-Si ; 328 m²/GWh pour des panneaux multi-Si avec un angle optimal et 164 m²/GWh pour des panneaux avec *tracker* et DNI (Direct Normal Insolation) (Fthenakis, et al., 2009). La centrale photovoltaïque localisée à Marsciano (Italie) couvre une surface totale de 30 800 m², dont 10 800 m² pour les panneaux au sol ; pour une puissance de 1 778 kW (Desideri, et al., 2012).

Le développement des infrastructures de captages de l'énergie solaire au sol nécessite des surfaces importantes de terres (ramené à l'unité d'énergie). Les fermes solaires de capacité industrielle occupent des étendues de plus en plus vastes, mais leur conception, leur empreinte et leur efficacité peuvent varier considérablement (Hernandez, et al., 2014). 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 entre 1,5 et 2,5 fois la surface des panneaux eux-mêmes (Gasparatos, et al., 2017; Turney, et al., 2011).

⁵³ https://negawatt.org/IMG/pdf/150505_partie3_analyse-offre.pdf

La question des surfaces de sols utilisés est évaluée au niveau du site de production d'énergie uniquement. Dans une moindre mesure, l'extraction de matériaux (utilisés dans les structures et les systèmes de raccordement) peut générer une emprise sur les sols. Desideri (2012) évalue un indicateur relatif à l'utilisation des terres, sur l'ensemble du cycle de vie d'une installation photovoltaïque au sol (des étapes de fabrication et de transport jusqu'au site d'installation). Néanmoins, l'étude ACV ne fournit pas les informations par étape du cycle de vie (analyse de cycle de vie en conformité avec les standards ISO ; méthodologie d'évaluation des impacts Eco-Indicator 99).

Un consensus semble exister sur l'évaluation des impacts relatifs à l'emprise sur les sols du site de production d'énergie, dans le cas du photovoltaïque au sol. Une lecture critique des résultats reste cependant nécessaire, au vu du manque de précisions sur les caractéristiques de chaque installation et notamment sur les surfaces considérées utiles.

Dans le cas de l'énergie solaire au sol (photovoltaïque ou thermique), le positionnement des panneaux au-dessus du sol (0,80 à 1 m) gêne l'ensoleillement direct. Cela provoque la formation de zones d'ombre et peut impacter la température du sol. Concernant les conséquences de l'ombrage des panneaux sur la faune et la flore, la section 3.1 relative aux impacts sur la biodiversité détaille les études qui en ont analysé les effets. En particulier, les zones d'ombres induites par les panneaux solaires permettent aux espèces présentes de limiter l'évapotranspiration (Marrou, et al., 2013) et favorisent le développement de certaines espèces végétales se développant plus facilement à l'ombre, dont des espèces envahissantes (Guerin, 2017). Les enjeux liés au **recouvrement du sol** sont applicables à des installations fixes principalement : en effet, dans le cas d'installations pivotantes, seule 6 à 8 % de la surface couverte présente une ombre permanente (Günnewig, et al., 2009).

Les impacts relatifs à l'**imperméabilisation des sols** varient selon les installations étudiées, et se limitent souvent à la construction des bâtiments d'exploitation, analogues à toute production d'énergie. À l'imperméabilisation due aux fondations, il faut ajouter l'imperméabilisation causée par les stations de conversion d'énergie que sont les onduleurs et les transformateurs. L'imperméabilisation des sols peut aussi résulter de son recouvrement par un bâtiment (poste de livraison électrique par exemple) ou une couche imperméable (couche d'asphalte pour les routes d'accès par exemple).

Pour une installation photovoltaïque, le type de fondations a une influence sur le taux d'imperméabilisation des sols. Si par exemple, une installation photovoltaïque est implantée sur un terrain de 60 ha et qu'elle comprend 5 600 panneaux, chaque panneau supportant 45 modules par l'intermédiaire de 6 fondations, elle compte au total 33 600 fondations. Dans le cas de fondation par pieux, la surface d'imperméabilisation du sol d'un pieu étant de 12 cm², les 33 600 pieux représentent une surface totale d'imperméabilisation d'environ 40 m² (soit un taux d'imperméabilisation négligeable, car inférieur à 0,007 %). Dans le cas de fondation par semelles en béton : avec des semelles de 0,60 m x 0,30 m, la surface imperméabilisée atteint 6 050 m², soit un taux d'imperméabilisation de 1 %. À l'imperméabilisation due aux fondations, il faut ajouter l'imperméabilisation causée par les stations de conversion d'énergie que sont les onduleurs et les transformateurs. Pour 15 stations d'une superficie unitaire d'environ 20 m², la surface imperméabilisée s'élève à 300 m² supplémentaires, soit un taux d'imperméabilisation de 0,05 %. Dans le cas de fondation en béton, le taux d'imperméabilisation total s'élève donc à 1,05 %, ce qui ne représente pas une surface significative à l'échelle du projet (MEDDTL, 2011).

Les panneaux solaires au sol sont installés sur des surfaces ne nécessitant pas d'être profondément modifiées (à l'exception des stockages membranaires pour le solaire thermique), bien que des travaux de remblaiement puissent être mis en œuvre (voir section 9.2.2 relative aux impacts sur les sols des systèmes de transport et stockage). Pour une installation photovoltaïque, le type de fondations a une influence sur le taux d'imperméabilisation des sols. Le taux d'artificialisation lié aux fondations pour les panneaux est estimé entre 2 % et 5 % de la surface totale d'une installation photovoltaïque (respectivement pour une fondation sur pieux et une fondation sur dalle de béton) (Günnewig, et al., 2009). La notion d'artificialisation, qui normalement traduit le fait de retirer le sol d'un usage agricole, naturel et forestier, est rarement utilisé avec cette signification et varie selon les publications ; il s'agit dans la majorité d'une modification profonde des sols, voire d'une imperméabilisation du sol. En France, il est estimé que 35 % (soit 490 à 770 ha/TWh/an) et 7 % (soit 147 à 231 ha/TWh/an) des surfaces totales occupées par des parcs PV sont artificialisées⁵⁴, respectivement pour le PV fixe et le PV *tracker* 1 axe et que 0,06 % (soit 0,8 à 1,3 ha/TWh/an) et 2 % (soit 42 à 66 ha/TWh/an), respectivement sont

⁵⁴ Ici l'« artificialisation » correspond à la seule localisation au sol des panneaux, des infrastructures électriques, des chemins d'accès, des stationnements et des zones de manœuvre.

imperméabilisées (Feix, 2018). Les surfaces étudiées par les publications ne semblent pas concerner les sols, relativement « naturels », qui subissent plus ou moins les conséquences de l'installation (par exemple, compactage lié aux poids des engins lors de l'installation, défrichage, etc.). La question de l'artificialisation des sols lors de l'étape de démantèlement n'est pas considérée dans la bibliographie. Cependant, les centrales photovoltaïques étant des sites industriels, la remise en état du site est une obligation légale en fin d'utilisation (installations démontées, câbles et fondations retirés, tranchées remblayées) (Pointereau, et al., 2009).

A noter que si l'installation est close (clôturée par exemple pour une centrale solaire au sol), toute la surface de sol à l'intérieur est considérée artificialisée (par Corine Land Cover⁵⁵ et Teruti-Lucas⁵⁶), même les surfaces en herbe. Pour des installations ouvertes, avec une relative faible densité d'éléments construits, un co-usage avec une activité agricole est parfois possible. Se pose alors la question de la comptabilisation de la surface de sol en co-usage (hors localisation au sol des panneaux solaires et de leurs fondations, des infrastructures électriques, des chemins d'accès, des stationnements et des zones de manœuvre). Cette question est importante car la définition de l'artificialisation peut faire varier le taux d'artificialisation de façon très importante. Elle dépasse néanmoins le seul périmètre des EnR et concerne plus largement le mode d'estimation des surfaces de sols artificialisés.

Les questions de recouvrement, d'imperméabilisation et d'artificialisation des sols sont recensées comme de potentiels impacts générés lors de la phase d'installation et de production d'énergie solaire au sol, dont l'intensité peut être réduite en fonction des choix d'aménagements opérés (emprises nécessaires, modalités d'installation). Ils ne sont que peu évalués dans la littérature et leurs définitions et mode de calcul varient dans les publications.

La question d'un potentiel **changement d'affectation des sols** et de la réversibilité des installations sont des enjeux identifiés lors de la construction de certaines infrastructures de production d'énergie solaire, qui sont fonction de l'occupation historique ou précédente du site. La construction d'un parc photovoltaïque au sol demande un aménagement des parcelles concernées par le projet (ancrage au sol, tranchées pour le raccordement électrique, clôtures, pylônes, etc.) (Pointereau, et al., 2009), parcelles pouvant initialement être dédiées à d'autres usages. Le sujet est notamment identifié dans la circulaire du Ministère du développement durable du 18 décembre 2009, dont l'objectif est de limiter la transition de sols agricoles vers des parcs solaires. Les bonnes pratiques partagées dans les guides du Ministère vont dans ce sens (MEDDTL, 2011), tout comme les derniers appels d'offres lancés sur des projets photovoltaïques. Ainsi, le critère de « pertinence environnementale » inclus dans les appels d'offres prend en compte l'affectation des sols, et valorise les projets implantés sur « site dégradé », par exemple sur des friches industrielles (ce qui revient dans le cas des friches urbaines ou industrielles à limiter les changements d'affectation des sols).

En 2013, ce sont entre 20 400 et 101 900 ha qui ont été convertis pour des parcs PV en Europe (Armstrong, et al., 2016), correspondant à du CASd. Les CASi ne semblent pas avoir été estimés.

Les possibilités de **co-usage des sols** dans le cadre du solaire au sol sont mentionnées dans plusieurs publications. En particulier, quelques-unes s'intéressent spécifiquement à la faisabilité de l'agrivoltaïque⁵⁷ et les impacts physiques potentiels sur les sols (dans le cas spécifique où une centrale solaire au sol est installée sur une zone agricole). A titre illustratif, l'étude de la culture de laitues sur un sol avec des panneaux photovoltaïques montre que l'eau de pluie s'écoulant des panneaux peut permettre une meilleure irrigation des laitues ; les panneaux peuvent également jouer un rôle de coupe-vent (Pointereau, et al., 2009). Les clôtures mises en place peuvent servir pour un élevage ovin (Pointereau, et al., 2009). A l'inverse, plusieurs impacts négatifs sont mentionnés dans la littérature dans le cas d'un co-usage : réduction de l'ensoleillement des cultures, limitation de l'évapotranspiration, impact sur la température des sols, etc. (Dinesh, et al., 2016; Dupraz, et al., 2011a). Plusieurs sites pilotes appartenant au projet Agrinergie⁵⁸ et localisés sur l'île de la Réunion (Pierrefonds, Syndicat et Le Tampon) associent les panneaux solaires photovoltaïques au sol et l'agriculture sous ombrage. Des fleurs et fruits sont cultivés sous des serres sur lesquelles sont disposés des panneaux photovoltaïques (ici il y a bien co-usage, mais les sols sont imperméabilisés, ce qui réduit les services écosystémiques rendus par les sols).

⁵⁵ Outil européen de mesure par télédétection

⁵⁶ Outil de mesure français fondé sur des enquêtes statistiques

⁵⁷ L'agrivoltaïque est un concept de culture étagée proposé en 1981 qui désigne l'association d'une production d'électricité photovoltaïque et une production agricole sur une même surface.

⁵⁸ <http://www.akuoenergy.com/fr/agrinergie>

L'occupation des sols par quantités d'énergie et d'aliments produits peut être calculée pour les systèmes agrivoltaïques et comparée aux quantités d'énergies et d'aliments produits sur des parcelles séparées (uniquement en cultures et uniquement en photovoltaïque au sol). Si les premières sont supérieures aux secondes alors le co-usage est optimisé et meilleur que des usages séparés. Un essai près de Montpellier, montre qu'une parcelle de 1 ha en agrivoltaïque produit autant d'électricité et de cultures alimentaires que 1,64 ha quand les surfaces pour le PV et la culture sont séparées (Dupraz, et al., 2011a; Dupraz, et al., 2011b). L'agrivoltaïque pourrait se révéler intéressant en termes de productivité agricole dans les régions où le rayonnement solaire stresse les cultures (ex. Afrique sub-saharienne) grâce à l'ombrage ou dans les régions où le changement climatique stressera les cultures, grâce aux effets microclimatiques des panneaux solaires (Armstrong, et al., 2016). Ceci pourrait aussi concerner certains vignobles du sud de la France où un climat plus chaud et ensoleillé risque d'augmenter le taux d'alcool du vin, ce qui n'est pas recherché par les consommateurs. Ces résultats sont prometteurs et ces pistes doivent donc être approfondies, notamment pour le choix des cultures tolérantes à l'ombre, l'implantation des panneaux PV et l'optimisation climat/cultures⁵⁹ (Dupraz, et al., 2011a; Marrou, et al., 2013).

Les projets de co-usages comme l'agrivoltaïque ont été mis au point pour optimiser au maximum l'utilisation des sols, et limiter les potentiels impacts en termes de changement d'affectation ou de recouvrement des sols. Il s'agit cependant d'initiatives récentes, sur lesquelles davantage de retours d'expérience seraient nécessaires pour en connaître réellement les impacts sur les sols.

3.2.2. Impacts physiques sur les sols

La plupart des impacts physiques mentionnés dans la littérature sont relatifs aux phases de travaux et de production d'énergie solaire sur site, et sont localisés à l'échelle du site. La présence de panneaux solaires (photovoltaïques ou thermiques) au sol engendre de potentielles variations de température du sol ; dans une moindre mesure, elle peut modifier l'écoulement de l'eau sur les sols, donc l'érosion et le ruissellement, ainsi que la compaction des sols lors des étapes d'installation. Seuls les impacts relatifs à la température des sols sont évalués (principalement sur des observations et mesures) ; peu de recherches semblent menées sur le développement de méthodes d'évaluation des autres sous-impacts.

Les grands parcs photovoltaïques au sol modifient le microclimat local. Ils modifient l'albédo de surface, ombrent des sols, interceptent les pluies et les dépôts atmosphériques et influencent la vitesse du vent et la turbulence à la surface du sol. Il en découle des changements de température (air et sol), de précipitations et d'évapotranspiration (et donc d'humidité du sol), ainsi que du bilan radiatif de courtes et de grandes longueurs d'ondes, autant de facteurs qui influencent directement (diminution de la productivité végétale et donc des quantités de matières organiques retournant au sol et accélération ou non de la décomposition de la matière organique dans le sol) et indirectement (changements de l'activité et de la composition des communautés végétales et microbiologiques) sur le cycle du carbone des plantes et les émissions de GES et le stockage de carbone par le sol (Feix, 2018). On ne sait pas si le bilan entre les entrées et les sorties de carbone dans le sol est positif ou négatif, ni quel est son ordre de grandeur, or ce bilan est nécessaire dans le bilan global GES des filières de productions d'électricité renouvelable (Armstrong et al., 2014).

La présence de panneaux solaires au sol peut affecter la **température des sols** sous les panneaux, en raison d'un moindre d'ensoleillement et de l'altération du flux d'air autour de la structure (Gasparatos, et al., 2017). A titre d'exemple, la mesure de la température sous des panneaux photovoltaïques pendant 12 mois à Westmill Solar Park (installation au Royaume-Uni d'une capacité de 5 MW sur 12,1 ha – mesures réalisées avec une micro station HOBO), montre que le sol est refroidi sous les panneaux en été (-5,2 °C en moyenne) et réchauffé en hiver (+1,7 °C) (Armstrong, et al., 2014; Armstrong, et al., 2016). Ces observations sont réalisées sur une terre arable et cultivable où une prairie a été développée avant la mise en place des installations solaires, dans des conditions climatiques proches de celles de la France. Des observations similaires sont mentionnées dans d'autres études, relatives à la température de l'air et du sol sous les panneaux photovoltaïques (installation en Inde dans un parc de 500 MWc constitué de différents types de panneaux) (Roy, et al., 2017).

⁵⁹ Dans les climats arides ou semi-arides, l'ombre peut être bénéfique pour des cultures sensibles aux stress thermique et pour limiter l'évapotranspiration.

Les enjeux sont similaires dans le cas du solaire thermique au sol. Les effets potentiels des systèmes de raccordement d'énergie sont cependant distincts : le transport de chaleur, plus que celui d'électricité, pourrait potentiellement induire un changement de température du sol, de façon très localisée. Cet impact n'est cependant pas évalué dans la littérature.

Des éléments plus généraux, relatifs aux effets sur le microclimat (sous les panneaux et à proximité), sont fournis en section 3.1.4.

L'impact localisé du solaire au sol sur les variations de température des sols est avéré. L'intensité des variations est corrélée aux conditions climatiques (humidité, température), et n'est pas fonction du type de panneau photovoltaïque (hors systèmes de raccordement associés).

Comme pour tous travaux, les aménagements réalisés pendant la phase de construction (création des routes de chantiers, entrepôts, terrassement, nivellement, etc.) et le passage régulier des engins contribuent à un **tassement** et une **compaction des sols** au niveau de la centrale solaire (Pointereau, et al., 2009). L'installation d'une centrale photovoltaïque au sol implique le défrichage, le décapage, le terrassement et le tassement du terrain et peut donc favoriser l'érosion du sol, notamment en conditions arides et méditerranéennes (Pérez-de-los-Reyes, et al., 2013; Hernandez, et al., 2014).

L'impact dans le cas du solaire sur bâti existant est considéré négligeable. Certains projets de centrale solaire au sol nécessitent une phase de terrassement pour aplanir les sols, avant la réalisation des fondations et tranchées pour le raccordement au réseau. En amont de la construction, des études de stabilité du terrain et des études topographiques et géomorphologiques permettent d'évaluer l'impact potentiel et de minimiser le remodelage du terrain en choisissant l'aménagement le plus adéquat (MEDDTL, 2011).

Le tassement (ou la compaction) potentiel des sols est considéré négligeable dans le cas de la production d'énergie solaire par rapport à d'autres énergies. En effet, dans la majorité des cas, des travaux de terrassement sont réalisés pour la construction des structures d'exploitation mais le sol n'est pas ou peu modifié pour la pose des panneaux solaires et de leurs fondations (pieux ou dalles). Celles-ci sont construites directement sur le sol et utilisent une faible surface. Les impacts sont identifiés dans les rapports et guides, tout comme les moyens de les évaluer (topographique, géomorphologique, etc.), mais ils ne font pas l'objet de suivi sur site.

Dans le cas de l'énergie solaire au sol, les impacts relatifs au **ruissellement** et à l'**érosion des sols** sont mentionnés dans la littérature analysée, lors des phases d'installation et d'exploitation. A noter qu'il n'existe pas d'étude de cas détaillant des résultats quantifiés ou une méthode d'évaluation à utiliser. Ces impacts du solaire au sol restent négligeables lors de l'installation et de l'exploitation, en comparaison de l'érosion générée lors des étapes d'extraction de matériaux primaires utilisés dans les structures (valable pour le solaire au sol et sur toiture). Au vu de la littérature disponible, aucune comparaison quant à l'intensité de ces impacts entre étapes n'est possible à date.

Pendant la phase de construction sur site, et comme pour tous travaux d'installation, le défrichage, le décapage, le tassement et le terrassement potentiels peuvent générer un ruissellement ou une érosion accrue des sols sur site (MEDDTL, 2011), notamment en conditions arides et méditerranéennes (Pérez-de-los-Reyes, et al., 2013; Hernandez, et al., 2014). Une fois les panneaux installés, ceux-ci concentrent l'écoulement des eaux de pluie sur une faible surface, comme présenté en Figure 2, et accroissent par conséquent l'érosion des sols sur cette surface (Günnewig, et al., 2009). Au-delà des paramètres climatiques locaux, l'intensité de ces impacts varie en fonction du type d'installation et de ses caractéristiques (panneaux pivotants, hauteur et taille des modules, disposition - leur alignement dans le sens de la pente aggrave l'érosion par exemple, etc.). Un certain nombre de bonnes pratiques visent à réduire leur intensité : par exemple, des panneaux suffisamment espacés permettent une infiltration de l'eau dans les sols ; des systèmes spécifiques peuvent être mis en place pour faciliter l'infiltration des eaux de pluie. Dans le cas du solaire thermique, l'espacement entre panneaux de même rangée est imposé par la connectique hydraulique (panneaux fixés « bord à bord »).

Dans des cas spécifiques comme en zones inondables, la présence de panneaux peut influencer sur l'imperméabilisation des sols et renforcer le risque d'inondation (MEDDTL, 2011). Des études de terrain préalables permettent de limiter ces impacts. Dans le cas de projets solaires présentant un risque avéré

sur l'eau et les milieux aquatiques, une autorisation d'exploitation au titre de la loi sur l'eau est nécessaire (Pointereau, et al., 2009; MEDDTL, 2011; Environnement Canada, 2012).

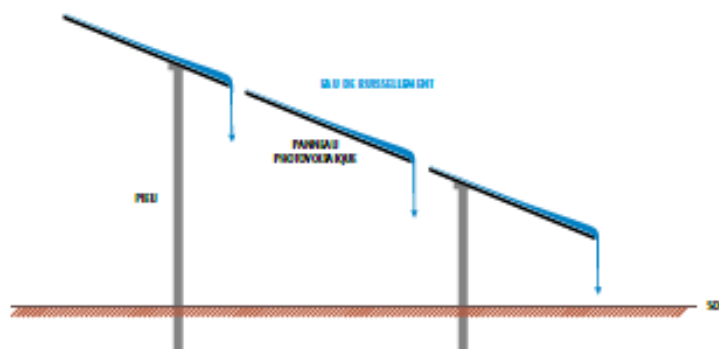


Figure 2 : Illustration de l'effet des modules sur l'écoulement des eaux de pluie (Ministère de l'écologie et Ministère de l'économie)

L'érosion des sols est accentuée ou modérée par certains facteurs exogènes aux choix des infrastructures : le régime des pluies (et notamment l'intensité des précipitations), l'inclinaison des sols, la nature et l'état des sols (des sols limoneux peuvent être sensibles à l'érosion même pour une très faible pente, un sol tassé sera sensible à l'érosion, par ex.) ou encore la présence d'un couvert végétal (plus un sol est « nu » et plus il sera sensible à l'érosion) (Günnewig, et al., 2009). Ainsi, plusieurs études indiquent que l'érosion des sols peut être réduite à des taux négligeables sur des centrales photovoltaïques au sol, pour lesquelles par exemple sont utilisés des modules photovoltaïques élevés, avec un couvert herbacé (Graebig et al., 2010 ; Agence allemande de l'énergie renouvelable, 2010, cités par Environnement Canada (2012)). Si ces éléments ne font pas l'objet d'une évaluation dédiée, les résultats relatifs à l'érosion des sols sont estimés comparables à un champ de couvert herbacé non labouré, sur lequel l'érosion peut être réduite à 0,08 t/ha/an (Graebig et al., 2010, cités par Environnement Canada (2012)).

La production d'énergie solaire au sol peut générer de façon très localisée une érosion des sols sur site ; les effets n'en sont pas évalués dans la littérature ou sur site. Ces impacts peuvent être négligeables, quand le risque est anticipé et géré.

3.2.3. Impacts chimiques sur les sols

La majorité des impacts chimiques mentionnés dans les publications sont relatifs à la contamination des sols par des substances chimiques et dans une moindre mesure à l'impact potentiel sur l'acidification des sols. Les impacts chimiques couvrent les principales étapes du cycle de vie des structures. La littérature porte sur la production d'énergie solaire photovoltaïque au sol ; ces résultats ne peuvent être extrapolés à d'autres technologies de panneaux, les impacts chimiques générés lors des phases amont étant variables selon la composition des modules.

Selon les matériaux utilisés dans les panneaux (silicium, aluminium, pour les technologies photovoltaïques majoritaires sur le marché ; acier inoxydable, aluminium, cuivre pour le thermique) et les systèmes de raccordement au réseau, la phase d'extraction peut avoir un impact non négligeable sur la **contamination chimique** des sols. La fabrication des panneaux photovoltaïques en silicium multicristallin par exemple pourrait potentiellement générer une pollution des sols en fluorure et en chlorure près des sites de production si des précautions ne sont pas prises, ceci affecterait de façon importante les communautés microbiennes des sols et diminuerait leur fertilité (Wu, et al., 2016). Ces impacts ne sont cependant pas spécifiques à l'extraction de matériaux pour la fabrication de panneaux (photovoltaïque ou thermique) et raccordements, et peuvent être généralisés à l'ensemble des activités d'extraction de ces matériaux (notamment pour l'extraction du cuivre). Il serait possible d'évaluer les impacts de l'extraction des matériaux primaires utilisés dans l'énergie solaire, en y allouant une part de ces impacts. Ces travaux n'entrent cependant pas dans le cadre de la présente étude.

Les procédés de fabrication de panneaux en silice cristalline (purification de la silice, etc.) peuvent également induire des impacts sur la contamination des sols, en cas de présence de polluants dans l'eau utilisée dans les procédés de fabrication (par exemple : alcalins, fluorures ou composés chromés,

ces derniers réduisant le rendement des cultures et rendant les sols plus calcaires) (Qi, et al., 2017). Parmi les autres substances polluantes mentionnées dans les publications, des gaz toxiques (tétrachlorure de silicium, tellure de cadmium, etc.) peuvent être libérés lors de la fabrication des modules au CdTe (Qi, et al., 2017), une technologie représentant cependant une très faible part du marché du photovoltaïque. De plus, il n'est pas indiqué dans quelle mesure l'émission dans l'air de ces substances impacte les sols (via un phénomène de dépôt).

L'entretien des infrastructures peut nécessiter l'utilisation de produits anti-poussières comme l'huile de canola et de lignosulfate (Berchin, et al., 2015; Guerin, 2017), pour débarrasser les panneaux solaires des salissures. Leur utilisation est plus fréquente dans les rares cas où les panneaux ne sont pas inclinés et en période de grande sécheresse (nettoyage par les précipitations réduit). Si la nocivité des substances chimiques utilisées est connue, la contamination des sols par ces produits ne fait pas l'objet d'une évaluation du fait de leur utilisation limitée (de l'eau peut également être utilisée pour nettoyer les panneaux) et occasionnelle. C'est également le cas d'autres substances comme les antirouilles, les peintures sur bâtis et les herbicides pour l'entretien du terrain. L'entretien de la végétation au sol peut également se faire par pâturage (ovins, caprins, etc.) et ainsi éviter l'emploi d'herbicides.

En comparaison, l'utilisation des panneaux pour la production d'énergie solaire (phase d'exploitation) génère une pollution des sols négligeable. Les supports et les modules des panneaux sont prévus pour résister aux agressions du climat et aux chocs, il n'existe pas d'impact chimique sur les sols référencé dans la littérature lors de leur utilisation via un lessivage à l'eau de pluie, sauf dans de rares cas d'accident et de dommage des panneaux (Günnewig, et al., 2009; MEDDTL, 2011). Dans le cas de panneaux solaires thermiques, de potentielles fuites de fluides caloporteurs sont mentionnées (Tsoutsos, et al., 2005) ; toutefois, la norme française impose au liquide caloporteur de n'avoir aucune répercussion sur l'environnement en cas de fuite (biodégradabilité). Le principal fluide caloporteur utilisé est l'eau glycolée. En cas de fuite, il est cependant recommandé de réaliser les soudures et le colmatage le plus rapidement possible afin de ne pas contaminer le milieu.

Plusieurs études ont été menées dans le cas de panneaux endommagés, et permettent d'envisager l'intensité maximale en cas d'accident, en termes de pollution des sols. Seules quelques technologies bien spécifiques, et **encore non commercialisées** à grande échelle, sont étudiées : les résultats ne sont pas représentatifs des technologies majoritaires sur le marché. Espinosa et al. (2016) ont récupéré et analysé de l'eau de pluie ruisselant de panneaux photovoltaïques à couches minces de polymères organiques endommagés. Les éléments chimiques retrouvés en fortes concentrations sont le zinc (avec une valeur mesurée maximale de 665 µgZn/L dans les lixiviats). Les mêmes auteurs ont simulé la mise en décharge de ces mêmes panneaux et c'est l'argent qui est retrouvé en grande quantité dans le sol (852,5 mgAg/kg de sol, excédent la capacité de séquestration du sol en argent). D'autres essais de lixiviation (sur plusieurs mois) par l'eau de pluie sur des panneaux à couches minces de polymères organiques et couches minces inorganique CuInGaSe, plus ou moins endommagés, montrent aussi la libération d'éléments traces métalliques dans les lixiviats (Zimmermann, et al., 2013).

Enfin, les impacts générés lors de la fin de vie des panneaux restent peu évalués. La plupart des matériaux composant les panneaux solaires peuvent être extraits (verre, aluminium, cuivre, etc.) et recyclés. Les panneaux solaires thermiques peuvent être entièrement recyclés. La pollution potentielle générée lors de la fin de vie est *a priori* négligeable; cependant comme pour tout déchet, et selon sa composition, une mauvaise gestion en fin de vie peut générer un lessivage de composés toxiques ou de métaux dangereux (par exemple : plomb, cadmium, tellure de cadmium, phosphore – dont certains ne sont utilisés que dans des technologies représentant une faible part du marché). Des gaz (acide fluorhydrique) peuvent aussi être libérés dans l'environnement (Fthenakis, et al., 2009). Certaines substances contribuent au potentiel d'acidification des sols, détaillé ci-dessous.

Les matériaux utilisés dans les panneaux solaires ou pour leur entretien peuvent générer des impacts chimiques. Les étapes amont de la production d'énergie, potentiellement contributrices, restent peu étudiées par rapport à l'utilisation des panneaux. Il est difficile de juger de la pertinence de ces résultats sans recul ou comparaison entre étapes du cycle de vie, en fonction des technologies de panneaux, ou avec d'autres systèmes de production.

Parmi les publications analysées, plusieurs présentent des résultats relatifs au **potentiel d'acidification** des milieux, dans le cas du photovoltaïque cristallin, technologie représentant la majorité du marché du photovoltaïque en France et dans le monde. Cet impact n'est donc pas évalué dans le cas des sols uniquement, mais agrège les résultats de l'impact potentiel sur les milieux aquatiques, aérien et les sols. Un changement de pH des sols peut entraîner leur altération chimique et biologique, et indirectement

impacter la qualité de l'écosystème associé. Les résultats d'une étude d'analyse de cycle de vie couvrent l'ensemble des étapes du cycle de vie d'une structure solaire photovoltaïque en silicium multicristallin, de l'extraction des matériaux à la gestion en fin de vie du panneau (analyse de cycle de vie en conformité avec les standards ISO ; méthodologie d'évaluation des impacts Eco-Indicator 99) (Desideri, et al., 2012). Sur l'ensemble des structures associées au parc photovoltaïque étudié, les modules sont le principal contributeur (plus de 65 %) au potentiel d'acidification, suivi dans une moindre mesure par le raccordement au réseau et le câblage (environ 12 % chacun) (Desideri, et al., 2012). La publication ne donne pas la répartition par étape du cycle de vie, cependant ce sont *a priori* les étapes de fabrication des structures (plus que leur utilisation pour produire de l'énergie) qui contribuent à cet impact.

Selon Pehnt (2005, cité dans Environnement Canada (2012)), le potentiel d'acidification généré par un système photovoltaïque à base de silicium multicristallin est de 528 mgSO₂-eq./kWh. L'intensité de cet impact potentiel est plus élevée que pour la production d'une même quantité d'énergie à partir de technologies éolienne ou hydraulique, mais est plus faible que dans le cas du biogaz et d'autres systèmes de chaleur renouvelable comme la géothermie ou la combustion de biomasse (analyse de cycle de vie en conformité avec les standards ISO ; méthodologie d'évaluation non précisée).

La phase d'installation des panneaux nécessite dans certains cas de figure des travaux d'aplanissement du terrain et l'enterrement des câbles de raccordement ou hydraulique de raccordement au réseau de chaleur. Comme pour toute activité de ce type, une **perte de matière organique** peut alors être engendrée, et potentiellement accentués par une plus forte érosion due au vent ou à l'eau (Hernandez, et al., 2014) ou par la disparition de la couverture végétale au sol. A titre d'exemple, suite à la dévégétalisation, une perte de 25 % de carbone organique et d'azote est observée dans les cinq premiers centimètres du sol (étude menée en milieu semi-aride – Lovich et al., 1999) : un ordre de grandeur confirmé par d'autres études, qui indiquent que 15 ans après la disparition de la couverture végétale en milieu semi-aride, la teneur en carbone organique du sol est 30 % moins importante en comparaison à un sol témoin (étude menée en milieu semi-aride en Espagne – Bastida et al., 2006) (Hernandez, et al., 2014). La gestion de la végétation dans les parcs photovoltaïques au sol devrait avoir aussi leur importance, à l'image de la gestion des tontes dans les jardins et les espaces verts. Les sols et les racines des pelouses séquestrent du carbone, plus ou moins selon que l'on retire ou non les résidus de tonte et selon la fertilisation. Toutefois, la capacité de stockage est limitée et le stock de carbone dans les sols se stabilise au bout de quelques décennies. La pratique la plus courante pour la gestion des résidus de tonte consiste à les exporter, ce qui fait diminuer le stock de carbone dans les sols, contrairement au fait de les laisser sur place (ADEME, 2018). Ainsi, le potentiel de séquestration de carbone des pelouses est diminué de 60 % lorsqu'on exporte les tontes. Aux Etats-Unis le taux de séquestration de carbone des pelouses intensives est de 3 660 kg CO₂/ha/an pour une fertilisation de 150 kg/ha/an et de 1 830 kg CO₂/ha/an pour une fertilisation 75 kg/ha/an (Streit, 2009). Les stocks d'azote et de phosphore diminuent également, permettant ainsi de réduire l'influence et l'apparition de cortèges nitrophiles « rudéraux ».

Ces études, bien que non effectuées dans le cadre d'un projet solaire, et observées dans des conditions particulières, restent pertinentes lorsque les sites destinés à la construction d'une centrale solaire sont dévégétalisés.

La littérature spécifique au solaire ne fournit pas d'évaluation de la perte de matière organique (notamment lors de l'installation) ; des études sur la dévégétalisation, bien que non directement liées à l'installation de panneaux, peuvent être mises en parallèle avec les impacts dus au terrassement et au remaniement du sol.

3.2.4. Impacts biologiques sur les sols et services écosystémiques

L'émission de polluants dans les sols (directement ou via l'eau ou l'atmosphère) peut entraîner des modifications des fonctions naturelles du sol comme les **fonctions de biotope, de réservoir et de filtre** (MEDDTL, 2011). Les impacts biologiques sur les services écosystémiques des sols sont peu étudiés dans les publications analysées, malgré les recherches complémentaires effectuées sur le sujet. Cependant, les impacts de l'énergie solaire sur la faune et la flore (voir section 3.1 relative aux impacts sur la biodiversité) sont indirectement liés aux impacts physiques sur les sols (ombrage, etc.) et à la

chimie des sols, détaillés dans les sections 3.2.2 et 3.2.3. La littérature ne semble pas étudier les relations entre ces différents types d'impacts sur les sols.

La publication de Desideri et al. (2012) évaluant l'impact de l'ensemble du cycle de vie des installations photovoltaïques sur sol utilise un indicateur représentatif de la **qualité de l'écosystème**, pouvant englober les impacts sur la biologie des sols. Cet indicateur agrège les résultats relatifs au potentiel d'acidification et d'eutrophisation des milieux (sol, eau), ainsi que l'écotoxicité et l'utilisation des terres (analyse de cycle de vie en conformité avec les standards ISO ; méthodologie d'évaluation des impacts Eco-Indicator 99) (Desideri, et al., 2012). Il apparaît ainsi que les modules photovoltaïques sont le principal contributeur (plus de 70 %) à cet indicateur agrégé, suivi dans une moindre mesure par le raccordement au réseau, le câblage, et les installations de support des modules (environ 10 % chacun). Cet indicateur de la qualité de l'écosystème est parfois utilisé dans d'autres études ACV, par exemple l'énergie éolienne (cependant non retenue pour la revue de littérature).

Le projet ESTHACE, mené par l'ADEME, a évalué l'impact potentiel sur la qualité de l'écosystème d'installations thermiques sur toiture. Dans le cas d'une installation thermique sans appoint, en territoire DOM, la fabrication des composants est le principal contributeur à cet impact potentiel, en particulier le ballon, les capteurs et la tuyauterie. L'extraction et la fabrication de cuivre est responsable de la quasi-totalité des impacts sur la qualité de l'écosystème, associés aux tuyauteries (Transénergie, 2010).

La pose des PV ne nécessitant généralement pas de travaux lourds de génie civil et les fondations pouvant être remplacées par des pieux enfoncés ou des lests constitués par des socles de béton posés à même le sol ; ces caractéristiques d'installation favorisent, dans la majorité des cas, la réversibilité des impacts sur les sols et les services écosystémiques qu'ils rendent à l'issue de la fin d'exploitation, une fois le parc démantelé et la restauration des sols sera relativement aisée.

Les impacts de l'énergie solaire sur la biologie et les services écosystémiques des sols sont des impacts potentiels, seulement mentionnés dans quelques publications. Leur évaluation à date passe par l'utilisation de modèles d'analyse de cycle de vie, qui fournissent une vision d'ensemble complémentaire de mesures ou observations de terrain, actuellement manquantes. Le manque de publications portant sur des indicateurs comparables, pour d'autres technologies, limite la prise de recul sur les résultats.

Une lecture de ces résultats par décomposition des étapes du cycle de vie serait nécessaire pour compléter l'analyse, au vu des enjeux identifiés en termes d'impacts chimiques et physiques sur les sols lors des phases amont (par exemple extraction des matériaux), et leur potentielle interaction avec la biologie et les services écosystémiques des sols.

3.3. Impacts de l'énergie solaire sur les paysages

Un nombre important de publications traite des impacts des installations solaires sur le paysage. Il s'agit de la deuxième EnR la plus traitée après l'énergie éolienne. Les principales technologies abordées sont le photovoltaïque au sol et le photovoltaïque sur bâti (toitures, parois, etc.). L'énergie solaire thermique est peu abordée, et la littérature reprend les éléments développés pour le photovoltaïque. On peut noter que le photovoltaïque (mais également le solaire thermique) sur bâti existant est traité le plus souvent sous l'angle de son intégration, en lien avec l'architecture en particulier, alors que le photovoltaïque au sol est le plus souvent traité de la même manière que l'éolien, sous l'angle des impacts visuels, des conflits d'usage et de l'acceptation sociale.

3.3.1. Visibilité et acceptabilité dans le paysage

L'impact visuel des parcs photovoltaïques au sol est déterminé par plusieurs facteurs dont le choix du site, le design du parc, l'intégration sur le site (dans son environnement) et l'aspect utilitaire du projet (Naspetti, et al., 2016). Les impacts sont globalement proportionnels à l'étendue des parcs : les petits parcs photovoltaïques présentent peu d'impacts sur le paysage, au contraire des grands parcs photovoltaïques au sol impactant de manière importante l'histoire du lieu, les zones de cultures et les ambiances paysagères (Raková, et al., 2012).

En France et dans d'autres pays, la décentralisation de la politique énergétique entraîne des interventions localisées et fragmentées sur les territoires qui, lorsqu'elles sont considérées à une échelle plus globale, entraînent des modifications générales des paysages (CGDD, 2015). En outre, avant

l'essor des énergies renouvelables, la production d'énergie était centralisée dans des grandes structures relativement peu répandues sur les territoires (centrales nucléaires, thermiques, barrages, etc.).

Ce focus sur les impacts visuels occulte souvent les problématiques d'acceptabilité. En France, les problèmes d'acceptabilité sociale de l'énergie solaire (comme de l'énergie éolienne) sont aggravés par la complexité des processus de concertation et les démarches administratives et juridiques, entraînant des phénomènes de rejet parfois importants. Ces phénomènes se retrouvent beaucoup moins en Allemagne où les mécanismes de concertation sont mieux acceptés, ainsi qu'en Espagne, où l'existence de larges espaces sans habitations permet de limiter fortement les problématiques d'acceptabilité (CGDD, 2015).

En outre, les énergies classiques étant moins visibles dans le territoire que les énergies renouvelables, il est important de faire naître une culture du design des énergies renouvelables et en particulier dans le cas du photovoltaïque au sol pour lequel le design du parc a un rôle important à jouer (Scognamiglio, 2016). Ainsi, une des priorités pour le développement de l'énergie solaire est de maximiser son harmonie avec l'environnement visuel (Lu, et al., 2018) afin de limiter les problèmes d'acceptabilité et les impacts visuels. Dans d'autres pays comme au Maroc, les parcs photovoltaïques sont bien acceptés car l'intérêt économique est une des préoccupations majeures de la population (Hanger, et al., 2016) qui voit dans les EnR un moyen de développement des régions concernées.

Etant une énergie au potentiel conflictuel moindre que celui de l'éolien (Brühne, et al., 2015), l'énergie photovoltaïque est plutôt bien appréciée (et ce d'autant plus que les personnes interrogées sont jeunes), surtout quand les installations sont sur bâti (Sánchez-Pantoja, et al., 2018).

Les impacts des centrales photovoltaïques peuvent être très diversifiés en fonction de leur taille, de leur implantation et du contexte social sur le territoire. Les impacts paysagers étant souvent réduits aux impacts visuels, les enjeux de l'acceptabilité, de la représentation des paysages et du contexte culturel sont souvent oubliés. Ils jouent pourtant une part non négligeable dans l'insertion efficace d'un projet dans le paysage du territoire concerné.

3.3.2. Des méthodes économétriques et visuelles

L'acceptation sociale des projets est parfois évaluée par des méthodes de « consentement à payer ». Les personnes interrogées plébiscitent davantage la valeur « paysage » que « biodiversité » dans ce qu'ils sont prêts à payer (Bergmann, et al., 2006). La valeur paysage semble donc plus importante pour les habitants que la valeur biodiversité. Ainsi le paysage est bien un élément déterminant et un moyen d'appropriation des projets photovoltaïques.

Des méthodes de planification sont mises en place pour améliorer l'intégration des parcs photovoltaïques au sol aux paysages. Les outils d'appréciation des impacts sont notamment les photomontages (Chiabrando, et al., 2011) ou encore des travaux cartographiques afin de déterminer les co-visibilités potentielles. Des outils sont également développés pour prédire les effets de réflexion engendrés par les panneaux photovoltaïques (Chiabrando, et al., 2009) ou déterminer si la zone est favorable à l'implantation de panneaux photovoltaïques (Carullo, et al., 2013).

Aussi, des préconisations sur les lieux d'implantation sont émises afin de privilégier les anciennes zones industrielles, les carrières, etc. (Joubert-Garnaud, 2010). L'aménagement d'espaces de respiration au sein même des parcs photovoltaïques permettrait la plurifonctionnalité de l'espace (agriculture, tourisme, etc.) (Scognamiglio, 2016). Des variations de l'inclinaison des panneaux pourraient également participer, à rendement égal des centrales, à une meilleure perception des parcs au sol.

Les méthodes, basées sur des approches visuelles, ne permettent pas de rendre compte de toutes les composantes du paysage qui est loin d'être juste une « image » qui s'observe passivement. Le paysage est l'expression spatiale des modifications et des représentations des populations. Or, les projets sont rarement co-construits avec ces dernières, générant parfois un rejet du projet qui aurait pu être évité par plus de concertation et d'implication des populations locales.

3.4. Guides disponibles sur le territoire français

En France, le guide méthodologique édité en 2011 par le Ministère de l'environnement (MEDDTL, 2011) fait référence au niveau national. Il fournit un cadre méthodologique de l'évaluation des impacts environnementaux d'un projet photovoltaïque au sol, depuis la réalisation d'un prédiagnostic environnemental (fortement recommandé) jusqu'à la formalisation de l'étude d'impact. Il détaille les données à recueillir et les organismes à consulter, ainsi que les thématiques à aborder dans l'étude d'impact. Les recommandations méthodologiques concernant la prise en compte de la biodiversité sont classiques et assez peu développées. Celles relatives aux impacts sur les sols sont limitées. Concernant les impacts relatifs aux paysages, il est intéressant de noter que le guide développe notamment des critères et des éléments de cadrage qui permettent au porteur de projet de soulever certains enjeux avant la réalisation des études, pendant les phases en amont du projet.

De nombreux guides sont publiés par les DREAL, DDT ou préfectures pour la prise en compte des impacts environnementaux des projets de parcs solaires au sol. Ils permettent d'appréhender plus spécifiquement les caractéristiques locales des paysages et du territoire, et de la biodiversité. Parmi les guides développés à l'échelle locale, on citera notamment le guide méthodologique sur le photovoltaïque dans l'Hérault à l'usage des élus (DDTM34, 2010), le guide méthodologique sur le photovoltaïque au sol dans l'Aude (DDEA11, 2009) ou encore le guide sur le photovoltaïque en Corrèze (DDT19, 2010).

Chacun de ces guides fait état de l'avancement de la filière sur le territoire étudié et détaille les procédures administratives nécessaires pour l'obtention des autorisations. Des rappels des bonnes pratiques en phase de travaux et des recommandations locales de prise en compte des contraintes environnementales sont généralement avancées sans pour autant être plus précises que le guide national ni en faisant référence à des retours d'expérience ou des données scientifiques.

Comme indiqué en introduction de ce chapitre, le programme PIESO, lancé en 2015 avec un financement ADEME, devrait conduire à la publication en 2019 d'un guide opérationnel concernant spécifiquement la manière dont mieux appréhender les impacts de l'énergie photovoltaïque au sol, les protocoles à envisager, les mesures favorisant l'intégration environnementale des projets solaires ainsi que les indicateurs à cibler pour caractériser l'intégration environnementale des projets au sol. Ce guide opérationnel sera basé sur une durée d'étude terrain courte (2 ans).

3.5. Synthèse des impacts de l'énergie solaire

La qualification des impacts de l'énergie solaire sur la biodiversité, les sols et les paysages est synthétisée ici, ainsi que les méthodologies d'évaluation rencontrées et le niveau de différenciation des impacts entre technologies et étapes du cycle de vie des infrastructures.

En ce qui concerne la qualification des impacts sur la biodiversité, les centrales solaires au sol font l'objet de publications ciblant prioritairement les impacts liés aux emprises (installation), aux conséquences de la présence des panneaux et de la gestion des centrales (modifications possibles des cortèges végétaux) ainsi que les aspects relatifs aux pollutions physico-chimiques. Les retours d'expérience demeurent assez peu consolidés et la littérature analysée n'a pas permis, dans le contexte français, de dresser une liste des principaux habitats ou espèces les plus sensibles ou, au contraire, les moins sensibles, à l'installation et à la présence de parcs éoliens au sol. Les travaux menés dans le cadre du programme PIESO devraient permettre un partage de retours d'expérience sur l'intégration environnementale (impacts, mesures et suivi) de parcs photovoltaïques dans le contexte méditerranéen.

Les impacts sur les sols les mieux documentés (en termes de volumétrie et de pertinence) et évalués sont relatifs à l'emprise sur les sols, pouvant être significative dans le cas du solaire au sol (thermique et photovoltaïque), ainsi qu'au changement de température des sols engendrée par l'ombre des panneaux. Dans ce dernier cas, l'intensité des impacts est surtout fonction des conditions climatiques, plus que des choix d'installation et de la nature du site. Enfin, la contamination chimique des sols générée lors de l'extraction de certains matériaux utilisés dans les panneaux et systèmes de raccordement associés est un risque potentiellement significatif, mais qui n'est pas étudié dans les publications analysées. De tels travaux pourraient cependant être menés, afin d'allouer une part des impacts (notamment en termes de pollution des sols) générés par les activités d'extraction à la production d'énergie solaire.

En ce qui concerne les paysages, les impacts des centrales solaires au sol sont liés au site lui-même, à l'adéquation du projet avec ce site (agencement des panneaux, etc.) et à l'adéquation du projet avec la perception des populations locales, incluant les activités (notamment économiques) qui utilisent le paysage du territoire comme support. La notion de paysage de l'énergie permet, très en amont du projet, de réfléchir à la construction de nouveaux paysages, dont les centrales au sol seraient une composante, qu'il ne serait plus pertinent de remettre en cause. Les questions de visibilité deviennent secondaires et l'acceptation sociale, désamorcée par la planification à travers la création de ces paysages de l'énergie, devient plus naturelle.

En termes de méthodes d'évaluation des impacts sur la biodiversité la littérature s'appuie sur plusieurs guides méthodologiques et des approches classiques d'évaluation des impacts environnementaux (emprises au sol, modifications du fonctionnement des milieux).

Concernant les sols, les méthodes d'évaluation existantes varient selon l'impact considéré ; il peut s'agir de mesures effectuées sur site ou de modélisations (par exemple ACV). Néanmoins, les limites des méthodes (par exemple en ce qui concerne l'évaluation des surfaces utilisées de sols) sont peu connues et certains éléments de contexte ne sont pas indiqués dans les publications. Une lecture critique des résultats reste donc nécessaire pour conclure sur leur répliquabilité et représentativité, ainsi que leur caractère significatif ou non.

Les méthodologies d'évaluation des impacts sur les paysages sont largement tournées vers la visibilité. Ces méthodes basées sur des approches visuelles (par exemple, cartes de visibilité ou photomontages), ne permettent pas de rendre compte de toutes les composantes du paysage. Les enjeux d'acceptabilité sociale constituent en particulier des facteurs d'intégration essentiels de l'aménagement : leur évaluation est possible mais reste plus complexe, avec des résultats variables. Les méthodes économétriques permettent de faire ressortir des tendances mais la quantification d'un impact en lien avec ces tendances reste compliquée. Par ailleurs, une procédure de concertation est désormais obligatoire pour toute installation de plus de 250 kW. Cependant, les procédures de concertation et d'implication de la population peuvent encore être améliorées (avec des réunions publiques en amont des projets) pour limiter les tensions entre les différents acteurs et éviter le rejet du projet.

La comparaison entre les différentes technologies est peu traitée par la littérature. On peut néanmoins noter que les petits parcs au sol peuvent induire moins d'impacts sur le paysage que les grands parcs. En effet, ces derniers impactent de manière significative l'histoire du lieu et les ambiances paysagères. De plus, les impacts sur la biodiversité, les sols et les paysages des installations solaires sur bâti existant sont très peu traités dans la littérature analysée (sans enjeu particulier en comparaison aux installations solaires au sol).

Enfin, en ce qui concerne les **impacts des différentes étapes du cycle de vie**, les phases liées à la construction des panneaux, ainsi qu'au démantèlement et la fin de vie du projet sont très peu couvertes dans la littérature. Il existe pourtant certains enjeux potentiels, notamment sur les impacts des phases d'extraction de certaines technologies (par exemple, extraction de matériaux primaires pour les modules photovoltaïque CdTe) et des systèmes de raccordement (utilisateurs de cuivre, notamment),

4. Impacts de l'énergie éolienne terrestre

Ce chapitre présente une synthèse des impacts de l'énergie éolienne terrestre sur la biodiversité, les sols et les paysages identifiés lors de l'analyse bibliographique. Une attention particulière a été portée à la prise en compte du contexte géographique, temporel et institutionnel. Les résultats qualitatifs et quantitatifs sont mis en avant autant que possible, tout comme les méthodes d'évaluation de ces impacts. Les points de divergence et de convergence entre publications sont aussi identifiés.

Les technologies éoliennes utilisent l'énergie du vent pour la transformer en électricité. Les pales de l'éolienne tournent grâce à la force du vent et entraînent le rotor avec une moyenne de 10 à 25 tours par minute ; pour qu'une installation d'éoliennes soit rentable, la force, la fréquence et la régularité des vents doivent être étudiées. L'énergie éolienne est ensuite transformée en énergie électrique grâce à un générateur électrique fixé sur une nacelle. En moyenne en France, cette installation est actuellement située en haut d'un mat de 80 à 125 m de haut. L'énergie électrique produite par l'éolienne rejoint alors le réseau électrique par des câbles souterrains.

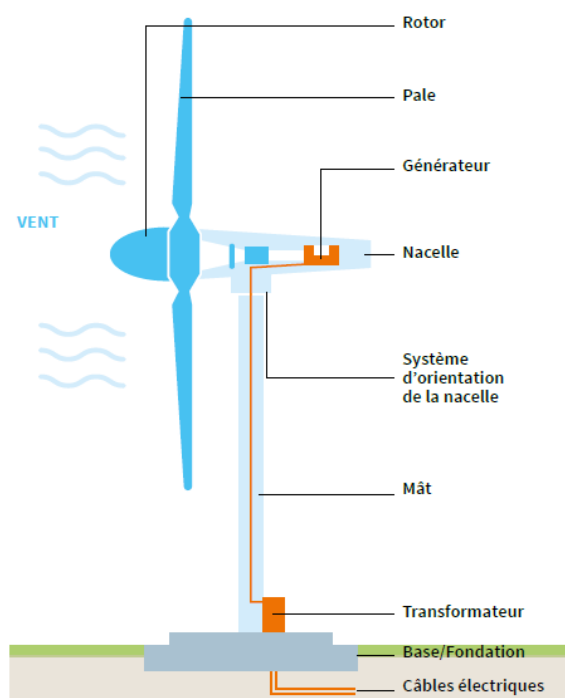


Figure 3 : Schéma de la composition d'une éolienne terrestre (ADEME, 2018)

La plupart des éoliennes actuellement installées en France sont des éoliennes tri pales à axe horizontal avec une puissance moyenne unitaire de 2 à 3 MW ; les parcs comprennent généralement moins de 20 éoliennes installées (en moyenne environ 6 éoliennes par parc en France). Cependant, de nouveaux projets sont développés avec des turbines de plus forte puissance : notamment le parc éolien « Mont des 4 Faux » dans les Ardennes, qui devrait accueillir une soixantaine d'éoliennes de 5 MW.

Différents types de générateurs existent : la technologie asynchrone à rotor bobiné (DFIG) (système utilisé pour la majorité des éoliennes et pouvant supporter de légères variations de la vitesse du vent) et la technologie synchrone, à rotor bobiné ou à aimants permanents (utilisant des terres rares). Les matériaux utilisés varient en fonction de la technologie éolienne et de l'aérogénérateur utilisé. Les fondations et le mât des éoliennes aux sols sont généralement en acier ou en béton ; les pâles sont constituées de matrice en résine thermodurcissable (polyester ou marge vinylester) et de renforts (fibres de verre) ; et les raccordements sont principalement en cuivre (ADEME, 2015).

Les technologies étudiées de production d'énergie éolienne terrestre incluent l'éolien d'une puissance unitaire supérieure à 250 kW (« grand éolien »). La majorité des impacts présentés dans les sections suivantes concerne des parcs éoliens constitués d'éoliennes de plus de 1 MW, déployé dans des zones peu voire non urbanisées.

4.1. Impacts de l'énergie éolienne terrestre sur la biodiversité

Les impacts environnementaux des installations de production d'énergie éolienne terrestre font l'objet d'une attention très importante de la communauté scientifique internationale depuis plus de 20 ans, impliquant une volumétrie de publications, articles, livres, actes de conférence extrêmement importante. Dans le cadre de la recherche bibliographique menée pour la présente mission, plus de 660 documents traitant des liens entre biodiversité et énergie éolienne terrestre ont été compilés. Parmi ces documents, plus d'une centaine de publications a été analysée en détail.

Il est cependant important de noter qu'en intégrant l'ensemble des actes de colloque, d'articles scientifiques, thèses, rapports de master, études d'impact et études de suivis de parcs éoliens terrestres en exploitation, plusieurs dizaines de milliers de documents pourraient aisément être rassemblés en Europe et dans le monde (Rydell, et al., 2017).

Ce constat a conduit à retenir une approche privilégiant la prise en considération de revues bibliographiques internationales et publications de référence. Aussi, dans le cadre de la présente étude, aucun rapport de suivi de parc en exploitation n'a été pris en considération, ni aucune étude d'impact. De tels documents peuvent avoir des intérêts dans la qualification et la quantification des impacts ; cependant, au regard de l'objet de cette étude une approche ciblant des publications de synthèse a été privilégiée. Il s'agit d'une limite méthodologique à prendre en considération à la lecture du document.

Parmi les démarches les plus importantes ayant trait aux liens entre énergie éolienne terrestre et biodiversité, peuvent être citées, de façon non exhaustive :

- La conférence internationale CWW (*Conference on Wind energy and Wildlife impacts*) ayant lieu tous les 2 ans, et dont la quatrième édition s'est tenue au Portugal en septembre 2017⁶⁰ et la cinquième édition est prévue fin août 2019 en Ecosse ;
- La plateforme collaborative WREN (*Working Together to Resolve Environmental Effects of Wind Energy*) créée par l'agence internationale de l'énergie (IEA Wind) en octobre 2012 et porté par les Etats-Unis (*Pacific Northwest National Laboratory, National Renewable Energy Lab* et le département américain de l'énergie *Wind Energy Technologies Office*). Cette plateforme vise à faciliter les collaborations internationales et l'amélioration de la compréhension des effets environnementaux de l'énergie éolienne (Sinclair, et al., 2018; Copping, et al., 2017). La France est l'un des 12 pays membres de WREN ;
- La base de données mondiale Tethys⁶¹, sur les effets environnementaux des énergies marines et de l'éolien qui a été mise en place dans le cadre de ces travaux collaboratifs supportés par l'Agence internationale de l'énergie et le *US department of Energy* (WREN et OES). Cette base de données spécifique, mais non exhaustive, ayant trait aux effets environnementaux (principalement biodiversité) des énergies marines renouvelables et de l'énergie éolienne, rassemble fin juin 2018 plus de 4 000 documents, dont plus de 2 000 pour l'énergie éolienne (terrestre et en mer) ;
- Les conférences, forums et webinaires réalisés par l'institut américain AWWI (*American wind wildlife institute*)⁶² et le forum américain NWCC⁶³ (*National Wind Coordinating Collaborative*) ;
- Le programme Eolien et biodiversité⁶⁴, coordonné par la LPO France et bénéficiant d'un appui financier de l'ADEME, qui met en place depuis plus de 10 ans diverses actions en France : des séminaires d'échanges et retours d'expériences, différentes actions de R&D, une compilation de ressources bibliographiques.

Les principaux effets sur la biodiversité documentés des installations de production d'énergie éolienne terrestre sont présentés dans les sections suivantes. Les références citées ne visent pas l'exhaustivité, mais une représentativité des connaissances et travaux en cours. Les références utilisées ont été retenues en fonction de leur pertinence vis-à-vis de l'objet de l'axe 1 : dresser un état de l'art des impacts environnementaux de l'énergie éolienne terrestre sur la biodiversité.

De très nombreuses publications et documents de référence ont été produits ces dernières années, principalement en Europe et en Amérique du Nord (Rydell, et al., 2017; Perrow, 2017a; Perrow, 2017b; Hötter, et al., 2017; Schuster, et al., 2015; Lindeboom, et al., 2015; May, et al., 2017; Gove, et al., 2013;

⁶⁰ <http://cww2017.pt/>

⁶¹ <https://tethys.pnnl.gov/>

⁶² <https://awwi.org/>

⁶³ <https://www.nationalwind.org/>

⁶⁴ <https://eolien-biodiversite.com/>

Smallwood, et al., 2017), mais également ailleurs dans le monde. Deux ouvrages de référence, fournissant un bilan exhaustif des effets potentiels de l'éolien terrestre sur la biodiversité ainsi qu'une synthèse complète des mesures de réduction d'impacts et de suivi, ont été réalisés en 2017 sous la coordination de Martin Perrow (Perrow, 2017a; Perrow, 2017b). Il s'agit, à ce jour, de la compilation bibliographique la plus large sur le sujet.

L'analyse exhaustive des papiers traitant des liens entre éolien terrestre et biodiversité est inenvisageable en raison de la volumétrie disponible et du dynamisme en termes de publications scientifiques (plusieurs dizaines à centaines chaque année). Aussi, de nombreuses références complémentaires auraient méritées d'être ici citées, mais n'ont pas pu être traitées dans le détail dans le cadre de la présente mission.

Les recherches et analyses bibliographiques réalisées dans le cadre de la présente étude révèlent une attention principalement portée aux phases de construction et d'exploitation des parcs éoliens terrestres. Les effets environnementaux des travaux de démantèlement sont souvent comparés à ceux des travaux de construction (impacts sur les substrats et milieux, présence d'engins, bruits, etc.) ; ils sont souvent peu détaillés dans les publications de référence.

Tout aménagement d'un parc éolien terrestre nécessite des travaux de construction, qui peuvent engendrer des impacts par destruction ou altération des habitats au niveau des zones de travaux, avec des impacts possibles sur des individus de flore et de faune.

En plus de ces impacts classiques pour tout aménagement, les parcs éoliens terrestres peuvent engendrer des impacts plus spécifiques qui relèvent de :

- Mortalité (collision et barotraumatisme) en phase de fonctionnement, qui concerne la faune volante (oiseaux et chiroptères) ;
- Perturbation de certaines espèces d'oiseaux ou de chiroptères en vol (« effet barrière », phénomènes d'attraction ou perturbations des activités de chasse et de déplacement) ;
- Perturbation des activités de certaines espèces d'oiseaux au sol par effet « déplacement », pouvant entraîner une perte d'habitats (de repos, d'alimentation et/ou de nidification).

Ainsi, lors des phases de construction, exploitation et démantèlement d'un parc éolien terrestre, les effets se placent dans quatre grandes catégories (Schuster, et al., 2015; Gove, et al., 2013) : mortalité par collision, perturbation de la faune volante (effet barrière), perturbation des activités au sol (effet déplacement) et perte d'habitats (par destruction de milieux). Certains auteurs regroupent les impacts concernant les déplacements d'activité au sol et les pertes d'habitats en une même catégorie.

Malgré le nombre très important de documents ayant trait aux liens entre biodiversité et éolien terrestre, très peu d'analyses concernent les phases préalables à la construction (fabrication des composants) et postérieure au démantèlement (fin de vie). Ces phases sont généralement abordées dans des publications traitant d'analyses de cycles de vie, principalement *via* les aspects de consommation de matériaux (pour la construction des équipements), de consommations énergétiques, d'émissions de gaz (notamment émission de CO₂) et de pollutions (acidification, écotoxicité) (Ghenai, 2012; Haapala, et al., 2014; Razdan, et al., 2015; Smoucha, et al., 2016; Chipindula, et al., 2018). Ces publications ne ciblent pas les milieux naturels, la faune et la flore, y compris certaines études très récentes concernant les éoliennes terrestres (Chipindula, et al., 2018). Des éléments complémentaires, notamment sur le potentiel d'acidification, sont disponibles en section 4.2 relative aux impacts sur les sols.

Il est important de noter que, malgré la relative maturité du développement des installations éoliennes terrestres, la communauté scientifique continue à travers le monde à affiner la compréhension des mécanismes influençant les impacts de ce type d'EnR sur la biodiversité. De nombreux auteurs insistent sur les spécificités des sites de développement, des espèces voire des individus, identifient les axes de compréhension et recherche complémentaires et prônent une approche basée sur la gestion adaptative des parcs éoliens terrestres (Köppel, et al., 2014; Schuster, et al., 2015; May, et al., 2017; Sinclair, et al., 2018; Gartman, et al., 2016).

L'intégration en amont, le plus tôt possible dans les étapes de planification et pré-construction, des enjeux environnementaux constitue un pilier des recommandations de la communauté scientifique (Schuster, et al., 2015; Gartman, et al., 2016; May, et al., 2017; Perrow, 2017a; Perrow, 2017b). Cela se traduit par de nombreux travaux s'attachant à la spatialisation des enjeux environnementaux (biodiversité, en l'occurrence) et de vulnérabilité biologique prévisible (Gartman, et al., 2016; Hanssen, et al., 2018; Bright, et al., 2008; Noguera, et al., 2010; Liechti, et al., 2013; Miller, et al., 2014; Vasilakis, et al., 2016; Gove, et al., 2016).

Par ailleurs, pour le développement de l'énergie éolienne terrestre plus que pour tout autre type d'EnR, la prise en compte des effets cumulés à l'échelle de vastes territoires est présentée par plusieurs auteurs comme une échelle d'analyse à privilégier (Roscioni, et al., 2013; May, et al., 2017; Sinclair, et al., 2018). Des éléments complémentaires sont fournis en section 4.3 relative aux impacts sur les paysages. Pour rappel, comme tout projet d'aménagement, les projets de parcs éoliens terrestres sont soumis à autorisation préalable. En France, les projets concernés par le champ de cette étude sont systématiquement soumis à la réalisation d'une étude d'impact conformément aux dispositions du Code de l'environnement. Les moyens mis en œuvre pour la prise en compte de la biodiversité dans le cadre du développement de projets éoliens en France sont importants, comparativement à d'autres types d'aménagement. La séquence « éviter, réduire, compenser » est généralement particulièrement développée dans les dossiers relatifs à ces aménagements.

4.1.1. Destruction / altération des habitats, modifications des milieux

Comme toute infrastructure, la construction d'un parc éolien terrestre nécessite des travaux de terrassement, nivellement et de voirie : construction des fondations, des plateformes, élargissement ou création d'accès, réseaux électriques enterrés, poste électrique, zones de stockage. Dans certains types de milieux humides, des effets de drainage sont également possibles (voir le cas de développement de projets en Ecosse) (Wawrzyczek, et al., 2018) ; les parcs éoliens terrestres français ne sont néanmoins en pratique pas développés dans ce type de milieux. Les effets peuvent se maintenir pendant plusieurs années après construction, toute la durée d'exploitation voire au-delà, selon les aménagements.

Comme tous travaux d'aménagement, la construction des parcs éoliens terrestres peut engendrer des impacts directs sur la faune par perturbation, dérangement sonore, visuel ainsi que par destruction ou altération d'habitats (notamment défrichement, arrachage de haies, décapage de terre végétale, etc.).

Les travaux impliquant des coupes ou des arasements de végétations, ainsi que le terrassement de terre végétale peuvent engendrer des destructions directes d'animaux terrestres ou d'oiseaux nichant au sol, si les travaux sont réalisés en période de nidification. Les bruits et activités des engins de construction peuvent, de leur côté, engendrer des perturbations et gênes comportementales d'espèces d'oiseaux ou d'autre faune (voir section 4.1.2).

Les effets directs et indirects sur les végétations et habitats sont assez peu documentés dans la littérature analysée. Une synthèse spécifique sur ce sujet a été récemment réalisée (Silva, et al., 2017 cité dans Perrow (2017a)) et des études spécifiques sont menées à l'échelle mondiale (Xia, et al., 2017). Parmi les principaux effets documentés, la destruction directe de milieux d'espèces ou d'habitats importants sur le plan fonctionnel ressort, ainsi que la dégradation de milieux lors des travaux (accès, impacts indirects). Comme tous types de travaux de construction nécessitant des terrassements, l'introduction ou la dispersion d'espèces invasives est une problématique.

Comme toute activité avec des altérations ou destructions localisées de milieux, des impacts sur tous les groupes faunistiques sont possibles (invertébrés et vertébrés). Ces impacts possibles sont généralement bien appréhendés dans le cadre du développement des projets éoliens terrestres, via la minimisation des emprises, l'évitement de milieux de fort intérêt biologique ou fonctionnel, etc.

Les parcs éoliens terrestres présentent des capacités d'ajustement importantes (positionnement des éoliennes, emprises globalement faibles) qui, sauf en cas de fortes contraintes techniques ou topographiques permettent de limiter très fortement les impacts de construction. La majorité du parc éolien en France est développée sur des terres agricoles (environ 83 % des installations selon ADEME, I Care & Consult, Blézat consulting, CERFrance, Céréopa (2017)). Dans ces contextes, les besoins de construction de nouveaux accès sont limités (utilisation, au moins partielle, de chemins existants).

Les effets de construction d'un parc éolien terrestre sur la biodiversité sont très spécifiques aux sites de développement (caractéristiques des milieux concernés) et aux caractéristiques du parc éolien (nombre d'éoliennes, dimensions des plateformes, modalités d'accès, etc.). Ils ne sont pas généralisables à l'échelle de la filière. Ce type d'impacts est particulièrement analysé dans le cadre des études d'impact relatives à tout projet éolien terrestre.

4.1.2. Dérangement des individus et modification des activités

En phase travaux

En phase de construction, la présence des engins, les bruits de travaux peuvent engendrer des perturbations des activités d'individus d'espèces de faune présents. Il est généralement admis que les travaux de démantèlement présentent des caractéristiques similaires (bruits, présence d'engins, mouvements).

Bien que la majorité des études concernant les effets des parcs éoliens terrestres sur l'avifaune s'attache à la phase d'exploitation, plusieurs études ont ciblé plus spécifiquement les impacts en phase de construction (voir notamment (Schuster, et al., 2015; Pearce-Higgins, et al., 2012)).

Chez certaines espèces, des perturbations en période de nidification peuvent engendrer l'abandon du nid et l'échec de la reproduction. De nombreuses espèces semblent cependant peu dérangées par la construction de parcs éoliens terrestres, voire en tirent profit (Schuster, et al., 2015; Pearce-Higgins, et al., 2012; Devereux, et al., 2008). Une étude basée sur certains parcs au Royaume-Uni (Pearce-Higgins, et al., 2012) indique des diminutions d'activité par déplacement de certaines espèces lors de la phase de construction (Courlis cendré) mais également des augmentations de densité de certaines espèces de passereaux.

Cependant, les principales références bibliographiques traitant des effets de la construction des parcs éoliens terrestres sur les oiseaux ne mettent pas en avant d'effets génériques, transposables à toutes les espèces d'oiseaux ou à tous les parcs éoliens (Rydell, et al., 2017; Schuster, et al., 2015). Les impacts en phase travaux sont liés aux milieux, aux espèces présentes et à la nature des activités (parades, nidification, hivernage, alimentation, repos, etc.). En effet, certaines espèces d'oiseaux peuvent être nettement plus sensibles aux activités et travaux proches de leurs zones de repos ou d'alimentation (notamment parmi les familles des anatidés, des limicoles, des rapaces).

Les travaux de construction d'un parc éolien terrestre s'échelonnent souvent entre six mois et un an, parfois davantage pour de grands parcs éoliens. La qualification et la quantification des impacts en phase de construction est complexe à étudier : durée de suivi courte ne permettant pas de gommer les évolutions interannuelles, complexité pour isoler les autres facteurs d'influence.

Les effets de perturbations de la faune en phase travaux sont assez peu documentés dans la littérature pour les parcs éoliens terrestres. Les effets ne sont pas ici spécifiques à l'éolien, mais similaires à ceux induits par tout aménagement (présence d'engins de construction, bruits, etc.). Ces effets sont très spécifiques à chaque site de projet, aux caractéristiques des aménagements et à la sensibilité des espèces.

En phase d'exploitation (effets déplacement, effet barrière et bruit)

La perte ou l'altération d'habitats induites par la phase de construction peuvent perdurer et amener, à moyen terme, une perte d'habitat. Pour la grande majorité des parcs éoliens terrestres, ces pertes d'habitats sont de faible superficie (la qualité des milieux détruits doit cependant être considérée, au-delà de la simple notion de surface impactée).

En phase d'exploitation, ce sont principalement des réactions d'éloignement des abords des éoliennes par les oiseaux qui peuvent engendrer des pertes d'habitats.

Les phénomènes de déplacement peuvent présenter plusieurs niveaux d'intensité, mais se traduisent généralement par une réduction plus ou moins forte des activités à proximité des éoliennes (distances variables selon les espèces et les sites), pouvant être assimilé, dans les cas les plus marqués, à une perte d'habitats par phénomène d'aversion. Cela peut concerner les activités de stationnement, d'alimentation, de nidification ainsi que les activités de vol (« effet barrière »). L'évitement strict ou presque total des abords d'éoliennes est très rarement observé.

Les effets de la présence des éoliennes terrestres sur la distribution, la densité et les activités des oiseaux ont été étudiés par de nombreux auteurs depuis une vingtaine d'années (Hötter, et al., 2006; Devereux, et al., 2008; Pearce-Higgins, et al., 2009). Les réactions des oiseaux à la présence d'un parc éolien sont très variables selon les sites, les espèces voire entre les individus d'une même espèce (Schuster, et al., 2015; Hötter, et al., 2006; May, et al., 2015). Par exemple, de nombreuses espèces de rapaces sont considérées comme peu ou pas sensibles à la présence d'éoliennes que ce soit pour les activités de vol (effet barrière) ou les activités au sol (effet déplacement) (Hötter, et al., 2017), entre

autres le Faucon crécerelle, la Buse variable, les milans. *A contrario*, d'autres espèces de rapaces montrent des altérations des activités de vol à proximité de parcs éoliens (Aigle royal) (Itty, et al., 2017). Par ailleurs, des groupes d'oiseaux, notamment les anatidés et limicoles, sont considérés comme globalement sensibles à l'effet déplacement (perte d'habitats) en phase d'exploitation, qui peut amener à des diminutions d'activité de repos et/ou d'alimentation sur quelques centaines de mètres autour d'éoliennes (Rydell, et al., 2017; Schuster, et al., 2015; Gove, et al., 2013). Certaines espèces de passereaux chanteurs semblent également subir des réductions de densité à proximité de parcs éoliens, mais ces effets sont souvent délicats à étudier (Bastos, et al., 2016; Farfán, et al., 2017). Certains auteurs (Zwart, et al., 2016) indiquant un impact négatif du bruit produit par les éoliennes sur la territorialité des espèces de passereaux chanteurs comme le Rouge gorge, sans réellement quantifier de distances d'impact.

De nombreuses études et synthèses traitant d'une espèce en particulier ou de quelques espèces ont été réalisées au Royaume-Uni ou aux Etats-Unis notamment. Ces études et leurs résultats montrent qu'il n'est pas évident de généraliser les réactions d'une espèce d'oiseau donnée à l'implantation d'un parc éolien terrestre.

Les raisons pour lesquelles certaines espèces montrent ces comportements d'évitement des abords des éoliennes sont assez mal comprises (perçues comme une menace en elle-même ou bien comme un support possible pour des oiseaux de proie) (Schuster, et al., 2015). La prise en considération des effets cumulés d'éventuelles lignes électriques associées est un enjeu dans certains pays (Smith, et al., 2016), mais pas en France où ces lignes sont généralement enterrées.

Des effets d'accoutumance à la présence d'éoliennes ont été mis en évidence sur certaines espèces sensibles, notamment des oies. Cela se traduit par une réduction des distances d'éloignement moyennes observées au fil des années après construction (Reichenbach, 2017). Il n'existe cependant pas de consensus actuellement sur les effets d'accoutumance, qui peuvent par ailleurs être influencés par la hauteur des éoliennes (l'effet « épouvantail » pourrait être plus important pour les grandes éoliennes, mais sur ce point également les avis divergent) (Schuster, et al., 2015; Hötter, et al., 2006).

L'exploitation d'un site par l'avifaune est déterminée par de nombreux paramètres, notamment la qualité des habitats, la structure de l'habitat, la hauteur de végétation, les ressources alimentaires, les perturbations anthropiques, etc. Il peut s'avérer difficile de faire ressortir les effets directement imputables aux éoliennes.

Concernant les chiroptères, l'essentiel des travaux de recherche et publications des 15 dernières années concerne les risques de mortalité (collision ou barotraumatisme⁶⁵) ainsi que les comportements des chiroptères pouvant influencer ces risques (périodes d'activité, conditions météorologiques). Des résultats d'étude montrent que les risques de mortalité sont plus élevés en ce qui concerne les migrants que les chiroptères locaux (Lehnert, et al., 2014; Voigt, et al., 2015; Voigt, et al., 2012). Les effets de la présence d'éoliennes sur les activités des chiroptères à proximité des éoliennes (à plusieurs centaines de mètres autour) constituent un nouvel axe de recherche actuellement prioritaire, en France métropolitaine (Barré, 2017; Millon, et al., 2015; Millon, et al., 2018) et ailleurs dans le monde (Millon, et al., 2018; Minderman, et al., 2017). Il semblerait, d'après certaines études, que plusieurs espèces de chiroptères montrent des activités plus faibles à proximité des éoliennes (quelques centaines de mètres). Parallèlement, plusieurs auteurs mettent en évidence une certaine attractivité des éoliennes et des comportements de recherche alimentaire directement au contact des mâts ou dans le volume brassé par les pales (Cryan, et al., 2014; Foo, et al., 2017). D'autres hypothèses ont été ou sont étudiées comme l'attractivité indirecte liée à des mouvements et l'émergence d'essaims d'insectes de façon saisonnière qui sont en forte concordance avec les phénomènes climatiques comme les hautes pressions atmosphériques (Rydell, et al., 2010). Sur ce dernier point (Long, et al., 2011) ont travaillé sur l'effet possible de la couleur des éoliennes sur l'attractivité des insectes. En l'état des connaissances et éléments mis en évidence, il n'est pas possible de généraliser et d'anticiper les effets de la présence d'éoliennes terrestres sur les activités des chiroptères et leur population. Des études complémentaires sont ainsi nécessaires pour mieux comprendre les facteurs influençant les activités des chiroptères à proximité des éoliennes (Minderman, et al., 2017; Barré, 2017; Millon, et al., 2018).

Quelques documents identifiés traitent spécifiquement des effets de la présence de parcs éoliens terrestres sur les mammifères terrestres (Łopucki, et al., 2017; Łopucki, et al., 2018a; Łopucki, et al., 2018b; Lovich, et al., 2013; Kikuchi, 2008; Perrow, 2017a). Les effets possibles documentés pour ces

⁶⁵ Traumatisme causé par une variation brutale de pression (ici : traumatisme causé sur des chiroptères à proximité de pales d'éoliennes en mouvement)

espèces concernent, comme pour tout aménagement, les impacts directs et indirects en phase travaux (destruction de milieux et mortalité d'individus, perturbations sonores et visuelles).

L'effet déplacement et l'effet barrière liés à la présence d'éoliennes en milieu terrestre font l'objet d'études depuis plus de 20 ans, principalement en Europe et Amérique du Nord. La littérature permet de mettre en évidence les principales espèces et groupes d'espèces considérés comme sensibles à ces effets (parmi les oiseaux notamment). Ces effets demeurent cependant très variables en fonction des sites, des caractéristiques du parc éolien, des espèces voire entre les individus d'une même espèce. Les perturbations d'activités de chiroptères à proximité d'éoliennes terrestres font également l'objet de publications récentes, appelant à poursuivre la compréhension des mécanismes associés.

4.1.3. Blessures ou mortalité d'individus (en phase d'exploitation)

Les risques de blessure ou de mortalité d'individus d'espèces de faune volante (oiseaux et chiroptères) avec les pales des éoliennes constituent le type d'impact qui focalise le plus l'attention. Cependant, toutes les espèces d'oiseaux et de chiroptères ne présentent pas les mêmes probabilités de collision avec les éoliennes (Schuster, et al., 2015; Marques, et al., 2014; Perrow, 2017a).

Les risques de collision sont dépendants de très nombreux paramètres. Ces risques sont très variables selon l'intérêt avifaunistique du site (espèces présentes, densités, types d'activités, etc.), les caractéristiques des éoliennes et leur fonctionnement, les conditions météorologiques, les caractéristiques de l'espèce considérée (envergure, hauteur de vol, temps passé en vol, manœuvrabilité) ainsi que d'autres phénomènes comme l'évitement des éoliennes. Trois types de comportement d'évitement des éoliennes par les oiseaux sont recensés par la bibliographie : le macro-évitement (longue distance, évitement du parc éolien), le méso-évitement (évitement des éoliennes ou lignes d'éoliennes au sein du parc) et le micro-évitement (évitement des éléments de l'éolienne, notamment les pales) (May, 2015).

De nombreux auteurs (Marques, et al., 2014; Schuster, et al., 2015; Masden, et al., 2016; Tabassum, et al., 2014; May, 2015; May, et al., 2015; Perrow, 2017a) relèvent que les risques de collision sont influencés par :

- Des paramètres propres à la zone géographique où est implanté le parc éolien : topographie, conditions météorologiques et de visibilité, proximité de secteurs de fort intérêt ornithologique (nidification, alimentation, regroupement), proximité de voies migratoires, ressources alimentaires ;
- Des paramètres intrinsèques au parc éolien : nombre d'éoliennes, caractéristiques des éoliennes (hauteur du mât, diamètre du rotor, dimensions et forme des pales, profil de fonctionnement des pales), disposition des éoliennes, visibilité des pales, balisage et éclairages ;
- Des paramètres liés aux activités et aux caractéristiques des animaux volants : abondance des oiseaux ou chiroptères en vol, périodes de présence, type d'activité (migration, recherche alimentaire, nidification, etc.), proportion d'activités nocturnes, caractéristiques morphologiques (envergure), type de vol, temps passé en vol, réactions à proximité d'éoliennes et comportements d'évitement, etc.

Par ailleurs, il est important de considérer les spécificités individuelles. En effet, pour un même parc éolien, les comportements et réactions peuvent être très variables entre les individus d'une même espèce (May, 2015; Schuster, et al., 2015).

Les risques de collision sont très variables selon les espèces, leurs comportements, les caractéristiques des éoliennes, du parc, son emplacement, etc.

Les risques de collision peuvent concerner des oiseaux toute l'année, avec des pics lors des périodes de migration (Schuster, et al., 2015; Marx, 2017). Le risque de collision est généralement considéré plus fort avec l'augmentation de l'abondance des oiseaux (multiplication des risques individuels) bien que cette hypothèse ne fasse pas consensus pour tous les auteurs et tous les groupes d'espèces (De Lucas, et al., 2008; Marques, et al., 2014; Schuster, et al., 2015; Perrow, 2017a). La littérature analysée ne permet cependant pas de hiérarchiser les conditions météorologiques ou d'autres paramètres

influençant, de façon générale, les risques de mortalité. Les risques de collision sont liés à un ensemble très large de paramètres concernant le site d'installation et ses abords (intérêt pour la faune volante), les caractéristiques du parc éolien, les conditions météorologiques, etc.

Une attention très forte est portée en Europe et dans le monde aux risques de collision concernant les rapaces, notamment des espèces rares ou emblématiques comme l'Aigle royal, le Pygargue à queue blanche ou les vautours (De Lucas, et al., 2008; Marques, et al., 2014; Schuster, et al., 2015; Rydell, et al., 2017; Hötker, et al., 2017; Smallwood, et al., 2017; Smallwood, 2013; Watson, et al., 2018; Perrow, 2017a). Toutefois, les retours de suivis et la majorité des études réalisées en France et en Europe indiquent que ce sont les passereaux migrateurs, notamment ceux migrant de nuit, qui forment l'essentiel des cas de collisions recensés (Marx, 2017; Grunkorn, et al., 2017; Aschwanden, et al., 2018). Ceci est à rattacher à plusieurs aspects : d'une part, les effectifs souvent conséquents de nombreuses espèces de passereaux, en comparaison des rapaces (à l'exception, en France, de la Buse variable et du Faucon crécerelle). D'autre part, l'implantation des parcs éoliens est majoritairement réalisée à l'écart des secteurs de forte activité des grands rapaces (aigles, milans royaux, vautours) ce qui limite les risques.

A ce propos, une base de données de cas de collision d'oiseaux et de chiroptères recensés en Europe est tenue à jour par Tobias Dürr (Allemagne)⁶⁶. Les informations remontées sont basées sur le volontariat et ne peuvent être considérées comme exhaustives. Cette base fournit cependant une indication des principales espèces sujettes à collision. Elle montre également une distorsion des nombres de cadavres recensés, avec une surreprésentation probable (par rapport au ratio des collisions effectives) des cas de collision des rapaces par rapport à d'autres groupes d'espèces. En effet, les rapaces suscitent généralement une plus grande attention et les informations concernant des collisions sont plus souvent transmises que pour des espèces de passereaux communs, par exemple.

Concernant les chiroptères, au-delà de la mortalité d'individus en transit, de nombreux travaux sont menés sur l'attractivité des éoliennes terrestres pour certaines espèces de chiroptères : approche des éoliennes par des animaux en recherche alimentaire, attractivité de ces structures hautes pour des espèces forestières (Horn, et al., 2008; Cryan, et al., 2014; Jameson, et al., 2014; Schuster, et al., 2015; Rydell, et al., 2016). Par ailleurs, l'influence des dimensions des éoliennes sur les risques de collision des chiroptères n'est pas bien appréhendée, certains auteurs indiquant une influence (mortalité plus importante pour des grandes éoliennes) (Loss, et al., 2013; Schuster, et al., 2015) (Barclay, et al., 2007 cité dans Thompson, et al. (2017), tandis que d'autres études ne mettent pas en évidence de lien (Schuster, et al., 2015; Thompson, et al., 2017). Les difficultés à caractériser les impacts par mortalité dans le cadre des études préalables à la construction de parcs éoliens a été mise en évidence (Lintott, et al., 2016), une attention forte étant portée sur les effets cumulés possibles des parcs éoliens sur les populations de certaines espèces migratrices (Frick, et al., 2017; Lehnert, et al., 2014). De nombreux facteurs affectent les risques de mortalité des chiroptères, dont les activités de vol sont fortement influencées par les conditions météorologiques (vitesse du vent, température, pluviométrie) ou encore la proportion de milieux ouverts à proximité des éoliennes (Thompson, et al., 2017). Les niveaux de mortalité, et par la même la sensibilité des espèces, sont nettement corrélés au temps passé à des hauteurs supérieures à 25 mètres, qui lui-même est lié aux capacités et techniques sonars des différentes espèces (Roemer, et al., 2017; Roemer, 2018).

Des outils de minimisation des risques de collision des oiseaux et des chiroptères existent ou sont en développement. Pour les oiseaux, les approches les plus largement mises en œuvre actuellement étant basées sur un suivi en temps réel (par caméras et/ou radar) avec, dans le cas de situations à risques, soit des déclenchements d'effaroucheurs sonores, soit un ralentissement voir un arrêt des éoliennes. Pour les chiroptères, les mesures de réduction des risques se basent principalement à ce jour sur une adaptation du fonctionnement des éoliennes (arrêts ciblés) lors de conditions météorologiques favorables à la migration ou à l'activité des chiroptères ; des dispositifs basés sur un suivi en temps réel sont en développement.

La détermination du nombre de cas de collision d'oiseaux et de chiroptères par an à l'échelle d'un parc éolien constitue un exercice complexe, qui requiert des données précises et des efforts de recherche importants. En France, un suivi de la mortalité des parcs éoliens est obligatoire depuis août 2011. L'obligation réglementaire de versement des données brutes de biodiversité en France (article L411-1A du Code de l'environnement issu de la loi du 8 août 2016) devrait permettre, à moyen terme, de disposer de volumes de données conséquents.

⁶⁶ <https://fu.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.312579.de>

En phase d'étude préalable, le recours à des modèles d'évaluation des risques de collision est relativement régulier dans certains pays (anglo-saxons notamment) : ces modèles permettent de fournir une estimation prédictive des risques de collision, mais nécessitent de très importants volumes de données entrantes précises (densités d'oiseaux en vol, hauteurs de vol, périodes, etc.). Des synthèses complètes et détaillées des modèles de collision, leurs caractéristiques, les avantages et limites de leur utilisation ont été récemment publiées (Masden, et al., 2016) (Smales, 2017 cité dans Perrow (2017a)). La validité de l'utilisation des modèles de collision sur les parcs éoliens terrestres a été testée sur plusieurs sites (Smales, 2017 cité dans Perrow (2017a)), la plus vaste étude sur ce sujet ayant été menée en Allemagne dans le cadre du projet PROGRESS (Grünkorn, et al., 2016) concernant le modèle de risque de collision élaboré par Band (2012). Il en ressort des décalages parfois importants entre les mortalités réellement constatées et les estimations issues des modélisations à partir du modèle de Band, avec une tendance majoritaire à la sous-estimation des risques par le modèle de Band. Les auteurs indiquent, comme déjà mis en évidence par d'autres publications (Chamberlain et al., 2006 ; May et al., 2010, 2011 cités dans Grünkorn, et al. (2016)) que, d'une part, les modèles de collision nécessitent des quantités importantes de données d'observation pouvant être parfois complexes à compiler (estimations de densités oiseaux en vol et comportements des oiseaux en vol notamment) et, d'autre part, que de nombreux paramètres d'incertitude (paramètres comportementaux notamment) sont mal pris en compte dans le modèle de Band. Une publication de synthèse (Masden, et al., 2016) récente fournit une analyse critique des caractéristiques, qualités et limites d'une dizaine de modèles de collision utilisés à travers le monde. En France, le recours aux modélisations des risques de collision pour les parcs éoliens terrestres est très peu développé. Concernant les chiroptères, (Roemer, et al., 2017) proposent un index de sensibilité et (Roemer, 2018) dans sa thèse donne des pistes permettant d'évaluer les risques de collision.

En phase d'exploitation, de nombreux parcs éoliens terrestres font l'objet de suivis de mortalité. De tels suivis sont obligatoires en France, et font l'objet d'un protocole national cadrant leur mise en œuvre⁶⁷. Ce protocole national est basé, dans sa version 2018, sur la réalisation de recherche de cadavres autour des éoliennes, suivant des transects parcourus par des observateurs avec un pas de temps régulier (au moins une fois par semaine) et *a minima* entre mi-mai et mi-octobre. Les données collectées ainsi que les résultats de tests de correction obligatoires (efficacité de recherche et vitesse de disparition des cadavres) servent à estimer les mortalités réelles par l'utilisation de formules mathématiques. Plus de 10 formules de calcul de la mortalité induite par les éoliennes terrestres ont été élaborées dans le monde, chacune présentant des spécificités, points forts et points faibles tel que montré par des publications de synthèse (Bernardino, et al., 2013; Korner-Nievergelt, et al., 2015; Masden, et al., 2016). Ces formules d'évaluation de la mortalité permettent de passer d'une mortalité constatée (nombre de cadavres retrouvés lors d'un suivi) à une mortalité estimée (prenant en compte les durées entre les sessions de recherche, la vitesse de disparition des cadavres, par prédation notamment, les taux de détectabilité selon les végétations et l'efficacité de recherche, les superficies couvertes, etc.). A l'heure actuelle, il n'existe pas une formule d'estimation de mortalité universelle bien que des travaux en ce sens soient menés, notamment par Huso, Dalharp et Korner-Nievergelt.

Les évaluations de mortalité induites par les parcs éoliens terrestres sont complexes et sujettes à de nombreuses limites d'interprétation : fiabilité et représentativité des données issues des suivis de mortalité, caractère extrapolable à de vastes territoires géographiques. Plusieurs estimations de mortalité ont été réalisées aux Etats-Unis mais les résultats varient énormément selon les méthodes et données utilisées (Smallwood, 2013; Loss, et al., 2013; Roscioni, et al., 2013; Wang, et al., 2015b).

Une synthèse récente (Marx, 2017), partielle mais unique en France par son échelle de travail, a fourni des premières indications sur les principales espèces d'oiseaux recensées lors de suivis de mortalité en France ainsi que concernant les nombres de cas de collision recensés ou calculés sur des éoliennes à l'échelle française, avec une attention plus spécifique sur des parcs proches de sites Natura 2000. Cette étude indique que six espèces constituent une proportion importante des cadavres retrouvés sur les parcs pris en compte : Roitelet triple-bandeau, Martinet noir, Faucon crécerelle, Mouette rieuse, Alouette des champs et Buse variable. Une estimation de la mortalité réelle a été réalisée sur huit parcs, la mortalité réelle estimée dans les rapports varie de 0,3 à 26,8 oiseaux tués par éolienne et par an, la médiane s'établissant à 4,5 et la moyenne à 7,0.

Pour les chiroptères, si l'on tient compte de l'abondance des espèces pour relativiser la proportion des pipistrelles retrouvées impactées, ce sont les espèces migratrices de haut vol comme les noctules qui sont le plus touchées.

⁶⁷ Protocole d'avril 2018

L'évaluation des nombres de cas de collision réels d'oiseaux et de chiroptères par éolienne et par an est un exercice particulièrement complexe, soumis à de nombreux paramètres pouvant affecter la qualité et la fiabilité des estimations. Il n'existe, à l'heure actuelle, aucun référentiel faisant consensus relatif au nombre moyen réel de collision d'oiseaux et de chiroptères par éolienne et par an, à l'échelle de la France ou bien pour d'autres régions géographiques. La standardisation des protocoles de suivis des parcs éoliens terrestres et l'obligation de suivis en France pourraient permettre de disposer, à moyen terme, de jeux de données suffisamment larges, robustes et comparables pour tenter d'évaluer des nombres réalistes de cas de collision par an et par éolienne à l'échelle française ou par sous-régions biogéographiques.

La réduction des risques de mortalité par collision constitue un axe de travail et recherche important. Des mesures et outils visant à réduire les risques de mortalité sont d'ores et déjà mis en œuvre (par exemple : arrêt ciblé du fonctionnement des éoliennes lors de périodes de forte activité de chiroptères). Des techniques visant à réduire les risques de mortalité pour les oiseaux existent ou sont en développement (basées sur des suivis en temps réel, couplé à des effaroucheurs voire un arrêt des éoliennes).

Les phénomènes de mortalité de la faune volante (oiseaux et chiroptères) induits par le fonctionnement des parcs éoliens terrestres (choc avec les pales en mouvement, barotraumatisme) sont très largement développés dans la littérature et constituent le principal impact traité. Malgré de nombreuses publications spécifiques, les facteurs influençant l'importance des collisions et chocs demeurent cependant encore partiellement compris notamment pour les chiroptères. Des modèles d'estimation des collisions existent mais nécessitent de très grandes quantités de données, gèrent parfois difficilement les incertitudes et sont rarement mis en œuvre en France pour l'éolien terrestre. Des suivis de la mortalité sont obligatoires en France et peuvent permettre d'estimer les mortalités réelles des oiseaux et chiroptères via l'utilisation de modèles mathématiques. Ces estimations demeurent délicates et nécessitent une grande robustesse de mise en œuvre dans les suivis. Par ailleurs, il n'existe pas de référentiel permettant de préciser finement les mortalités moyennes en France, ou à l'échelle de régions. Au-delà des effectifs impactés, il convient de s'attacher à l'évaluation des conséquences des mortalités sur l'état de conservation et les dynamiques des populations, qui implique un traitement différencié, par espèce (statuts de rareté, stratégie de reproduction, âge de première reproduction, évolution de l'état de conservation, etc.).

4.1.4. Modifications des paramètres environnementaux

Les caractéristiques des parcs éoliens terrestres en France ne conduisent pas à identifier d'effets spécifiques concernant les aspects relatifs à la modification de paramètres environnementaux (par exemple, la littérature ne soulève pas de problématique particulière de champs électromagnétiques au regard de l'enfouissement des câbles de raccordement électrique). Des éléments relatifs aux impacts sur les sols sont évoqués en section 4.2.

A noter que la phase d'extraction de certains matériaux utilisés dans les éoliennes terrestres peut avoir un impact non négligeable sur la pollution des sols et de l'eau. Ces impacts ne sont cependant pas étudiés dans le cadre spécifique de structures EnR, ainsi qu'expliqué en section 4.2.3.

4.1.5. Méthodes d'évaluation des impacts, méthodes de suivi et incertitudes

La maturité de la technologie éolienne, l'ancienneté des parcs terrestres ainsi que l'existence de nombreux suivis et de plusieurs démarches collaboratives, offrent une base de connaissances exceptionnellement riche sur les effets de l'éolien terrestre sur la biodiversité.

De nombreuses publications de synthèse ainsi que des livres et actes de conférence de haut niveau technique et scientifique ont été publiés ces dernières années. Ils offrent des niveaux de détail ne pouvant pas être repris ici.

A l'échelle française, le guide méthodologique relatif à l'éolien terrestre a été actualisé en 2016 sous l'égide du Ministère de l'environnement (MEEM, 2016). Ce guide fournit des recommandations et un cadre national sur les méthodes d'expertises et évaluation des impacts. Des guides et déclinaisons régionales ont été élaborés ou sont en cours d'élaboration dans plusieurs régions françaises. Les

recommandations détaillées de ces guides et déclinaisons ne peuvent pas être reprises ici, mais constituent un cadre méthodologique établi pour l'élaboration de l'état initial et l'environnement, base de l'évaluation des impacts des projets de parcs éoliens terrestres sur la biodiversité. En termes de suivis des impacts par collision, un protocole national de suivi, validé en avril 2018, cadre la réalisation des suivis et l'exploitation des données.

Il existe de nombreuses méthodes et modèles visant à évaluer les effets des projets de parcs éoliens terrestres sur la biodiversité, une majorité d'entre eux ciblant les oiseaux et chiroptères. Ces modèles concernent, en premier lieu, l'évaluation des mortalités (collision de la faune volante) et des perturbations (effet déplacement) (voir détails dans les sections 4.1.2 et 4.1.3). Deux synthèses récentes des méthodes d'évaluation quantitative des impacts de l'énergie éolienne sur les oiseaux et les chiroptères ont été publiées (Laranjeiro, et al., 2018; Sinclair, et al., 2018). Les auteurs y présentent des synthèses de divers modèles existants : modèles de risques de collision, modèles de distribution des espèces, modèles ciblant les populations d'espèces ou les individus. Ils rappellent également l'existence de plusieurs indices de vulnérabilité spécifiques à la mortalité, aux perturbations et/ou aux pertes d'habitats.

Malgré les incertitudes qui demeurent sur la compréhension des phénomènes expliquant certains impacts, plusieurs auteurs (Laranjeiro, et al., 2018; May, et al., 2017) préconisent un accroissement du partage des informations, retours d'expérience ainsi qu'une approche de l'évaluation des impacts non uniquement centrée sur chaque projet mais raisonnée à l'échelle des populations d'espèces, dans une approche visant les effets cumulés. Ces synthèses rappellent par ailleurs l'importance de poursuivre les efforts et recherches sur les outils de minimisation des impacts en phase d'exploitation, mais également sur toutes les étapes de planification (évitement et réduction d'impacts) puis de compensation d'impacts.

Le Code de l'environnement (articles relatifs aux études d'impacts et évaluation environnementales) fixe les attendus réglementaires de l'évaluation des impacts des projets éoliens. Plusieurs guides et des recommandations régionales cadrent plus spécifiquement la réalisation des études d'impacts des projets éoliens terrestres en France. Par ailleurs, pour certains effets, des modèles ont été élaborés pour anticiper les impacts (collision, déplacement) ; leur utilisation nécessite cependant des précautions, une bonne connaissance de leurs limites et de très importants volumes de données, au-delà des pratiques en vigueur.

4.2. Impacts de l'énergie éolienne terrestre sur les sols

Les impacts sur les sols de l'énergie éolienne terrestre sont peu étudiés en comparaison des impacts sur la biodiversité. La revue bibliographique de 25 publications a permis de mettre en exergue les principaux impacts chimiques, physiques et biologiques de l'utilisation des sols, induits par les éoliennes terrestres. Les impacts mentionnés couvrent dans leur grande majorité les phases d'installation, de fonctionnement et de démantèlement des infrastructures. Parmi le corpus analysé, les impacts associés aux phases amont (extraction des matériaux primaires et fabrication des composants) et aval (gestion en fin de vie des structures) ne font pas l'objet d'une évaluation poussée. Même lorsqu'ils sont mentionnés, il n'est généralement pas possible de les mettre en regard des impacts générés par les phases sur le site de production d'énergie.

Il convient de noter que les impacts sur les sols de l'énergie éolienne terrestre et leur intensité varient selon la manière dont ces technologies sont développées et leur site d'implantation (par exemple, les impacts sur le changement d'affectation des sols sont plus importants en zone forestière, bien que ce cas de figure soit moins fréquent). De plus, un certain nombre de publications se basent sur des parcs éoliens terrestres localisés aux Etats-Unis, et dont les résultats sont potentiellement non extrapolables au cas français. En effet, ces parcs, de tailles très variables (les plus grands comptent plus de 200 éoliennes), comportent des turbines de faible puissance ou allant jusqu'à 5-6 MW. Dans le cas français, la taille des parcs est considérablement plus faible, avec en moyenne 5 à 6 turbines installées, d'une puissance moyenne de 2 MW ou 2,3 MW sur les 4 dernières années (certains nouveaux projets sont développés avec des turbines de plus forte puissance : notamment le parc éolien « Mont des 4 Faux » dans les Ardennes, qui devrait accueillir une soixantaine d'éoliennes de 5 MW). Les résultats présentés dans cette section sont considérés extrapolables au cas français ; dans le cas contraire, la non applicabilité est précisée.

En ce qui concerne la typologie des sols, ils ne sont en général pas mentionnés dans les publications relatives à l'éolien terrestre : le type de sol peut seulement être déduit des informations fournies concernant les milieux étudiés.

4.2.1. Impacts en termes de surfaces de sols

Dans l'ensemble, l'impact des éoliennes en termes de surfaces de sols utilisés reste faible, en particulier en regard d'autres énergies comme le solaire ou l'hydroélectricité. Cependant, la comparaison avec les autres énergies doit se faire relativement à l'énergie produite et peut différer selon ce que l'on regarde, occupation, artificialisation et imperméabilisation, usage strict pour cette activité ou co-usage possible (ramené à l'énergie produite, l'éolien occupe autant de sol que le PV au sol, par contre il artificialise et imperméabilise moins les sols, et les co-usages y sont plus aisés.). Un certain nombre d'études sont menées sur la question de l'occupation des sols, en particulier dans le cas de grands projets éoliens, notamment aux Etats-Unis (Shen, et al., 2017; Denholm, et al., 2009). Ces publications, basées sur des parcs aux Etats-Unis, agrègent les résultats sans les différencier selon la puissance des turbines considérées, rendant leur applicabilité au cas français difficile.

La surface **occupée** par des parcs éoliens terrestres en France, ramenée à l'énergie produite, est estimée de 6 200 à 6 800 ha/TWh/an pour l'éolien terrestre standard et de 7 400 à 8 000 ha/TWh/an pour l'éolien nouvelle génération, un peu plus importante que le PV au sol tout en restant du même ordre de grandeur (1 400 à 2 200 ha/TWh/an pour le PV fixe et 2 100 à 3 300 pour le PV *tracker* 1 axe) (Feix, 2018). Ramenée à l'unité d'énergie installée, elle est de 34,5 ha/MW pour les grands parcs éoliens récents en moyenne aux Etats-Unis, avec des disparités très fortes (de 4 à 226 ha/MW) (Denholm, et al., 2009) et de 10 km²/GW pour Hong et al. (2013). L'occupation des sols par quantité d'énergie produite pour l'éolien terrestre sera plus ou moins élevée selon les conditions de vents.

Dans le scénario ADEME de mix énergétique 100 % renouvelable en France, il est estimé que l'éolien terrestre pourrait représenter 17 000 km² (soit 1,7 Mha) sur un total de 18 500 km² (soit 1,85 Mha) en termes d'occupation du sol par les installations d'EnR (ADEME, et al., 2015).

Sur un parc éolien, l'**occupation des sols (et artificialisation)** se limite aux plateformes des éoliennes, aux chemins d'accès, au poste de livraison et bâtiments d'entretien (Katsaprakakis, 2012), et dans une moindre mesure aux fondations des éoliennes. A noter que dans le cas français, les besoins de construction de nouveaux chemins d'accès sont généralement limités (utilisation privilégiée de chemins existants), la majorité du parc éolien terrestre étant développé sur des terres agricoles. La surface indirectement occupée par l'éolienne pour les activités de maintenance peut également être considérée (Denholm, et al., 2009). La phase d'installation des éoliennes, comme pour tous travaux d'aménagement, requiert l'utilisation temporaire de surfaces supplémentaires : principalement pour la mise en place de chemins d'accès temporaires (62 % des surfaces concernées pendant cette phase sur le parc étudié), mais aussi les zones de stockage et de dépôt (30 %) (Denholm, et al., 2009). En France notamment, une partie de ces zones est ensuite conservée, pour permettre les activités de maintenance. Dans le scénario ADEME de mix énergétique 100 % renouvelable en France (ADEME, et al., 2015), seul 1 % est considéré comme « artificialisé »⁶⁸ sur les 17 000 km² de sols occupés par les installations d'éoliennes terrestres. Toujours en France, il est estimé que 0,6 % (soit 37 à 41 ha/TWh/an) et 0,4 % (soit 28 à 32 ha/TWh/an) des surfaces totales occupées par des parcs éoliens sont « artificialisées »⁶⁸, respectivement pour les éoliennes terrestres standards et les éoliennes terrestres nouvelle génération et que 0,08 % (soit 5 à 5,4 ha/TWh/an) et 0,05 % (soit 3,7 à 4 ha/TWh/an), respectivement sont imperméabilisées (Feix, 2018). Comparé au PV, l'éolien artificialise moins et imperméabilise généralement (mais pas systématiquement) moins (ramené à l'unité d'énergie produite).

Pour les zones restituées à leur état initial, le temps nécessaire pour ce changement ("*pre-disturbance condition*") est estimé autour de 2-3 ans pour les prairies temporaires (plusieurs décennies pour des environnements désertiques, non représentatifs des sols sur lesquels sont développés les parcs éoliens en France) (Arnett et al., 2007 cité dans Denholm, et al. (2009)). Il est probable que ces temps seront de plusieurs décennies ou plusieurs siècles pour revenir à des états initiaux forestiers.

Lors de la phase opérationnelle, la surface occupée varie selon la puissance de la turbine utilisée, les caractéristiques de la structure (par exemple la dimension des pales) et la configuration du parc (données issues de plusieurs études citées par (Fthenakis, et al., 2009). De plus, plusieurs types

⁶⁸ Ici l' « artificialisation » correspond à la seule localisation au sol des panneaux, des infrastructures électriques, des chemins d'accès, des stationnements et des zones de manœuvre.

d'emprise sur les sols autour des turbines peuvent être considérés, bien que le périmètre couvert ne soit généralement pas précisé dans les publications. Il est possible de ne considérer que la surface occupée par la fondation de l'éolienne (environ 400 m² pour une éolienne de 2 MW) ou d'inclure également la surface nécessaire à la maintenance de l'éolienne (environ 1 000 m² au total). La plupart des publications indiquent ce second périmètre : à titre illustratif, (Katsaprakakis, 2012) cite environ 1 600 m² (40 m x 40 m avec la turbine au centre) pour une turbine de 3 MW.

Pour des parcs ouverts avec une relative faible densité d'éoliennes construites, le **co-usage** (avec l'élevage ou les grandes cultures par exemple) est possible (Fthenakis, et al., 2009). Se pose alors la question de la comptabilisation de la surface de sol en co-usage (hors localisation au sol des éoliennes et de leurs fondations, des infrastructures électriques, des chemins d'accès, des stationnements et des zones de manœuvre). A noter que les chemins d'accès peuvent préexister et servir à d'autres activités (par exemple agricoles) à proximité.

Il n'existe pas de consensus quant aux surfaces considérées impactées par l'exploitation d'un parc éolien ; la question de la définition de l'impact en est la principale explication. Dans certains cas, les écarts peuvent provenir des incertitudes liées aux mesures (par exemple, surfaces estimées à partir de photos satellites, sur lesquelles peut être observée une modification de la végétation) (Shen, et al., 2017). Enfin, certaines publications ne distinguent pas les résultats par type de projet (technologie, taille, etc.), ce qui limite leur analyse dans un cas de figure similaire au cas français.

A noter que des études plus poussées sur la relation entre la configuration du parc éolien et la notion de « surface occupée » élargie à l'ensemble des sols d'un parc éolien, y compris les sols pouvant être utilisés à d'autres usages (au-delà de l'emprise directe, liée aux fondations – et indirecte – liée à la surface de maintenance autour de l'éolienne) ont été menées dans le cas de parcs éoliens américains (non directement transposables au cas français) (Denholm, et al., 2009).

La question des surfaces de sols utilisés est évaluée au niveau des parcs éoliens uniquement. Cependant, l'extraction de matériaux primaires utilisés dans les turbines et pour la structure de l'éolienne, ainsi que pour les systèmes de raccordement au réseau, peut générer une emprise indirecte sur les sols. Plusieurs études (citées par (Fthenakis, et al., 2009; Siddiqui, et al., 2017)) s'intéressent ainsi à l'occupation directe et indirecte des sols *via* une approche par analyse du cycle de vie des structures. Si les résultats ne sont pas extrapolables au cas français, il apparaît que l'emprise indirecte (liée aux étapes amont et aval à la production d'énergie, en dehors du parc éolien) est moindre que l'emprise sur site, pour un GWh produit. Cette analyse est confirmée par l'étude (ADEME, 2015), qui indique que la phase de construction du parc contribue à hauteur de 83 % à la surface utilisée de sols. Les principaux enjeux sont donc concentrés sur la phase d'installation du parc éolien, avec un impact qui reste globalement relativement faible.

Les impacts relatifs à l'**artificialisation des sols** sont faibles : les surfaces de sols profondément modifiées sont généralement limitées à la construction des stations de transformation, ainsi que les fondations en béton des turbines, les lignes de raccordement au réseau électrique, etc. Lors de la phase de démantèlement, les turbines et équipements associés sont enlevés ainsi que les postes de transformation électrique ; une excavation partielle de la base en béton est effectuée (voire une excavation complète, *a priori* moins privilégiée dans une optique de simplification des pratiques relatives à l'éolien terrestre, et étant donné que ce n'est pas une obligation légale). Ces impacts sont cités mais ne font pas l'objet d'une évaluation (Bradley, et al., 2010; Denholm, et al., 2009).

Les travaux réalisés en phase d'installation ou de démantèlement des éoliennes peuvent nécessiter un **changement d'affectation** des sols de façon temporaire. A noter que dans le cas d'éoliennes implantées en forêt, peu fréquent en France, des opérations de défrichement sont nécessaires, et le changement d'affectation permanent. En phase d'exploitation, la production d'électricité se fait généralement en co-usage au moins partiel (par exemple avec des activités agricoles), ce qui réduit les surfaces effectivement soumises à un changement d'affectation. A noter qu'une évaluation quantifiée du changement d'affectation des sols a été menée aux Etats-Unis à partir de multiples projets éoliens, en les distinguant par type d'usage initial des sols (forêt, prairies, etc.) (Denholm, et al., 2009). Le choix des projets étudiés et la méthode d'évaluation ne permet cependant pas d'extrapoler les résultats au cas français.

L'occupation des sols des parcs éoliens est généralement considérée comme importante (par unité d'énergie). Le changement d'affectation et l'artificialisation des sols au niveau des parcs éoliens terrestres sont recensés comme des impacts avérés dans la littérature, mais qui restent

en général négligeables au vu des surfaces concernées. De plus, les co-usages sont en général de règle. L'intensité de ces impacts varie fortement selon le site d'implantation (plus conséquente si le parc est implanté dans des zones forestières ou espaces naturels plutôt que sur des terres agricoles, cas le plus fréquent en France).

4.2.2. Impacts physiques sur les sols

Plusieurs types d'impacts physiques sur les sols sont mentionnés dans la littérature sur les parcs éoliens terrestres, cependant leur intensité reste *a priori* négligeable dans le cas de parcs représentatifs du cas français.

La question du **changement de température au sol** reste peu étudiée dans le cas de parcs éoliens représentatifs du cas français. Cet impact est bien étudié dans le cadre de projets éoliens terrestres de grande taille (par exemple ceux rencontrés aux Etats-Unis), mais il n'est de fait pas possible d'extrapoler ces résultats au cas français.

Le fonctionnement de l'éolienne engendre des turbulences en aval de ces dernières et par conséquent un plus grand brassage de l'air entre les niveaux inférieurs et supérieurs, pour les zones concernées. La littérature portant sur des grands parcs indique que les conséquences de ces turbulences sont distinctes à la surface du sol à proximité de l'éolienne le jour et la nuit (Wang, et al., 2015a; Walsh-Thomas, et al., 2012). Les turbulences de sillage mélangent l'air froid en haut et l'air chaud en bas pendant la journée et inversement la nuit en cas d'inversion de gradient de température. Ceci induit une augmentation de la température de l'air en surface la nuit mais n'a pas d'impact significatif la journée. Des observations par satellite ont montré un réchauffement local significatif de l'air en surface des sols d'environ 0,72 °C par décennie, particulièrement la nuit, dans les parcs éoliens (comparé aux terres non occupées par des éoliennes) à mettre en perspective de l'accroissement du taux d'implantation de nouvelles éoliennes (Wang, et al., 2015a). A noter qu'il s'agit ici d'un réchauffement local qui affecte par ailleurs notamment les températures minimales observées (augmentation de la température de surface la nuit, lorsque les minimales sont atteintes). Les effets ne sont donc pas comparables à ceux d'une augmentation globale des températures maximales.

L'intensité de ces phénomènes dépend fortement de la taille du parc éolien (Roy, 2011), ce qui va dans le sens d'une **non-applicabilité directe** de ces résultats en l'état dans le cas de parcs français (les parcs des Etats-Unis étant typiquement de très grande dimension contrairement aux parcs français moyens). A noter que des études sont menées aux Etats-Unis pour développer des turbines générant moins de turbulences dans leur sillage (Tabassum, et al., 2014).

Le changement de température des sols est très bien étudié dans le cas de grands parcs éoliens terrestres, mais est un impact non étudié dans le cas de parcs éoliens français (et qui pourrait être négligeable étant donnée la taille de ces derniers). Différentes méthodes d'évaluations existent (mesures satellites, modélisations) pour les grands parcs éoliens, et pourraient être employées dans le cadre d'autres EnR.

Lors du chantier de mise en place d'une installation d'EnR, diverses aires temporaires sont indispensables (par exemple des aires de stockage des pales, des aires de grue, des aires de stationnement, une base de vie). De même sont nécessaires, de façon permanente, des fondations pour certaines installations et des chemins d'accès. Généralement les sols y sont compactés (soit par le passage répété d'engins lourds, soit pour assurer la stabilité du terrain) (Bradley, et al., 2010; Lovich, et al., 2011; Lovich, et al., 2013).

La mise en place des fondations des éoliennes nécessite des travaux de terrassement, de nivellement et l'utilisation d'équipements lourds, notamment au niveau des zones de dépôts. Comme pour tout travaux d'aménagements, ces activités engendrent une **compaction** locale du sol voire une certaine **impermeabilisation** qui peut se maintenir après la phase d'installation (durant souvent entre six mois et un an), mais reste d'intensité négligeable (Bradley, et al., 2010; Denholm, et al., 2009). Dans le cas d'un parc implanté sur des sols fragiles (par exemple en milieux désertiques, non représentatifs des sols français), la mise en place de chemins d'accès et des infrastructures peut contribuer à réduire la résistance du sol à l'**érosion** (du fait d'un endommagement du sol et de la végétation, le sol est ainsi plus sensible au vent et au passage de l'eau) (Shen, et al., 2017).

Les stress physiques engendrés par l'installation, l'exploitation et le démantèlement d'un parc éolien terrestre sont peu mentionnés, du fait de leur faible importance notamment sur le territoire français. Néanmoins, si le parc français est amené à se développer, le problème du tassement devra être mieux géré afin de retrouver un état (écosystème) initial après le démantèlement. Les impacts physiques sur les sols générés lors de l'extraction des matériaux primaires ne sont pas mentionnés bien qu'ils puissent être non négligeables.

4.2.3. Impacts chimiques sur les sols

Les impacts chimiques engendrés par la production d'énergie éolienne terrestres sont peu mentionnés dans les publications, du fait qu'ils apparaissent négligeables pour les phases d'installation ou d'exploitation. A noter que selon les matériaux utilisés pour la construction des éoliennes, la phase d'extraction peut avoir un impact non négligeable sur la **contamination chimique** des sols. En plus de l'acier et du cuivre utilisés pour le mât et les raccordements, les turbines peuvent être composées de cuivre (générateur asynchrone, représentant environ 70 % du parc éolien terrestre français), d'aluminium, laiton et cuivre (générateur à entraînement direct, environ 27 % du parc éolien terrestre français) ou d'aimants permanents (environ 3 % du parc). Ces impacts ne sont cependant pas spécifiques à la fabrication d'éoliennes et raccordements, et peuvent être généralisés à l'ensemble des activités d'extraction de ces matériaux. Des travaux pourraient être menés pour allouer une part des impacts (notamment en termes de pollution des sols) générés par les activités d'extraction à la production d'énergie éolienne terrestre.

Lors de la phase d'exploitation, les impacts chimiques sur les sols sont réduits aux accidents pouvant survenir, comme lors de fuites d'huile (MEEM, 2016) pouvant contaminer les sols à proximité. Dans le cas de sols fragiles (non représentatifs des sols sur lesquels sont installés la plupart des parcs éoliens français), par exemple en zones humides ou lacustres, des structures peuvent être mises en place pour éviter que les déversements accidentels n'atteignent le milieu marin. Néanmoins, cette pratique induit une forte compaction des sols, altère le drainage et peut déranger les espèces à proximité (Bradley, et al., 2010).

Les procédés d'extraction de certains matériaux utilisés dans les éoliennes terrestres peuvent générer des impacts chimiques, bien plus que la phase d'exploitation du parc. Les étapes amont de la production d'énergie éolienne sont cependant mal étudiées.

Parmi les publications analysées, plusieurs présentent des résultats d'analyse de cycle de vie relatifs au **potentiel d'acidification**⁶⁹ des milieux générés par la production d'énergie éolienne terrestre. Cet impact n'est donc pas évalué dans le cas des sols uniquement, mais agrège les résultats de l'impact potentiel sur les milieux aquatiques, aérien et les sols ; pour l'ensemble des étapes du cycle de vie d'une structure éolienne terrestre. Le potentiel d'acidification relatif à la production d'énergie éolienne terrestre par unité d'énergie produite est faible voire négligeable en comparaison à la production d'électricité moyenne en France (Cycleco, 2015). D'après plusieurs études, les étapes de fabrication des composants de l'éolienne et des structures associées sont le principal contributeur (près de 70 %) à cet impact potentiel (Siddiqui, et al., 2017; Cycleco, 2015), en raison de l'utilisation de matériaux comme l'acier et le cuivre (procédés de fabrication, notamment mix énergétique utilisé). Ces résultats concordent pour différents types d'éoliennes (taille, turbine, etc.).

Le potentiel d'acidification de l'éolien terrestre est étudié dans la littérature, et apparaît négligeable en comparaison au mix énergétique moyen dans le cas français.

4.2.4. Impacts biologiques sur les sols et services écosystémiques

Les impacts biologiques des éoliennes terrestres sur les sols sont peu étudiés dans la littérature, et sont principalement relatifs aux phases d'installation et d'exploitation du parc éolien. Les étapes amont et

⁶⁹ Un changement de pH des sols peut entraîner leur altération chimique et biologique, et indirectement impacter la qualité de l'écosystème associé

aval de la production d'énergie éolienne terrestre ne sont pas étudiées dans le cadre de la revue de littérature effectuée.

La question de la modification de l'hydrométrie⁷⁰ locale est un enjeu identifié et évalué dans le cas de grands parcs éoliens comme ceux rencontrés aux Etats-Unis (Roy, 2011; Armstrong, et al., 2014). Lors de la phase d'exploitation, la température de l'air et l'humidité près de la surface du sol peuvent être impactés, avec une portée potentielle de 20 km en dehors des parcs dans le cas de configurations américaines. Comme pour les parcs solaires au sol, les parcs éoliens influencent directement et indirectement le cycle du carbone plante – sol, les émissions de GES et le stockage de carbone par le sol (directement, par diminution de la productivité végétale et donc des quantités de matières organiques retournant au sol et accélération ou non de la décomposition de la matière organique dans le sol, et indirectement, par changements de l'activité et de la composition des communautés végétales et microbiologiques) (Feix, 2018).

Ces effets peuvent induire des modifications relativement importantes sur le microclimat (local et régional), du fait des changements de régime de circulation d'air sec. Les mécanismes de cet impact étant similaires au changement de température du sol, il est probable que ces résultats ne soient pas directement transposables au cas de parcs éoliens terrestres français (du fait de la taille moyenne et configuration des parcs éoliens différentes, ainsi que des conditions climatiques distinctes).

Comme pour tous travaux d'aménagement, une altération de l'habitat terrestre (endommagement des sols et de la végétation) voire une perte de biomasse (Shen, et al., 2017) peuvent être causées lors de l'installation des structures sur le parc éolien. Ces effets, bien que survenant *a priori* dans une faible mesure dans le cas de parcs éoliens français (excepté ceux implantés dans des espaces naturels), peuvent également favoriser l'installation d'espèces invasives (Bradley, et al., 2010).

Les impacts sur la biologie des sols des parcs éoliens terrestres lors des phases d'installation et d'exploitation restent peu connus dans des cas représentatifs de parcs français. Au vu du caractère généralement négligeable des impacts sur la physique et la chimie des sols lors de ces étapes (et sur lesquels la littérature est plus détaillée), il semble pertinent de considérer que dans le cas de parcs de plus petite taille représentatifs du cas français, les impacts biologiques sur les sols générés par la mise en place et l'exploitation d'un parc éolien terrestre ne sont pas significatifs.

4.3. Impacts de l'énergie éolienne terrestre sur les paysages

110 publications traitent des impacts de l'éolien terrestre et en mer sur les paysages. Quelques auteurs ressortent assez systématiquement dans l'ensemble des publications : Fortin ou Nadaï concernant l'éolien en général, la participation autour des projets ou la planification de cette énergie ; Wolsink ou Pasqualetti plus spécifiquement sur l'acceptation sociale.

Des études rétrospectives sur des territoires variés synthétisent bien les différentes phases du développement de l'éolien terrestre et les questionnements qui en découlent en matière d'impacts cumulés, d'acceptation, de concertation ou de planification : Bretagne (Tétrel, 2012), Grèce (Katsaprakakis, et al., 2016), Allemagne (Deshaies, 2015) (Nadai, 2008), Québec (Thériault, 2007), Portugal (Nadai, 2008; Nadai, et al., 2010), France (Gueorguieva-Faye, 2006).

4.3.1. Visibilité n'est pas paysage

La terminologie des impacts paysagers utilise un lexique très axé sur la visibilité : suppression des horizons vides d'objets, emprise visuelle des parcs éoliens, effets de domination, effets du balisage nocturne, etc. Ce vocabulaire montre bien que la visibilité constitue le principal et souvent unique facteur d'étude des impacts paysagers « physiques » (contrairement aux impacts liés à l'acceptation sociale) des publications étudiées. Cette visibilité dépend de l'implantation du parc (nombre de mâts, orientation, répartition, taille) mais aussi du paysage du site, du paysage situé entre l'observateur et le site (Bishop, et al., 2005), avec les différentes notions de co-visibilité ou d'intervisibilité, avec des éléments de paysage (village, clocher), de patrimoine (élément classé) ou avec d'autres éoliennes. Les différents guides d'étude d'impact développent longuement ces aspects, avec des préconisations d'implantation

⁷⁰ Etude des interactions entre les phases atmosphérique et terrestre du cycle hydrologique ainsi que les conséquences de ces interactions sur les ressources en eau des terres émergées

(selon le type de paysage ou le type d'implantation) ou des méthodes d'étude des impacts (Bonneaud, et al., 2007). Les préférences évoquées dans la littérature étudiée rejoignent globalement les préférences qui remontent de l'étude des projets avec une meilleure lisibilité des implantations linéaires, sinon géométriques. Les conditions de visibilité sont également mises en avant dans la perception des éoliennes terrestres.

Cette visibilité conditionne largement les études d'impact ou les guides d'études d'impact qui donnent la priorité à cet aspect alors que l'enjeu n'est pas uniquement la visibilité des éoliennes. Les outils d'appréciation des impacts (carte de visibilité notamment) sont insuffisants dans la mesure où ils ne prennent déjà pas en compte tous les concepts de la visibilité (cohérence, perturbation, passé historique, échelles, imaginaire, complexité, naturalité, éphémère). Tout ce qui fait un paysage (le lien entre un territoire et une population, l'esprit des lieux, etc.) ne peut pas être abordé par un calcul de visibilité. Les outils d'étude des impacts actuels seraient ainsi, pour certains, contre-productifs (Wolsink, 2018) : ils ne permettent pas d'une part d'évaluer les impacts complètement et d'autre part, de se placer dans une logique de projet paysager.

Les impacts des éoliennes terrestres sur le paysage sont souvent, dans la pratique de l'évaluation des impacts, réduits à une composante visuelle, largement incomplète et contre-productive, selon certains, faisant du paysage un prétexte pour l'opposition, auquel elle rattache un ensemble d'arguments et de concepts sans grande cohérence entre eux (van der Horst, 2010). La tentative d'objectivation des impacts paysagers uniquement par une approche visuelle ne permet pas de rendre compte des interactions possibles (négatives ou positives) entre les éoliennes et le paysage.

4.3.2. Des outils et méthodes trop visuels

Les méthodes d'évaluation des impacts sont le plus souvent développées sous Système d'Information Géographique (SIG), avec des données plus ou moins précises, qui conditionnent partiellement la pertinence des résultats (Roth, et al., 2015) (Röhner, et al., 2016). Actuellement, en pratique, les principaux outils utilisés sont des calculs de visibilité plus ou moins élaborés (avec prise en compte en la distance par exemple), croisés avec des cartographies des enjeux. Ces croisements définissent ensuite des lieux de prise de vue significatifs pour les photomontages.

Des méthodes existent pour croiser des thématiques et sortir des stricts aspects visuels : en reliant par exemple visibilité des éoliennes et perceptions effectives depuis les aires urbaines par exemple (Rodrigues, et al., 2010). Des indicateurs numériques peuvent être mis en place pour qualifier les paysages et prévoir l'impact paysager potentiel de l'installation des éoliennes (Sklenicka, et al., 2018). Des indicateurs d'« impact esthétique objectif » incluant des facteurs géométriques et visuels dans la visibilité des éoliennes (Torres-Sibille, et al., 2007) sont également utilisés. Certains auteurs tentent même d'intégrer dans un outil multicritère (méthodes statistiques et SIG collaboratifs) la diversité des acteurs et la prise de décisions croisées pour rendre compte des différents points de vue locaux (Rascon, et al., 2013). Ces différentes méthodes pourraient être utilisées pour de la planification en amont (comme ce fut le cas avec les Zones de Développement Eolien) voire pour la *repowering* (trouver les meilleurs sites à conserver (Möller, 2006)) mais sont peu utiles pour constater des impacts. Elles pourraient être utilisées pour des comparaisons de variantes même si les possibilités de discrimination entre différentes variantes sur un même site, déjà validé, semblent faibles. Elles seraient plus utiles pour le choix des sites en amont, dans une démarche de planification, en intégrant les contraintes techniques.

La précision et la pertinence des simulations, principaux outils actuellement utilisés pour décrire les impacts paysagers des parcs éoliens, restent essentielles et ces simulations doivent être localisées en des points clés du territoire et reproduire fidèlement ce que sera le parc une fois construit (Chias, et al., 2014). D'autant que les impacts paraissent également, une fois le projet construit, moins importants que prévus (Chias, et al., 2014) dans les études.

Dans le cadre de démarches plus tournées vers le projet, il faut souligner l'intérêt des outils iconographiques paysagers (blocs-diagramme, etc.) pour partager des scénarios de développement et visualiser les évolutions potentielles (Labussière, et al., 2011). Des outils 3D et de réalité augmentée existent également pour mieux pré-visualiser les impacts et favoriser la concertation autour des projets (Grassi, et al., 2016). Mais ces outils, intéressants pour des démarches de projet ou de planification, voire de concertation, s'avèrent là aussi peu pertinents (car ayant une portée opérationnelle très limitée) dans le cas de projets déjà localisés et partiellement dimensionnés.

Les outils utilisés dans l'étude des impacts se réduisent à des approches visuelles et ne permettent ni de décrire complètement les impacts, ni de favoriser l'intégration paysagère, ni de minimiser, en pratique, les impacts paysagers.

4.3.3. Des planifications pas suffisamment tournées vers une logique de projet paysager

Les réponses pour éviter ou réduire les effets liés aux aménagements sont connues et relativement convergentes : éloignement des secteurs habités, ménagement d'espaces sans éoliennes face à la saturation potentielle, réflexion sur les échelles (hauteur, étendue des parcs), choix de sites déjà anthropisés ou dégradés. De ce fait, la réponse en termes de planification est le plus souvent une planification en « négatif », par le biais de la distance et de zones tampons par rapport au bruit, entre parcs éoliens, par rapport aux habitations, par rapport au patrimoine, aux aires naturelles protégées, aux parcs nationaux, aux zones humides, aux zones touristiques, aux plages, aux mines, aux radars météo ou militaires, etc. Tout est potentiellement un facteur d'éloignement à prendre en compte, et notamment les parcs éoliens eux-mêmes (ceux qui sont déjà construits ou autorisés) pour éviter les effets de cumul, de saturation ou l'encerclement de points d'intérêts. Des zonages, délimitant des espaces dédiés aux infrastructures de production d'énergie, sont une des solutions classiques avancées (Cialdea, et al., 2014a). A noter que, en France, de tels zonages (Zones de Développement Eolien) ont marqué un frein au développement de la filière durant la période où ils étaient en vigueur (2008-2013) (les ZDE étaient plus un document de planification « électrique » qui définissaient simplement des zones dans lesquelles le projet bénéficiait d'un tarif d'achat préférentiel ; les délais de mise en place de ces ZDE ont été un des facteurs de ralentissement) ; les zones développées n'étaient également pas à la hauteur des objectifs de déploiement de la filière au regard de la Loi de transition énergétique pour la croissance verte (LTECV).

A l'inverse, l'intérêt des démarches « abductives » (Labussière, et al., 2011) est mis en avant autour de méthodes plus tournées vers le projet et la prospective, avec en théorie plus d'efficacité que des démarches qui interdisent. Ce type de démarche est peu utilisé notamment du fait d'une demande plus conséquente de concertation des populations mais aussi de tous les acteurs du territoire, plus généralement (ministères, associations d'environnement, etc.) ; la demande concerne également la transparence sur les enjeux. Cette concertation vient alors s'ajouter aux consultations existantes des différents acteurs concernés par des enjeux (dont les ministères font partie) : Défense pour les radars militaires, MTES à la fois pour gisement technique et éloignement aux zones naturelles protégées, patrimoine pour monuments, etc.

A noter qu'il existe des différences de politiques paysagères entre la France et l'Espagne ou l'Allemagne, où, outre les conditions d'habitat plus ou moins groupées, des processus de négociation plus ouverts et plus clairs favorisent une meilleure acceptation des projets, moins perçus comme des intrusions dans le cadre de vie (CGDD, 2015). Les planifications participatives portées par des structures ancrées territorialement (PNR par exemple) semblent avoir plus de portée que les planifications à grande échelle (échelle régionale ou nationale). Cette meilleure efficacité est liée à la plus grande légitimité de la stratégie adoptée, assise sur une base plus large que de simples décisions d'experts. Une telle constatation questionne également la gouvernance globale sur l'aménagement éolien.

Les stratégies de planification éolienne descendantes, en négatif, par juxtaposition de couches de contrainte sont plus répandues (et de toute façon nécessaires) que les démarches participatives ascendantes, qui donnent plus de place au projet en lui-même. L'efficacité des deux stratégies est difficilement comparable dans la mesure où les stratégies ascendantes sont peu mises en œuvre.

4.3.4. Des conflits d'usage potentiels, contradictoires et difficiles à évaluer

Les conséquences du développement éolien terrestre sur d'autres activités économiques (tourisme et immobilier le plus souvent) sont souvent mises en avant dans les oppositions aux projets. Les impacts sont clairement difficiles à évaluer avec une forte variabilité selon les méthodes adoptées, les bases de données employées, la période de temps étudiée, etc. Des publications existent mais leur analyse exige des compétences importantes en économie spatiale et statistiques (rendant difficile l'évaluation de la

pertinence des publications du strict point de vue paysager). On constate que les résultats sont variables dans la force de l'impact mais qu'ils convergent globalement sur le fait que les éoliennes terrestres ont un impact sur certaines valeurs économiques (immobilier (Gibbons, 2014), hébergement touristique (Joalland, et al., 2017)). Cet impact est circonscrit au périmètre immédiat des éoliennes (2 km environ) et rapidement, il s'estompe avec la distance et disparaît. Quand les éoliennes ne sont pas visibles, même à proximité, les prix pourraient augmenter, montrant les effets bénéfiques des éoliennes pour les propriétaires fonciers ou pour les communes qui peuvent améliorer les services proposés du fait des taxes énergétiques. Des mécanismes compensatoires sont parfois évoqués pour aller à l'encontre de ces effets (diminution de la facture électrique pour les riverains, financement de service public local) (Strazzer, et al., 2012). Des corrélations négatives sont mises en évidence entre demande touristique et présence des éoliennes, en lien avec la taille des éoliennes, dans certains contextes territoriaux (Broekel, et al., 2015). D'autres conflits d'usages apparaissent, avec le terroir et la viticulture (Chataignier, et al., 2003), où c'est la méthode d'implantation qui est contestée avec une demande de planification plus forte (l'étude date cependant de 2003, époque où les documents de planification étaient peu répandus).

D'autres publications montrent à l'inverse que, notamment sur le tourisme, les impacts sont moins forts que ce qui est souvent avancé et que les éoliennes terrestres, si elles sont implantées à des endroits bien choisis, peuvent être un support supplémentaire pour le tourisme (Frantál, et al., 2011). Les éoliennes auraient ainsi un faible impact sur le tourisme, avec des représentations paysagères non modifiées voire correspondant aux attentes des visiteurs (Fortin, et al., 2017; Rousseau, 2014). D'autres publications montrent également que l'éolien terrestre en général est plutôt bien accepté, et que les aspects socio-économiques et esthétiques (paysagers) sont les principaux critères qui conditionnent l'acceptation (Caporale, et al., 2015). La question de la pérennité dans le temps de cet impact positif (tourisme industriel, effet de curiosité des éoliennes) est soulevée, sans réelle réponse sur le sujet. La question de la valorisation et de la patrimonialisation des paysages éoliens est même posée (Dubois, et al., 2006). La comparaison avec des aménagements énergétiques plus anciens que sont les barrages hydroélectriques pourrait être intéressante, ces barrages étant aujourd'hui largement appropriés par les riverains ou les touristes et valorisés sur leurs territoires d'accueil. Mais la multifonctionnalité touristique (activités ludiques, baignade, pêche, etc.) est un aspect que ne développent pas les éoliennes. Néanmoins, la multifonctionnalité opère avec les activités agricoles, permettant de dégager deux sources de revenus différentes sur une même surface.

La variabilité des résultats traitant des impacts des éoliennes sur d'autres activités (liées à la variabilité des méthodes, des échantillons, des territoires et des temporalités considérées) ne permet pas de conclure quant à l'impact des éoliennes terrestres sur des activités telles que le tourisme ou la valorisation des territoires.

4.3.5. La question de l'acceptation sociale comme outil de participation et de collaboration autour des projets

L'éolien terrestre est la forme d'énergie renouvelable la plus potentiellement conflictuelle aux yeux de certains auteurs (Brühne, et al., 2015) et la typologie générale de la bibliographie confirme cette affirmation. Le paysage étant un des premiers motifs de rejet des projets éoliens, la question de l'acceptation sociale revient légitimement dans un grand nombre de publications.

Le concept d'acceptation sociale est spécifiquement étudié, avec des concepts et caractéristiques générales sur les énergies (Wüstenhagen, et al., 2007; Fortin, et al., 2015), applicables à l'éolien, comme la variation en U de l'acceptation : l'acceptation est initialement bonne, avant qu'un projet existe, puis elle chute quand un projet voit le jour, puis remonte une fois le projet construit (Petrova, 2013). Des éléments précis et quantifiés existent clairement sur le sujet, notamment en lien avec les projets les plus anciens, sur lesquels un retour d'expérience est possible. Quelques études (Bush, et al., 2016) montrent ainsi l'évolution favorable des positions (dans le sens d'un assouplissement) face à l'éolien sur la durée du débat autour des projets, en lien avec une meilleure connaissance des tenants et aboutissants des projets.

Un des enseignements transversaux aux différentes publications traitant de l'acceptation sociale des éoliennes est que cette acceptation dépend largement de qui en parle : tout ce qui fait l'histoire et le vécu d'un observateur va conditionner son rapport à l'éolien (par exemple, vont intervenir dans son attitude face au projet son implication environnementale, son attachement au lieu, sa perception d'une « justice » de l'implantation avec le rapport bénéfice public/privé, etc.) (Strazzer, et al., 2012). Les

facteurs de variation des attitudes envers l'éolien sont extrêmement variés : éducation, habitude des éoliennes, vie près des éoliennes (Betakova, et al., 2015), besoins énergétiques (Kaldellis, 2005), etc. ; des listes de ces facteurs ont même été établies (Fortin, et al., 2015). Cela complexifie largement l'étude de cette thématique, surtout si on ajoute la diversité des projets et des paysages.

Des hypothèses d'explication des résultats (obtenus par des méthodes économétriques) sont souvent avancées sans pouvoir les vérifier précisément, rendant ces études peu pertinentes, si ce n'est pour la méthodologie adoptée. Comme pour les autres formes d'énergie, si les problématiques de base sont les mêmes (chercher à quantifier la part du subjectif dans l'appréciation des impacts des éoliennes pour éviter les zones les plus conflictuelles), les résultats sont trop variables, suivant un nombre élevé de paramètres (pays d'origine, lieu d'habitation, urbain ou rural, âge, profession, CSP, etc.) pour que ces études soient intéressantes en termes de résultats. Les thématiques des résultats sont cependant relativement constantes, autour de l'esthétique de l'éolien, de l'attachement particulier au territoire, des contreparties à la modification de l'identité des lieux (Pasqualetti, 2011), des aspects socio-économiques (création d'emploi, ressources locales, collectives ou privées, etc.). Les publications les plus récentes remettent même largement en question le concept de NIMBY (*Not In My BackYard* : concept utilisé pour décrire l'opposition de résidents locaux à un projet dont ils ne seraient pas forcément contre, ailleurs que près de chez eux ; le terme est ancien et a fait l'objet de nombreuses études sociologiques), régulièrement évoqué pour parler de l'opposition aux projets éoliens (Petrova, 2013; Gueorguieva-Faye, 2006) : l'opposition à l'éolien ne peut pas se résumer à la défense d'un intérêt privé et égoïste face un intérêt général collectif, rejoignant en cela la complexité de l'étude de l'acceptation sociale de l'éolien.

C'est donc plutôt la difficulté d'appréhender cette question pour chaque projet qui apparaît : il paraît difficile de prévoir l'acceptation sociale du projet en amont et donc de calibrer le projet en fonction de ces prévisions. En ce sens, au-delà de la visibilité des éoliennes, de l'implantation ou du type d'éoliennes, c'est le site lui-même, et donc la planification en amont (ou son absence) qui sont en cause (Wolsink, 2010). Des synergies entre développement des énergies renouvelables et planification doivent être trouvées pour éviter les conflits et aboutir à une meilleure acceptation sociale des projets.

Plus qu'un impact en soi, l'acceptation sociale, et sa traduction paysagère, sont souvent évoquées (et cet aspect n'est ni spécifique à l'éolien, ni aux thématiques énergétiques) à la fois comme un levier d'action pour les politiques publiques (planification, projets de territoire) mais aussi comme un support de participation citoyenne autour des questions d'aménagement et de cadre de vie (Le Floch, et al., 2009). La meilleure façon de trouver un consensus sur les projets et d'aboutir à une acceptation plus forte serait de mettre en place de nouvelles pratiques en matière de prise en compte du paysage dans les projets : le paysage comme processus plus que comme thématique. L'éolien est de ce point de vue un assez bon agitateur de la question paysagère, au moins en France (Gueorguieva-Faye, 2006).

Concernant l'acceptation sociale et ses implications méthodologiques, la nécessité d'une implication en amont des parties prenantes est primordiale ainsi qu'une information complète sur les implications des projets (pas uniquement concernant l'impact sur les vues, l'environnement ou l'économie locale mais aussi sur la qualité de l'air, la consommation d'énergies fossiles ou sur le climat). En ce sens, les études sociologiques concluent le plus souvent à la nécessité d'une information précise et de qualité dans le déroulement des débats autour des projets, que ce soit sur les effets positifs ou négatifs (Delicado, et al., 2016). De nombreuses publications pointent le manque d'implication des populations locales avec un semblant de concertation réalisé une fois le projet défini. L'acceptation sociale traitée sous l'angle de la communication ou du marketing n'est pas acceptable pour la majorité des auteurs connaisseurs de la question (Nadai, et al., 2010; Wolsink, 2010). De même, la « fausse » participation entraîne plus facilement des oppositions qu'une concertation active (Jolivet, et al., 2010). Les approches collaboratives, à tous les niveaux, sont cruciales pour certains auteurs, très impliqués dans les questions d'acceptation sociale de l'éolien (Wolsink, 2006). La planification paysagère de l'éolien terrestre préfigure pour certains auteurs la question de la décentralisation énergétique avec là aussi tous les inconvénients d'une planification venant d'en-haut et la nécessité de construire des paysages de l'énergie via des projets de territoire (Nadai, et al., 2010).

Une meilleure acceptation sociale des projets éoliens semble difficilement atteignable simplement par la mesure de variables complexes et quasi infinies. Les méthodes d'implication des populations concernées par le projet, la participation, l'information semblent être des outils plus performants, car intervenant plus en amont des projets. Le paysage comme outil de mobilisation dans le sens du projet (en miroir à son utilisation par les opposants) pourrait permettre d'atteindre un consensus plus large. Les projets se contentent actuellement au mieux

de mettre en place des sessions d'informations une fois les projets avancés, ce qui se révèle parfois contre-productif.

4.3.6. Eviter les impacts par le paysage plutôt que tenter de les quantifier

De manière générale, les méthodes convergent d'une part vers des méthodes sous SIG pour quantifier les impacts visuels (voir section 4.3.2) et d'autre part vers des méthodes économétriques, pour tenter de mettre une valeur sur des thématiques non monétaires.

Des méthodes cartographiques (sous SIG), multicritères sont mises en avant pour planifier, à partir de zones tampons notamment, le développement de l'éolien en fonction de scénarios de puissance, des zones protégées, urbaines, des zones visuellement impactées par d'autres aménagements, etc. (Siyal, et al., 2015; Aydin, et al., 2010; Cialdea, et al., 2014b; Panagiotidou, et al., 2016).

Les méthodes économétriques (pour tenter de quantifier des éléments peu quantifiables) sont souvent utilisées : expérience des choix, évaluations contingentes, théorie de l'acteur-réseau (Jolivet, et al., 2010), consentement à payer, consentement à habiter (Betakova, et al., 2015), etc. sont autant de méthodes visant à quantifier des éléments non mesurables, sur la base de photos, d'images de références, de questionnaires et d'entretiens ciblés. Ces méthodes ont un intérêt certain pour mettre en évidence certains aspects mais leur généralisation est toujours problématique (représentativité des échantillons, ampleur des mesures, des temporalités, etc.). Elles peuvent également être utilisées pour évaluer vers quelles mesures compensatoires se diriger en premier lieu et comprendre l'origine de l'opposition, avec là encore, une remise en cause du concept de NIMBY (Strazzeria, et al., 2012).

Quelle que soit la méthode, et du fait de l'essence même du concept de paysage (ici considéré comme la relation entre un territoire et ses usagers, au sens large), il semble finalement assez vain de tenter de quantifier l'inquantifiable. Le paysage doit plutôt être vu comme une méthode de description des territoires et des manières d'en user pour ensuite en faire un support de négociation, de concertation, de participation pour trouver un consensus sur la manière d'aménager le territoire, en l'occurrence avec des éoliennes dans un but de développement des énergies renouvelables. En somme, la prise en compte du paysage comme outil de participation permettrait de prévenir les impacts plutôt que de tenter de les guérir.

Les outils existants s'orientent vers des tentatives toujours plus poussées pour mesurer des impacts sans réels résultats sur une meilleure prise en compte effective de ces derniers ; cela plaide en faveur d'une utilisation plus en amont du paysage, plus axée sur la concertation et les méthodes de construction participative des projets.

4.3.7. Des guides très centrés sur la visibilité et l'aménagement plus que sur l'acceptation

Les guides français (2005, 2010 et 2016) sont relativement complets sur la prise en compte de la dimension visuelle du paysage, tant au niveau des outils que des méthodes, même si le guide le plus récent a quelque peu diminué la portée de l'étude paysagère, en lien avec les pratiques constatées (notamment en ce qui concerne les simulations).

Plus spécifiquement, la DREAL Centre a édité une méthodologie pour prendre en compte les effets d'encerclement et de saturation dans un contexte paysager ouvert et sans obstacles visuels (Beauce) (Bonneaud, et al., 2007). Cet outil est utile dans des contextes paysagers similaires mais devient vite limité sur des territoires plus accidentés et végétalisés. La thématique « encerclement et saturation » étant amenée à se généraliser avec la densification des parcs éoliens terrestres, avec des effets cumulés d'un autre ordre, une méthodologie générale serait la bienvenue pour cadrer la prise en compte de ces impacts, pour l'instant étudiés au cas par cas, sans homogénéité.

Ces guides orientent clairement la prise en compte du paysage comme une contrainte ou une thématique et pas comme une démarche de projet. Les aspects visuels y sont donc surdéveloppés alors que les aspects de prise en compte des perceptions locales, de la concertation, même si elles sont évoquées, ne sont pas du tout précises concernant les outils ou méthodologies à adopter. Ces guides sont donc en décalage important par rapport au volume des publications traitant de la question paysagère sous l'angle du projet et de l'acceptation sociale via de vrais processus de concertation.

Si la concertation ne peut clairement pas être entièrement portée par les développeurs des projets, surtout au regard de la bibliographie qui fait ressortir de nombreux enjeux en amont même de l'arrivée de projets sur le territoire, une partie sur les choix d'aménagement pourrait toutefois être discutée dans le cadre des projets : taille des éoliennes, choix d'implantation voire des points de vue présentés dans les études, mesures souhaitables qui pourraient très bien faire l'objet de concertations, plutôt que les réunions ou débats publics qui se déroulent le plus souvent une fois le projet bien précisé. L'autre part de la concertation pourrait se dérouler plus en amont, dans le choix des sites. Les Zones de Développement Eolien supprimées en 2013 organisaient à leur manière cette planification, souvent à l'échelle intercommunale. Les données pertinentes dans le zonage, notamment paysager, pouvaient y être intégrées et certaines oppositions étaient désamorçées à ce stade. Une information générale sur l'éolien était également possible, en amont des projets, facilitant les discussions quand les projets intervenaient. Elles permettaient aussi de pointer les principaux points d'enjeux pour les projets. La présence des ZDE a néanmoins été une période de bien moindre implantation de parc éoliens en France, leur développement et les zones concernées n'ayant pas été compatibles avec les objectifs affichés en matière de développement de l'éolien. Si le principe est d'intérêt pour imaginer des outils permettant d'intégrer les enjeux paysagers de planification, concertation et communication dans le cadre du développement des EnR à l'échelle des territoires, cet outil n'a donc pas été satisfaisant à tous niveaux.

Les guides sont largement suffisants sur la prise en compte des enjeux mesurables ; ils se révèlent plus légers, et parfois insuffisants au regard des enjeux mis en avant par la littérature, sur les questions de perception sociale, d'acceptation et de participation en amont sur les projets, qui sont pourtant certainement plus efficaces pour éviter les impacts.

4.4. Synthèse des impacts de l'énergie éolienne terrestre

La qualification des impacts de l'énergie éolienne terrestre sur la biodiversité, les sols et les paysages est synthétisée ici, ainsi que les méthodologies d'évaluation rencontrées et le niveau de différenciation des impacts entre technologies et étapes du cycle de vie des infrastructures. Dans l'ensemble, les impacts liés à l'éolien terrestre sont bien connus du fait de leur grande maturité – du moins pour des cas applicables à l'éolien français.

En ce qui concerne la qualification des impacts sur la biodiversité, une base de connaissances particulièrement riche sur les effets de l'éolien existe du fait de la maturité de la technologie, de l'existence de nombreux suivis et de plusieurs démarches collaboratives. Ainsi, de nombreux impacts relatifs au dérangement ou mortalité d'individus, ou encore à la destruction de leur habitat sont bien décrits pour de nombreuses espèces (notamment les oiseaux et les chiroptères), même si des recherches restent en cours pour préciser certains impacts (gêne comportementale notamment). Pour l'éolien terrestre, les espèces d'oiseaux et de chiroptères les plus sensibles à la collision sont globalement bien identifiées (rapaces, oiseaux migrateurs, chauves-souris de haut-vol) tandis que les perturbations comportementales demeurent partiellement comprises et font l'objet de travaux de recherche (pour les oiseaux posés, en vol ainsi que les chiroptères en déplacement) ; des différences importantes peuvent être observées, pour une même espèce animale, entre plusieurs situations d'implantation de parcs éoliens voire entre des individus de la même espèce. La qualification des impacts est associée à certaines mesures de limitation de ceux-ci qui sont régulièrement mises en œuvre (notamment pour les réductions des risques de collision).

Concernant les sols, les impacts les plus documentés et évalués sont relatifs à l'occupation et l'artificialisation des sols, qui restent négligeables en phase d'exploitation d'un parc terrestre. Cependant, ramené à l'unité d'énergie produite, ces impacts ne sont pas négligeables (du même ordre de grandeur que pour le PV). Les autres typologies d'impacts (physique et chimique) sont connues mais relativement peu étudiées et sont en général négligeables (et à faible enjeu dans le cas français). A noter que la typologie des sols n'est pas mentionnée dans les publications relatives à l'éolien terrestre.

En ce qui concerne les paysages, les impacts des éoliennes terrestres sont souvent réduits à une composante visuelle, largement incomplète. Les autres impacts étudiés sont relatifs à une meilleure acceptation sociale des projets ou encore à l'impact des éoliennes sur les autres activités (exemple : le tourisme) avec la distance comme facteur majeur de variations. La planification collaborative et la souplesse des gouvernances sont des éléments fondamentaux pour l'acceptation sociale des projets terrestres. Comme pour les autres formes d'EnR, les impacts paysagers sont, par définition de la notion de paysage, liés au site lui-même, à l'intégration du projet dans son site d'accueil (organisation des

parcs, taille d'éoliennes, etc.) et à l'interaction du projet avec les populations locales, incluant les perceptions sociales des paysages d'accueil, mais aussi les activités (notamment économiques) qui utilisent le paysage du territoire comme support de mise en valeur.

En termes de méthodes d'évaluation des impacts sur la biodiversité, de très nombreuses méthodes et modèles visent à évaluer les effets des projets de parcs éoliens terrestres sur la biodiversité. Elles reposent sur des inventaires de terrain (visuels ou à l'aide d'outils comme des enregistreurs acoustiques, des caméras, des radars) et peuvent s'appuyer sur des modèles telles que les modélisations des risques de collision (toutefois peu utilisées pour l'éolien terrestre en France). Des mesures sur site sont également réalisées, notamment pour l'évaluation des phénomènes de mortalité et de dérangement de la faune volante : par exemple, des suivis environnementaux sont imposés à tous les exploitants dans le cadre de la réglementation ICPE. D'une manière générale, ces études ne peuvent être génériques et doivent être adaptées aux spécificités de chaque projet et chaque site de projet. Par exemple, les risques de collision varient fortement en fonction des sites d'implantation (proximité de sites à forts enjeux biologiques, espaces vitaux d'espèces sensibles, couloirs de migration) ainsi qu'en fonction des caractéristiques des éoliennes et leur fonctionnement, des conditions météorologiques, des caractéristiques de l'espèce considérée ainsi que d'autres phénomènes (comme l'évitement des éoliennes) ce qui complexifie l'évaluation du risque.

Dans le cas des sols, des modèles ACV, des mesures satellites et des données issues de projets existants sont utilisés, tout comme pour les autres EnR. Par ailleurs, un certain nombre de publications mentionnent des méthodes d'évaluation mises en œuvre pour des parcs éoliens terrestres non représentatifs du cas français, principalement de grands parcs éoliens américains dont la configuration, l'agencement et les puissances unitaires diffèrent. Si les publications ne peuvent caractériser les impacts de façon pertinente pour le cas français (par exemple, changement de température d'air en surface des sols négligeable), les méthodes d'évaluation n'en restent pas moins intéressantes.

Concernant les impacts sur les paysages, plus encore que pour les autres EnR, les méthodologies d'évaluation mises en œuvre pour l'éolien terrestre sont tournées vers la visibilité et ne permettent ni de favoriser l'intégration paysagère, ni de minimiser les impacts paysagers. A noter toutefois des progrès notables dans la prévision des impacts et dans leurs modalités de représentation. Les enjeux d'acceptabilité sociale, du fait de la visibilité des éoliennes, sont également plus importants, le paysage étant souvent un des principaux arguments avancés dans la contestation des projets. Une véritable concertation en amont et la participation des parties prenantes reste le moyen le plus fiable d'arriver à cette acceptation sociale. Là encore, la notion de paysage de l'énergie permet, très amont du projet, de réfléchir à la construction de nouveaux paysages, dont les éoliennes pourraient être une composante, qu'il ne serait plus pertinent de remettre en cause. Les questions de visibilité deviendraient secondaires et l'acceptation sociale, désamorcée par la planification de la création de ces paysages de l'énergie, deviendrait plus naturelle. L'impact visuel des parcs est déterminé en fonction de plusieurs facteurs notamment le design du parc, l'intégration sur le site (dans son environnement) et l'aspect utilitaire du projet. Comme pour les autres EnR, l'évaluation des paramètres d'acceptation est possible mais reste complexe, avec des résultats très variables, notamment concernant les impacts sur les usages. Les méthodes économétriques permettent de mettre en évidence certaines tendances (rôle de la distance par exemple) mais la quantification précise d'un impact en lien avec ces tendances reste compliquée. Ainsi, la variabilité des résultats concernant les impacts des éoliennes sur d'autres activités (par exemple, le tourisme) ne permet pas de conclure clairement quant à l'impact de cette EnR sur ces activités.

Dans le cadre de projets éoliens précis, la tentative d'objectivation des impacts (via des méthodes économétriques par exemple) devrait être abandonnée au profit des notions de valeurs paysagères, de co-production des projets et de processus ouverts, plus propices pour les projets de production décentralisée. A l'inverse, dans le cadre de la politique énergétique et de la planification des EnR, la recherche de données sur les interactions, positives ou négatives, entre EnR et activités utilisant le paysage (tourisme, immobilier) serait indispensable pour désamorcer des conflits potentiels. La mise à disposition de ces données, croisées avec des données-projet plus précises, permettrait d'évaluer les impacts de certains projets sur ces thématiques.

La littérature analysée ne permet pas de proposer une **comparaison des impacts entre les différentes caractéristiques et technologies d'éoliennes terrestres** ; il s'agit cependant d'un axe de recherche qui semble pertinent afin d'évaluer dans quelle mesure les impacts peuvent être accrus ou, au contraire, minimisés pour des grands parcs et/ou de grandes éoliennes, en comparaison à des parcs

éoliens de plus petite taille et/ou des éoliennes de plus petits gabarits (c'est-à-dire au-delà des impacts ramenés à une unité de puissance ou énergie produite). Le gabarit des éoliennes constitue un aspect cependant souvent pris en compte (bien que parfois de façon théorique) dans le cadre de l'évaluation des impacts de mortalité pour la faune volante. La taille des machines et des parcs est également le principal paramètre de comparaison des impacts paysagers entre parcs éoliens terrestres.

Enfin, en ce qui concerne les **impacts des différentes étapes du cycle de vie**, la majorité des publications traitent principalement des phases d'installation et d'exploitation des éoliennes. Certaines études suggèrent que les impacts relatifs au démantèlement pourraient être similaires à la phase d'installation. Les impacts sur la biodiversité et les sols, relatifs à l'extraction de matériaux utilisés dans les structures, ne sont pas étudiés dans la littérature analysée, bien qu'ils puissent potentiellement être non négligeables.

5. Impacts de l'énergie éolienne en mer

Ce chapitre présente une synthèse des impacts de l'énergie éolienne en mer sur la biodiversité, l'occupation des sols (terrestres et fonds marins), les sols, les sédiments et les paysages identifiés lors de l'analyse bibliographique. Une attention particulière a été portée à la prise en compte du contexte géographique, temporel et institutionnel. Les résultats qualitatifs et quantitatifs sont mis en avant autant que possible, tout comme les méthodes d'évaluation de ces impacts. Les points de divergence et de convergence entre publications sont aussi identifiés.

Au vu des enjeux et impacts relatifs à l'éolien en mer, cette EnR fait l'objet d'un chapitre distinct de l'éolien terrestre et des énergies marines (EMR). Un certain nombre d'enjeux sont cependant communs avec l'éolien terrestre (notamment concernant les paysages ou pour la faune volante) ou avec certaines technologies EMR (particulièrement pour la biodiversité et sols/sédiments).

Les technologies éoliennes en mer ont un principe de fonctionnement similaire aux technologies éoliennes terrestres : elles transforment l'énergie mécanique du vent en énergie électrique grâce à des pales qui font tourner un rotor, lié à un générateur. La majorité des projets d'éoliennes en mer français sont des installations d'éoliennes tripales à axe horizontal. Les éoliennes en mer sont également constituées d'une nacelle abritant les différents composants mécaniques et électroniques de l'éolienne et pouvant pivoter en fonction de la direction du vent. Le mât des éoliennes peut être fixé sur les fonds marins (éolien en mer posé) ou flottant (éolien en mer flottant).

Les fondations des installations varient. Les **éoliennes en mer posées** peuvent être ancrées dans les fonds marins par différents systèmes de fondations : gravitaires, monopieu ou jacket. Les fondations gravitaires occupent une surface des fonds marins plus importante mais, du fait que les éoliennes soient lestées dans les fonds marins et qu'elles restent en place par gravité, elles ne nécessitent pas de travaux et de modifications directes des fonds, contrairement aux fondations monopieu et jacket; les fondations gravitaires requièrent des quantités importantes de matériaux de lestage (sable, gravats, roches...).

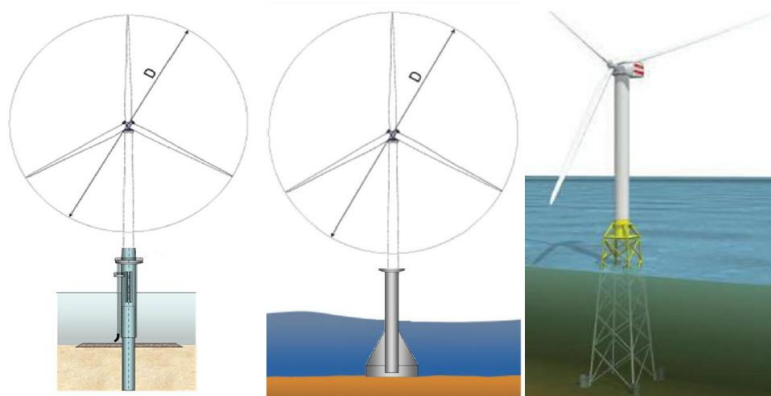


Figure 4 : Types de fondation des éoliennes en mer posées : monopieu, embase gravitaire et jacket (EMF et OWEC)

Les **éoliennes en mer flottantes** sont ancrées au fond marin par divers systèmes : flotteurs (colonne à grand tirant d'eau ou semi-submergé) ou supports à lignes tendues (installations loin des côtes).

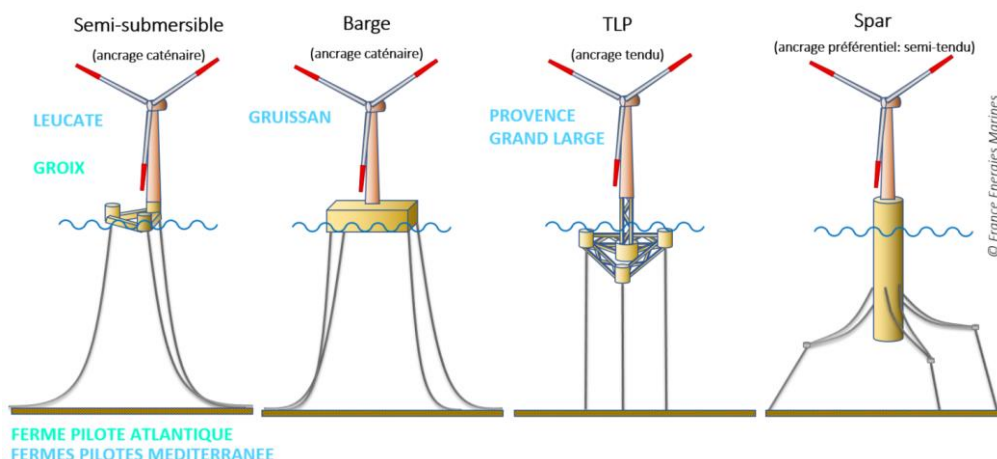


Figure 5 : Types d'ancrage des technologies éoliennes en mer flottantes (France énergies marines)

Les parcs éoliens en mer en Europe sont en moyenne situés à 41 km des côtes, à une profondeur d'eau moyenne de 27,5 m, ce qui s'explique en grande partie par la topographie particulière en mer du Nord (bathymétrie réduite même à plusieurs dizaines de kilomètres des côtes). Les enjeux des impacts sur l'environnement et de la productivité d'un parc varient en fonction de la densité des sites d'éoliennes : en moyenne 8 MW/km² pour 2 à 3 éoliennes installées par kilomètre carré.⁷¹

Les éoliennes en mer sont conçues pour résister à la corrosion (systèmes anticorrosions) et aux développements des organismes marins végétaux et animaux sur les structures (*antifouling*, biocides ou matériaux de construction spécifiques).

Les caractéristiques de ces technologies se situent à l'interface entre l'éolien terrestre et certaines énergies marines renouvelables (infrastructures immergées). En France, l'éolien en mer (et plus spécifiquement flottant) est généralement considéré comme un type d'énergie marine renouvelable.

Il est à noter que le potentiel de développement des parcs éoliens en mer en Outre-mer est plus faible du fait de la bathymétrie sur les lieux (principalement dans le cas de l'éolien en mer posé) ainsi que des zones sismiques et cycloniques (OSPAR Commission, 2008).

5.1. Impacts de l'énergie éolienne en mer sur la biodiversité

Les impacts environnementaux des installations de production d'énergie éolienne font l'objet d'une attention très importante de la communauté scientifique internationale depuis plus de 20 ans, impliquant une volumétrie de publications, articles, livres, actes de conférence extrêmement importante.

La littérature utilisée dans le cadre de la présente étude, ainsi que les démarches ayant spécifiquement trait à l'énergie éolienne sont présentées dans le chapitre 4.1 sur l'éolien terrestre. Par ailleurs, des démarches spécifiques aux EMR et concernant, plus ou moins directement, l'éolien en mer sont également présentées en introduction du chapitre 6.1 relatif aux EMR et biodiversité. Afin d'éviter les répétitions, ces aspects généraux ne sont pas rappelés ici.

Plusieurs démarches traitant des impacts entre éolien en biodiversité et présentés dans le chapitre 4.1 concernent également l'éolien en mer : la conférence CWW, la plateforme collaborative WREN, la base de données Tethys, le programme Eolien et biodiversité. En termes de démarches spécifiques à l'éolien en mer, on peut citer le programme ORJIP⁷² (*Offshore Renewables Joint Industry Programme*) pour l'éolien en mer (Royaume-Uni, Europe).

L'essentiel des publications émane d'Europe du Nord-Ouest (Royaume-Uni, Allemagne, Danemark, Pays-Bas, Belgique, Suède) (Schuster, et al., 2015; Lindeboom, et al., 2015; Lüdeke, 2015) mais

⁷¹ <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/eoliennes-en-mer-offshore>

⁷² <http://www.orjip.org.uk/>



quelques études traitent également d'autres contextes comme la mer Méditerranée (Bray, et al., 2016; Mateos-Rodríguez, et al., 2013; Christel, et al., 2013; Riefolo, et al., 2016).

Des ouvrages de référence, fournissant un bilan complet des effets potentiels de l'éolien sur la biodiversité ainsi qu'une synthèse complète des mesures de réduction d'impacts et de suivi, ont été réalisés sous coordination de Martin Perrow. Dans la continuité de la publication de deux premiers ouvrages concernant l'éolien terrestre et publiés en 2017 (Perrow, 2017a; Perrow, 2017b), deux ouvrages traitant spécifiquement de l'éolien en mer vont être publiés en mars 2019.

Les recherches et analyses bibliographiques réalisées dans le cadre de la présente étude révèlent une attention principalement portée aux phases de construction et d'exploitation des parcs éoliens en mer. Les effets environnementaux des travaux de construction sont particulièrement étudiés pour les parcs éoliens en mer, notamment au regard des productions sonores et impacts associés. Les effets environnementaux des travaux de démantèlement sont souvent comparés à ceux des travaux de construction (impacts sur les substrats et milieux, présence d'engins, bruits, etc.) ; ils sont souvent peu détaillés dans les publications de référence.

5.1.1. Destruction / altération des habitats, modifications des milieux

Le premier impact perceptible des parcs éoliens en mer (comme de la majorité des EMR) consiste en la **destruction et l'altération**, plus ou moins localisée, **d'habitats benthiques** en lien avec l'implantation même de l'installation. Les emprises concernent les dispositifs ancrés, lestés, posés au fond ainsi que les câbles électriques associés. Ces impacts d'emprise sur les habitats benthiques et espèces associées font l'objet d'une attention forte de la communauté scientifique (Copping, et al., 2016; Roche, et al., 2016; Bonar, et al., 2015; Miller, et al., 2013).

Pour l'éolien en mer posé, le type de fondations (monopieu, fondation jacket, gravitaire) et le mode d'installation (battage de pieux, forage, lestage, préparation du substrat) influencent différemment les écosystèmes (niveau de bruit en phase de construction variable, aire d'emprise au sol plus ou moins grande).

Il convient de prendre en considération l'intégralité de la chaîne de production : par exemple, les fondations gravitaires, dont la mise en place est globalement moins bruyante et plus rapide, nécessitent des volumes considérables de granulats, graviers, sable dont l'extraction, en mer et sur terre, produit des impacts (destruction de milieux, altération localisée du fonctionnement des écosystèmes, perturbations sonores).

Lors de la phase de construction, au-delà de la dégradation des fonds, les travaux peuvent engendrer la remise en suspension de matériaux, sédiments ou polluants qui peuvent affecter les activités ou les conditions de vie de nombreux organismes (poissons, benthos, plancton, organismes filtreurs, mammifères marins) (Copping, et al., 2016; Hammar, et al., 2017). Les zones d'influence et la durée des panaches turbides sont très variables selon les travaux, courants, substrats et font généralement l'objet d'études de modélisation au cas par cas.

La présence des parcs éoliens en mer, notamment l'introduction de fondations immergées pour l'éolien posé, engendre des modifications locales des milieux (introduction de substrats durs, progressivement colonisés par des organismes benthiques) (Langhamer, 2012; Bergström, et al., 2014; Raoux, et al., 2017). Ces modifications des milieux sont perceptibles pendant toute la durée d'exploitation du parc éolien. Les fondations peuvent jouer le rôle de récifs artificiels ou de support de développement d'espèces benthiques comme les moules (Langhamer, 2009), ainsi que de zones de développement et de concentration de poissons ou autres prédateurs (Wilhelmsson, et al., 2010; Lindeboom, et al., 2015; Hammar, et al., 2016). En effet, certaines installations (fondations, enrochements) peuvent constituer des niches trophiques intéressantes, favorables au regroupement et au développement de populations d'espèces commerciales de crustacés (Ashley, et al., 2014; Krone, et al., 2017) ou de poissons (Reubens, et al., 2013; van Hal, et al., 2017) et pouvant fortement accroître la biomasse localement (Raoux, et al., 2017; Hammar, et al., 2017). Les effets sont cependant variables selon les espèces, certaines études ne mettant en évidence aucune réaction négative ni positive d'espèces de poissons, notamment pélagiques, à la présence des fondations immergées (Langhamer, et al., 2018; Floeter, et al., 2017). En termes d'effets négatifs possibles, la présence de parcs éoliens en mer peut constituer des zones relais et ainsi favoriser la vitesse d'expansion de certaines espèces introduites/allochtones, d'autant plus des espèces compétitives pouvant exploiter rapidement les nouvelles installations ou les enrochements. L'arrêt de la pêche au chalut au niveau des fondations d'éoliennes peut avoir des effets

locaux bénéfiques (effet réserve), qui sont cependant particulièrement complexes à quantifier (Ashley, et al., 2014; Lindeboom, et al., 2015).

Les effets spécifiques des parcs éoliens en mer flottants sont très peu développés dans la littérature. En termes d'emprises, ces parcs sont plus proches d'autres installations EMR que des parcs éoliens en mer posés : il n'y a pas de fondations au sol, seuls des ancrages sont nécessaires (ancrages pouvant être installés par forage notamment). Les éoliennes flottantes nécessitent cependant plusieurs ancrages, distants de quelques dizaines de mètres, ce qui conduit à des zones d'emprise (non totalement remaniée) plus importantes que l'éolien posé. Les impacts des mouvements des lignes d'ancrage sur les fonds marins (frottement) constituent un point d'attention particulier.

Les opérations de démantèlement des parcs éoliens en mer font l'objet d'une attention croissante de la communauté scientifique, avec l'arrivée en fin de vie de plusieurs parcs éoliens en Europe à compter de 2019/2020 puis plus fortement à partir de 2025 (Topham, et al., 2017; May, et al., 2017; Smyth, et al., 2015). Etant donné le développement d'écosystèmes fixés sur les fondations, le rôle possible de récifs voire de réserves (en cas d'absence de pêche), la question du retrait total ou partiel des fondations est posée par certains auteurs : une analyse des impacts positifs et négatifs des deux approches est préconisée, avec prise en considération des services écosystémiques associés aux parcs éoliens en mer (Smyth, et al., 2015).

De même que pour l'éolien terrestre, les impacts de modifications, destruction ou altération de milieux associés aux projets d'éolien en mer (notamment posé) sont très spécifiques à chaque site et caractéristiques de projet. En France, le guide méthodologique des études d'impact des parcs éolien en mer (MEEM, 2017) fournit un cadre méthodologique et des recommandations, nécessairement adaptées à chaque site.

5.1.2. Dérangement des individus et modification des activités

En phase travaux

Deux grands types d'effets sont associés aux travaux de construction de parcs éoliens en mer, notamment avec fondations posées :

- **Des perturbations** pouvant entraîner des phénomènes d'évitement de la zone **lors des phases de construction et de démantèlement** (réponse physique à des *stimuli* visuels ou sonores). Les perturbations sonores constituent les atteintes les plus étudiées, notamment sur les mammifères marins, poissons, tortues marines et invertébrés ;
- **Des destructions localisées et altérations du milieu** pouvant impacter directement des habitats et espèces benthiques ou bien engendrer des atteintes aux milieux de vie d'espèces mobiles (voir section 5.1.1).

D'autres impacts possibles sont non spécifiques à l'éolien en mer, mais généraux aux travaux maritimes (risques de pollutions, augmentation de la turbidité) et au trafic maritime (risques de collisions de la faune marine avec les navires, bruits de navigation).

La grande majorité des publications traitant de ces aspects se focalisent sur les impacts des bruits. Aussi, une synthèse plus poussée des bruits en phase travaux est fournie ci-dessous.

La production de bruit peut concerner les phases de construction, d'exploitation et de démantèlement des éoliennes en mer. Les bruits produits par des travaux et par le fonctionnement des installations peuvent présenter des signatures acoustiques très différentes, concerner des fréquences variées et représenter des volumes sonores hétérogènes. De nombreux groupes biologiques marins sont sensibles aux bruits de leur environnement, en premier lieu les mammifères marins, poissons et tortues marines. La sensibilité acoustique des invertébrés fait l'objet de moins d'études à ce jour et d'une attention plus récente. Des effets néfastes de certains bruits sous-marins ont été constatés sur plusieurs groupes d'espèces (céphalopodes, crustacés, bivalves, etc.) : perturbation de comportements, stress, diminution des réactions de fuite, altération des activités d'alimentation (Weilgart, 2018; Hawkins, et al., 2017; Edmonds, et al., 2016; Tidau, et al., 2016; Thomsen, et al., 2015). Les effets des bruits sur les organismes marins ne sont pas spécifiques aux parcs éoliens en mer ou aux autres EMR et font l'objet de nombreuses études et conférences dédiées (par exemple la conférence OCEANOISE, ayant lieu tous les deux ans, ou les travaux de l'IONC, coalition internationale sur les bruits océaniques). Les bruits de trafic maritime, les activités sismiques, les activités militaires, les activités d'exploitation pétrolière et de gaz constituent des activités particulièrement ciblées, en lien avec des bruits (individuels ou cumulés)

engendrant une modification profonde des écosystèmes marins (forte augmentation du bruit sonore ambiant à l'échelle mondiale). Des études spécifiques concernent la sensibilité acoustique des espèces protégées (cétacés, pinnipèdes, tortues) et exploitées commercialement (ex : morue, seiche, coquille Saint-Jacques). Des études traitent cependant, plus spécifiquement, sur les effets des phases de construction ou d'exploitation d'unités de production d'énergies en mer (éolien en mer et autres EMR) (Tougaard, 2015; Thomsen, et al., 2015; Marmo, 2017; Lossent, et al., 2017; Hammar, et al., 2017).

Les principales sources sonores sont liées au trafic maritime ainsi qu'aux travaux de préparation des fonds marins, d'installation de fondations ou d'ancrages (éventuel battage de pieux, forage).

Le type de fondation utilisée (monopieu, jacket ou gravitaire), les techniques employées pour les installer (battage, forage...) et la nature du substrat influencent fortement les niveaux sonores produits et, en conséquence, les impacts engendrés (Norro, et al., 2013; Schuster, et al., 2015). Les bruits les plus forts sont généralement associés au battage de pieux. Les effets des bruits sur les organismes marins peuvent être appréhendés à travers la modélisation de signature acoustique, des modèles de propagation des sons permettant de déterminer les puissances sonores perçues en fonction de différentes fréquences acoustiques et à diverses distances de la source de bruit⁷³. Ces modèles doivent être combinés à des estimations du déplacement des animaux pour déterminer les niveaux d'énergie acoustique reçus en fonction de la durée d'exposition cumulée, afin d'en déduire l'impact sur un individu.

Les risques associés à des sons puissants, dans des fréquences perceptibles utilisées par les organismes marins, concernent le masquage des écholocations, le changement de comportements voire des lésions tissulaires / dommages physiologiques (poissons, mammifères marins), pouvant engendrer des pertes d'audition temporaires, voire permanentes et, dans les cas extrêmes, la mort de l'animal (Schuster, et al., 2015). Les bruits produits par des opérations de battage de pieux peuvent être très puissants et se propager sur de très grandes distances. De nombreuses études ont été menées sur les impacts possibles sur des mammifères marins, notamment vis-à-vis des risques de pertes de capacités auditives voire de mortalité induite (Schuster, et al., 2015). Par ailleurs, de nombreuses études ont prouvé que les opérations de battage de pieux engendraient les déplacements temporaires de certaines espèces de mammifères marins (gêne comportementale), le Marsouin commun et les phoques ont sur ce point fait l'objet de très nombreuses études en mer du Nord et mer Baltique (Schuster, et al., 2015; Dähne, et al., 2017; Thompson, et al., 2013).

Les effets des bruits sur les poissons font l'objet de publications dédiées (voir notamment (Hawkins, et al., 2017)). Les effets des bruits sous-marins sur les comportements d'espèces de poissons migrateurs comme les anguilles ou les saumons, et leurs éventuels impacts biologiques, sont encore mal connus (Gill, et al., 2012). Les effets des bruits de travaux sous-marins sur les oiseaux ne sont actuellement pas documentés.

Pour de nombreuses espèces, un retour progressif des animaux après la fin des travaux a été observé, de façon plus ou moins rapide (Schuster, et al., 2015).

Comme pour tous les effets d'aménagement, une attention forte est portée aux impacts induits. Or, de nombreux auteurs relèvent l'importance de considérer les effets à large échelle, sur les populations d'espèces et à l'échelle de vastes zones géographiques (Bailey, et al., 2014; Willsteed, et al., 2017; Willsteed, et al., 2018). Un guide méthodologique intéressant a été édité aux Pays-Bas sur l'évaluation des effets du battage de pieux sur le Marsouin et les phoques, ainsi que l'évaluation des conséquences de ces impacts sur les populations (Heinis, et al., 2015). Ce document introduit le nombre de jours de perturbation (« *animal disturbance days* ») comme un indicateur des impacts acoustiques sur ces espèces.

Il convient de noter que les impacts sonores en phase de construction des parcs éoliens en mer (posés) sont associés à de nombreuses mesures de réduction des impacts, via diverses techniques (réduction des bruits à la source par l'utilisation de techniques moins bruyantes, démarrage progressif des travaux avec montée en puissance des sons, confinement des mâts en cas de battage, mise en place de rideaux de bulles ou barrière physique à la propagation des sons, etc.).

Les effets de perturbations de la faune en phase travaux sont largement documentés dans la littérature pour les parcs éoliens en mer posés sur l'aspect « impacts sonores ». Il s'agit d'un des principaux impacts envisageables, notamment sur les mammifères marins, poissons et d'autres espèces marines. Les impacts acoustiques sont très dépendants des caractéristiques des parcs (fondations) et modalités de construction. Par ailleurs, des manques de connaissance

⁷³ Deux référentiels principaux sont utilisés pour les seuils de sensibilité acoustique : Southall et al., 2007 et NOAA, 2016

demeurent sur la sensibilité de nombreuses espèces marines ainsi que sur les effets comportementaux et populationnels des impacts acoustiques. Les autres effets possibles (perturbations physiques et visuelles), qui concernent l'éolien en mer posé et flottant, ne sont quant à eux que très peu abordés dans les publications analysées.

En phase d'exploitation (effets déplacement, effet barrière et bruit)

La présence des éoliennes et des fondations peut engendrer des modifications des milieux et des cortèges d'espèces benthiques et démersales (voir section 4.1.1), par effet récif ou élément agrégatif.

Les effets de la présence d'éoliennes en mer sur la répartition, les stationnements et les activités alimentaires des oiseaux marins fait l'objet d'une attention forte de la communauté scientifique.

De nombreux travaux visant à déterminer la sensibilité des espèces d'oiseaux marins à la présence d'infrastructures en mer (et autres activités humaines) ont été publiés, notamment en Europe (Furness, et al., 2013; Bradbury, et al., 2014; Wade, 2015; Garthe, et al., 2017; Humphreys, et al., 2015) et aux Etats-Unis (Adams, et al., 2016; Kelsey, et al., 2018). Sur la base des retours de suivis de plusieurs parcs éoliens en mer en Europe, des synthèses spécifiques ont été publiées sur ce sujet (Dierschke, et al., 2016; Vanermen, et al., 2015).

Pour exemple, des évitements plus ou moins prononcés des éoliennes en mer ont été notés chez plusieurs espèces d'oiseaux marins (alcidés, plongeurs, Fou de Bassan) (Furness, et al., 2013; Wade, 2015; Vanermen, et al., 2015; Busch, et al., 2016; Dierschke, et al., 2016; Dierschke, et al., 2017; Garthe, et al., 2017). D'autres espèces semblent globalement indifférentes (goélands) voire même attirées par le rôle de perchoirs qu'offrent certaines éoliennes (cormorans). Les réactions pour une espèce donnée peuvent être très variables selon les parcs éoliens (Schuster, et al., 2015; Vallejo, et al., 2017). Aussi, l'anticipation des impacts de la construction et du fonctionnement d'un parc éolien en mer sur les oiseaux marins doit se baser sur le croisement de nombreuses sources bibliographiques, en complément des études menées à l'échelle locale.

Enfin, de nombreuses études spécifiques sont réalisées pour mieux comprendre cet effet déplacement et ses conséquences sur les dynamiques de populations d'oiseaux marins (voir notamment (Garthe, et al., 2017; Busch, et al., 2016; Busch, et al., 2015).

Au-delà des effets déplacement, pouvant entraîner une perte d'utilisation de secteurs favorables à l'alimentation ou au stationnement des oiseaux, la présence d'éoliennes en mer peut engendrer des surcoûts énergétiques pour les espèces sujettes à l'effet barrière (contournement du parc éolien) (voir notamment (Cook, et al., 2014; Schuster, et al., 2015). Des modèles d'évaluation de ces surcoûts ont été élaborés au Royaume-Uni (Masden, et al., 2010).

Le fonctionnement des éoliennes en mer peut être à l'origine d'émissions sonores, bien qu'elles soient nettement plus faibles que lors de la construction. La majorité des études traitant des effets acoustiques des parcs éoliens en exploitation indique des effets négligeables (Schuster, et al., 2015). Le type de fondation, d'éoliennes et la vitesse des vents influencent les bruits produits en exploitation (Schuster, et al., 2015) (Marmo, et al., 2013).

Une analyse des effets à large échelle (effets cumulés) est recommandée pour appréhender les conséquences des pertes d'habitats ou des perturbations d'individus sur les populations d'espèces (Busch, et al., 2013; Leopold, et al., 2014; Lindeboom, et al., 2015). En France, le Ministère en charge de l'environnement (MTES) pilote actuellement un groupe de travail d'experts scientifiques sur le sujet des effets cumulés des EMR (dont éolien en mer). Ce GT est animé par le CEREMA et l'AFB et coordonné par France Énergies Marines. Il a pour objectif de mieux appréhender cette notion en mer et d'avoir une vision sur une échelle spatiale importante (façade).

L'effet déplacement et l'effet barrière liés à la présence d'éoliennes en mer sont largement abordés dans la littérature. Initialement envisagées de façon théorique avec des indices, les connaissances concernant la sensibilité réelle des espèces d'oiseaux marins à la présence d'éoliennes en mer s'enrichissent progressivement, au fil des retours d'expérience sur des parcs en exploitation (Europe du nord-ouest notamment). Les effets comportementaux sont très variables selon les espèces, certaines étant fortement perturbées (éloignement), d'autres attirées, d'autres ne présentant pas de réactions claires. Une forte variabilité est cependant parfois notée entre les parcs éoliens, pour les mêmes espèces. L'amélioration continue des connaissances sur ces aspects est un enjeu important.

5.1.3. Blessures ou mortalité d'individus (en phase d'exploitation)

Comme pour les éoliennes terrestres, le fonctionnement des éoliennes en mer peut engendrer des collisions / mortalités pour la faune volante. En mer, l'essentiel des études portent sur les oiseaux marins et les oiseaux migrateurs, mais des risques existent également pour les espèces de chiroptères migratrices au long cours et susceptibles de voler en mer (notamment la Pipistrelle de Nathusius et les noctules) (Brabant, et al., 2016).

Les paramètres influençant les risques de collision, non spécifiques à l'éolien en mer, ont été présentés dans le chapitre 4.1.3 et ne sont pas repris ici.

L'évaluation des mortalités effectives en milieu marin est particulièrement complexe à l'heure actuelle, en l'absence de possibilité de rechercher des cadavres, et ce malgré le développement de projets R&D de surveillance automatisée comme des radars ou des caméras thermiques (Hill et al., 2014 cité dans Schuster, et al. (2015)). Une étude des comportements de vol des oiseaux au niveau du parc éolien en mer de Thanet (Royaume-Uni) vient d'être publiée après trois ans d'étude (Skov, et al., 2018). Quelques cas de collision ont été observés (6 cas en 3 ans d'étude) mais les proportions d'évitement mis en évidence semblent supérieures à celles initialement envisagées. Des informations inédites ont été compilées sur les comportements de méso et micro-évitement des oiseaux marins, ainsi que sur quelques cas de collisions enregistrés. Il s'agit d'une première étude, qui ne concerne que quelques espèces et qui appelle des expertises complémentaires visant à mieux caractériser ces phénomènes et permettre, à terme, d'affiner la compréhension des risques de collision des oiseaux en mer avec les éoliennes. De nouveaux programmes de recherche sur ce sujet sont envisagés au Royaume-Uni.

L'utilisation de modélisations des risques de collision est largement développée dans le cadre des projets éoliens en mer, notamment en Europe du nord-ouest (voir notamment (Masden, et al., 2016)). Les modèles de collision demeurent des outils qui fournissent non pas des nombres prédictifs exacts d'individus entrant en collision avec les pales des éoliennes mais des estimations des risques. L'intérêt majeur réside dans les comparaisons interspécifiques des risques et l'obtention de fourchettes indicatives de ces risques, permettant de hiérarchiser les espèces par rapport à leurs risques de mortalité. Des améliorations continues sont apportées aux modèles d'évaluation des collisions, afin d'affiner les données entrantes, la prise en compte des facteurs d'incertitudes (comportement des oiseaux, hauteurs de vol, taux d'évitement) (Johnston, et al., 2014; Cook, et al., 2014).

En mer du Nord, le développement de nombreux parcs éoliens en mer conduit à des approches basées sur la caractérisation des effets cumulés à l'échelle de vastes zones géographiques, et le recours à des modèles de détermination des effets sur les populations d'espèces de la mortalité d'individus (Brabant, et al., 2015; Cook, et al., 2015; Adams, et al., 2016).

Les phénomènes de mortalité de la faune volante pour les parcs éoliens en mer sont, comme en milieu terrestre, particulièrement traités dans la littérature, principalement pour les oiseaux et, plus secondairement, les chiroptères. Contrairement au milieu terrestre, le recours aux modèles d'évaluation des collisions est très développé, notamment dans les pays d'Europe du nord-ouest. Des améliorations sont apportées régulièrement à ces modèles ainsi qu'aux données entrantes nécessaires (comportements et activités de vol des oiseaux marins notamment). La validation des modélisations de collision fait l'objet de travaux de recherche récents, à poursuivre.

5.1.4. Modifications des paramètres environnementaux

La construction et l'exploitation des parcs éoliens en mer peuvent engendrer d'autres types d'impacts :

- L'apport de polluants et produits chimiques (peinture *antifouling*⁷⁴ ou anodes sacrificielles par exemple) ;
- Champs électromagnétiques au niveau des câbles de transport d'électricité entre les unités de production et le poste électrique en mer, ainsi que vers le poste de raccordement terrestre.

⁷⁴ Biocide empêchant la prolifération d'organismes biologiques aquatiques

Champs électromagnétiques

Selon l'état des connaissances actuel, de nombreux organismes marins possèdent des capacités à percevoir et répondre à la présence de champs électromagnétiques : élasmobranches, crustacés, cétacés, tortues marines et d'autres espèces de poissons (agnates, téléostéens) (Copping, et al., 2016; Thomsen, et al., 2015). La majorité de ces animaux sont considérés comme magnéto-sensibles, certaines espèces étant électrosensibles (Gill et al., 2014 cité dans Copping, et al. (2016)). Il est suggéré par certains auteurs que les espèces électrosensibles peuvent potentiellement détecter des champs électromagnétiques provenant de courants continus et alternatifs, de même que les espèces magnéto-sensibles qui seraient cependant plus sensibles aux courants continus. En termes d'électrosensibilité, les élasmobranches (requins, raies) sont considérés comme particulièrement sensibles aux champs électromagnétiques qu'ils rencontrent, les seuils de détection les plus bas identifiés étant compris entre 5 et 20 nV/cm (Kalmijn, 1982 ; Tricas et al., 1998; Bedore et al., 2013 cité dans Copping, et al. (2016) et Taormina, et al. (2018)). Peu d'études traitent des conséquences de l'ajout de champs électromagnétiques sur les espèces qui y sont sensibles, les principaux effets suspectés étant : effets physiologiques, attraction ou évitement, modifications comportementales (y compris relations proies / prédateurs), altération des déplacements locaux ou en migration (Taormina, et al., 2018). Dans le cadre de leur synthèse récente, Copping, et al. (2016) indiquent clairement que l'étape suivante sur ce sujet est de compiler des informations factuelles sur ces effets, notamment la probabilité de leur occurrence.

L'introduction dans leur environnement de nouveaux champs électromagnétiques peut potentiellement engendrer des effets sur ces animaux (effets sur les déplacements, effets sur les capacités de détection de proies ou prédateurs, attraction ou évitement, etc.) (Bonar, et al., 2015; Copping, et al., 2016). Les effets d'attraction ou d'évitement semblent les plus notables.

De nombreuses incertitudes demeurent néanmoins sur les effets et réponses de ces organismes à l'introduction de champs électromagnétiques dans leur environnement. En ce sens, il est recommandé de réaliser des études expérimentales *in situ* (Thomsen, et al., 2015). Par ailleurs, les sensibilités semblent varier selon les espèces et les stades de développement (Copping, et al., 2016).

En France, un projet collaboratif traitant spécifiquement des effets environnementaux des câbles sous-marins est en cours ; le projet SPECIES (« Submarine PowER Cables Interactions with Environment & associated Surveys »). Ce projet collaboratif, piloté par France Energies Marines, regroupe différents partenaires aussi bien industriels qu'académiques. SPECIES vise à améliorer les connaissances sur les interactions potentielles entre les câbles électriques sous-marins et les écosystèmes benthiques côtiers. Une publication récente sur les enjeux environnementaux associés aux câbles sous-marins a été publiée en France (Taormina, et al., 2018).

Dans le cadre du projet MaRVEN (Thomsen, et al., 2015), des mesures de champs électromagnétiques ont été réalisées sur deux parcs éoliens en mer en Belgique (Northwind et C-Power), à l'aide d'un instrument spécifique. Ces travaux ne mettent pas en évidence de champ électromagnétique puissant à proximité des fondations des éoliennes (champ électromagnétique très faible, considéré négligeable). Les auteurs indiquent que des champs plus puissants sont induits par les câbles de raccordement terrestre, plus puissants. Le caractère continu ou alternatif du courant semble également jouer un rôle sur la puissance des champs induits. Des mesures des champs électromagnétiques produits ont été réalisées sur plusieurs parcs éoliens en mer mais les auteurs concluent que d'autres études, à large échelle, seront nécessaires pour mieux appréhender ces phénomènes. Par ailleurs, les câbles de parcs éoliens en mer du Nord sont généralement ensouillés sous une épaisseur d'environ un mètre de sédiment, ce qui suffit à absorber une grande partie du champ électromagnétique. Ces résultats ne peuvent donc pas être transposés tels quels à des environnements plus dynamiques où le substrat peut être rocheux, ce qui impose de fixer les câbles au fond sans les recouvrir. Il n'existe pas à ce jour de méthodologie standard d'évaluation des effets environnementaux des champs électromagnétiques en milieu marin (Thomsen, et al., 2015).

La majorité des études réalisées à ce jour, en mer ou en laboratoire, s'attache à analyser les implications comportementales des champs électromagnétiques sur des organismes marins. Des réactions claires de perturbations comportementales induites par des champs électromagnétiques ont été mises en évidence par certaines études (Woodruff et al., 2012 ; Westerberg & Lagenfelt, 2008 ; Gill et al., 2009 cités dans Copping, et al. (2016)). Cependant, il est, d'après les auteurs, très délicat de tenter de généraliser les résultats de ces études expérimentales.

A ce jour, aucune preuve d'impact significatif (négatif ou positif) de champs électromagnétiques additionnels liés aux câbles sous-marins n'a été caractérisée (Gill et al., 2009 cité dans Copping, et al. (2016)). Cependant, le déploiement à large échelle de projets éoliens en mer amène de nombreux auteurs à recommander des études spécifiques, notamment des impacts cumulés (Copping, et al., 2016; Roche, et al., 2016).

Des travaux en cours ne ciblent pas nécessairement les EMR ni l'éolien en mer, mais contribuent à réduire les incertitudes entourant les effets des champs électromagnétiques sur les organismes marins, notamment les élaémobranthes (Hutchison, et al., 2018).

Les champs électromagnétiques associés aux câbles sous-marins (liaisons entre éoliennes et raccordement vers la côte) sont abordés dans plusieurs publications et rapports étudiés. Les câbles électriques sous-marins émettent des champs électromagnétiques, dont la puissance et la signature sont variables (type de câbles, puissance électrique transmise, type de courant, type de protection du câble, etc.). D'après une synthèse de référence (Copping, et al., 2016) aucun effet significatif sur la biodiversité n'a été, à ce jour, mis en évidence. L'évaluation des effets de ces champs électromagnétiques additionnels sur les espèces connues comme sensibles demeure cependant un sujet complexe, sur lequel des recherches complémentaires sont en cours.

Changements physico-chimiques

Les travaux de construction ainsi que les modifications hydrodynamiques sont susceptibles d'engendrer la remise en suspension de sédiments, pouvant libérer des micropolluants stockés ou des nutriments susceptibles de contribuer à l'eutrophisation.

Comme tous travaux en mer, les opérations de construction, maintenance et démantèlement peuvent engendrer des pollutions, en cas de fuite de contaminants chimiques (Boehlert, et al., 2010; Bonar, et al., 2015; Roche, et al., 2016).

Par ailleurs, l'utilisation (non systématique) de peinture *antifouling* (contenant des composés biocides), d'anodes métalliques anti-corrosion ou de lubrifiants peut engendrer des risques de contamination des organismes et chaîne trophique (Gasparatos, et al., 2017; Bonar, et al., 2015; Polagye, et al., 2010). En France, l'utilisation de peintures *antifouling* dans le cadre des parcs éoliens en mer n'est pas privilégiée. Des éléments complémentaires sont fournis en section 5.2.3 relative aux impacts chimiques potentiels sur les fonds marins.

Ces risques ne sont pas spécifiques aux éoliennes en mer et aux EMR, et sont globalement bien appréhendés. Si des fuites accidentelles importantes de polluants peuvent engendrer des effets néfastes sur de nombreux groupes biologiques, les impacts de pollutions chroniques sont plus limités. Rien n'indique à ce jour que les installations éoliennes en mer engendrent des menaces particulières sur ces aspects, qui doivent cependant être considérés dans le développement des projets et les besoins de maintenance (Copping, et al., 2016; Roche, et al., 2016).

La protection des fondations par pose d'anodes sacrificielles est associée à des questionnements sur les relargages de métaux (zinc et aluminium notamment). Bien que ce sujet fasse l'objet d'une attention particulière en France, il est cependant très peu abordé dans les publications internationales analysées, y compris dans des pays où l'éolien en mer est très développé. Par ailleurs, la protection des fondations par anodes sacrificielles n'est pas systématique (protection cathodique par courant imposé envisagée sur certains projets de parcs éoliens en mer – voir également la section 5.2.3 relative aux impacts chimiques potentiels sur les fonds marins).

A noter que la phase d'extraction de certains matériaux utilisés dans les éoliennes en mer peut avoir un impact non négligeable sur la pollution des sols et de l'eau. Ces impacts ne sont cependant pas étudiés dans le cadre spécifique de structures EnR, ainsi qu'expliqué en section 5.2.3.

Les documents analysés dans le cadre de la revue bibliographique ne traitent que très secondairement des effets relatifs aux modifications physico-chimiques des milieux dans le cadre du développement de projets éoliens (projets éoliens en mer posés essentiellement). Les principaux aspects abordés sont les pollutions chroniques liés à des relargages de produits chimiques ou métaux dans l'environnement, pour lesquels les retours d'expérience et preuves d'impact sont peu nombreux.

5.1.5. Méthodes d'évaluation des impacts, méthodes de suivi et incertitudes

A l'échelle française, un guide méthodologique pour l'éolien en mer a été élaboré en 2017 sous l'égide du Ministère de l'environnement (MEEM, 2017). Le guide éolien en mer (actualisation 2017) fournit des recommandations méthodologiques détaillées, ainsi que des fiches thématiques. Au-delà de recommandations générales, ce guide insiste fortement sur les nécessaires adaptations des protocoles d'étude aux spécificités locales des projets.

Il existe de nombreuses méthodes et modèles visant à évaluer les effets des projets de parcs éoliens en mer sur la biodiversité, une majorité d'entre eux ciblant les oiseaux et chiroptères ainsi que les mammifères marins. Ces modèles concernent, en premier lieu, l'évaluation des mortalités (collision de la faune volante) et des perturbations (effet déplacement) (voir détails dans les sections spécifiques 5.1.1 à 5.1.4). L'utilisation de modèles est particulièrement développée pour l'éolien en mer. Par ailleurs, les retours d'expérience de suivis de parcs en exploitation (Europe du nord-ouest principalement) permettent de disposer d'une base de connaissances de plus en plus précise.

5.2. Impacts de l'énergie éolienne en mer sur les sols et les sédiments

Les impacts sur les sols et les sédiments de l'énergie éolienne en mer sont peu étudiés en comparaison aux impacts sur la biodiversité. La revue bibliographique d'une dizaine de publications a permis de mettre en exergue les principaux impacts chimiques, physiques et biologiques de l'utilisation des sols, induits par les éoliennes en mer (posé et flottant). Les impacts mentionnés couvrent dans leur grande majorité les phases d'installation, de fonctionnement et de démantèlement des infrastructures.

Parmi le corpus analysé, les impacts associés aux phases amont (extraction des matériaux primaires et fabrication des composants) et aval (gestion en fin de vie des structures) ne font pas l'objet d'une évaluation poussée. Même lorsqu'ils sont mentionnés, il n'est généralement pas possible de les mettre en regard des impacts générés par les phases sur le site de production d'énergie.

De même, les étapes de démantèlement des éoliennes sont peu traitées : la phase opérationnelle durant environ 25 ans, la majorité des projets en mer sont encore opérationnels. Néanmoins, certaines publications indiquent que les effets sur les sols et les sédiments liés au démantèlement seront probablement similaires à ceux identifiés lors de la phase d'installation. Certaines techniques comme le *cutting* pourraient être favorisées pour l'enlèvement des structures plantées au lieu du forage (MEDDE, 2012) ou de l'usage d'explosifs. Par ailleurs, certains aspects du démantèlement des éoliennes en mer pourraient être similaires aux autres structures en mers telles que les plateformes gazières ou pétrolières (OSPAR Commission, 2006).

Les publications traitent principalement des éoliennes en mer posées et très peu des dispositifs en mer flottant. Il ressort de la revue de littérature que certains impacts et/ou leur intensité varient entre l'éolien en mer posé et flottant, mais aussi en fonction du type de fondation (pour différents projets en mer posé). Si aucun article n'en fait une analyse comparée, les enjeux liés à l'éolien flottant semblent néanmoins moindres du fait de l'emprise et de travaux moins importants sur les fonds marins et d'une installation plus loin des côtes.

Enfin, plusieurs publications mentionnent la nécessité de prendre en compte les effets cumulés de projets éoliens sans les décrire précisément ou les évaluer. Par ailleurs, l'impact des éoliennes en mer vient se superposer à d'autres pressions anthropiques sur l'environnement marin telles que la surpêche, la pollution ou encore l'acidification des océans. Les effets cumulés sont mentionnés mais sont très peu connus actuellement (Tabassum, et al., 2014). Le groupe de travail piloté par le MTES vise notamment à mieux appréhender ces aspects (voir section 5.1.2).

En ce qui concerne la typologie des milieux marins, plus de 70 % des plateaux (dans le monde) sont couverts par des sédiments perméables sablonneux (Boudreau et al., 2001; Janssen et al., 2005; Meysman et al., 2007 cités dans Coates, et al. (2014)). Les parcs éoliens en mer sont presque exclusivement implantés sur des sédiments de boue, argile, sable ou graviers selon la *Global Offshore Wind Farms Database* (Hammar, et al., 2016). Il est néanmoins possible que de futurs projets soient implantés sur les fonds rocheux (Hammar, et al., 2016).

5.2.1. Impacts en termes de surfaces de sols et fonds marins

Les impacts relatifs à **la planification des fonds** sont étudiés dans plusieurs publications, et font référence à l'emprise requise lors de l'installation et de l'exploitation du parc éolien en mer. Il n'est pas fait mention dans la littérature des impacts générés lors d'autres étapes du cycle de vie des structures (notamment impact sur les sols terrestres). Au niveau d'un parc éolien, l'occupation des fonds marins est limitée aux surfaces des fondations, et aux systèmes de raccordement terrestre ; l'emprise sur les sols terrestres concerne les postes de raccordement, communs à tout système de production d'énergie. Plusieurs publications, dont l'étude ADEME (2015) qui s'est intéressée à l'analyse du cycle de vie de la production d'électricité d'origine éolienne (terrestre) en France, indiquent que l'occupation de la surface est moindre dans le cas de l'éolien en mer que dans le cas de l'éolien terrestre.

Les surfaces occupées par les fondations sont variables selon le type de technologie et les choix d'aménagement. Dans le cas de fondations gravitaires (posées sur les fonds marins et stabilisées du fait de leur poids), les ordres de grandeur sont entre 500 et 2 000 m² par turbine (puissance non précisée), selon qu'est considérée l'emprise de la base gravitaire uniquement (diamètre d'environ 23 m) ou avec les matériaux anti-affouillement (couche filtrante en gravier concassé et couche de protection supérieure en roche de carrière) (MEDDE, 2012; Coates, et al., 2014). Dans le cas d'une fondation monopieu (enfoncée dans les fonds marins, et qui représente la majorité des fondations existantes dans le monde pour l'éolien en mer posé), l'emprise est d'environ 30 m² (diamètre de la base d'environ 5 m) (MEDDE, 2012), voire moins lorsqu'une fondation jackets est utilisée (quatre pieds ancrés par des pieux).

L'emprise sur les fonds marins dans le cas de l'éolien flottant est généralement moindre que pour l'éolien en mer posé : elle se limite à l'ancrage dans les fonds marins des câbles retenant la structure flottante. Cependant, les ancrages pouvant être espacés de plusieurs dizaines de mètres, l'occupation du milieu par des éoliennes flottantes peut être plus impactant que celle générée par des éoliennes posées. De plus, l'effet de ragage induit par le frottement des lignes d'ancrage sur les fonds marins représente une emprise spatiale qui peut être importante. Aucune publication évaluant ces différences entre éolien en mer flottant et posé n'a cependant été identifiée lors de la revue de littérature.

Les câbles sous-station en mer, les câbles inter-éoliens et les câbles de la sous-station à la zone d'atterrissage utilisés pour le raccordement au réseau peuvent également être considérés dans le calcul de la surface occupée par un parc éolien en mer ; l'emprise associée reste cependant négligeable, d'autant plus lorsque les câbles sont posés sur les fonds plutôt qu'ensouillés. A noter que dans la majorité des futurs parcs éoliens en mer français, où les fonds sont majoritairement meubles, les câbles pourront être ensouillés. Lorsque les fonds sont rocheux, les câbles sont recouverts d'un matelas ou d'enrochement. Les ordres de grandeur disponibles sont autour de 10 à 15 m²/km pour les câbles posés et 2 000 m²/km pour les câbles ensouillés (MEDDE, 2012).

Au niveau d'un parc éolien, l'emprise sur les fonds est observée durant les années d'exploitation des éoliennes uniquement, en raison de l'obligation légale pour les exploitants de démanteler les turbines et fondations et de restituer en état les fonds marins, en fin de projet.

Au niveau des parcs éoliens en mer, l'emprise sur les fonds marins et le littoral (infrastructures et raccordement) est négligeable et semble suffisamment documentée.

Dans le cas de l'éolien en mer, les enjeux relatifs au **co-usage** sont envisagés à l'échelle de l'espace maritime : l'emprise des éoliennes en surface peut créer de potentiels conflits avec les activités existantes, par exemple de pêche (en regard de l'interdiction potentielle de certaines activités dans la zone du parc), et ce pour l'éolien en mer flottant et posé. Ces aspects ne sont pas traités dans la littérature concernant les impacts sur les fonds marins, mais plutôt concernant les impacts sur les paysages (voir section 5.3 relative aux impacts sur les paysages).

L'**artificialisation des fonds marins** dans le cas de l'éolien en mer est négligeable, et se limite aux surfaces des fondations (dans le cas d'un ancrage au niveau des fonds marins, par exemple pour une fondation monopieu) et autour des câbles de raccordement en cas d'ensouillage, due aux travaux d'excavation, à l'apport de matériaux exogènes, etc. A noter que cette technique d'installation par ensouillage reste toutefois moins utilisée que la pose de câbles, car ne se prêtant pas aux substrats très durs ou peu homogènes (Péguin, et al., 2014).

Ainsi, le niveau d'artificialisation est fonction du type de technologie, de la manière dont ces technologies sont développées, mais aussi de la nature du substrat marin. La question de

l'artificialisation des fonds marins et du littoral (pour le raccordement associé à l'installation) est connue pour les parcs éoliens en mer, mais peu étudiée du fait de son intensité négligeable.

5.2.2. Impacts physiques sur les sols et sédiments

Les étapes de préparation des fonds en amont de l'installation des éoliennes en mer peuvent entraîner des **modifications dans la morphologie des fonds** autour des plateformes (Coates, et al., 2014). Les impacts varient fortement selon le type de fondation (monopieu, gravitaire, jacket) et les choix d'installation (battage ou forage de pieu, lestage ou ancrage au niveau des fonds marins). Ainsi, les opérations de dragage et de forage (pour l'éolien en mer posé avec monopieu) altèrent les fonds lors de l'installation des infrastructures, notamment avec un enlèvement de substrat meuble et une remise en suspension des sédiments (OSPAR Commission, 2008).

L'excavation (préparation) des fonds dans le cas de fondations monopieu s'étend généralement sur plusieurs mètres de profondeur et 20-30 m de diamètre, d'après des relevés réalisés sur la côte Est du Royaume-Uni (OSPAR Commission, 2008; OSPAR Commission, 2006). En comparaison, une fondation à base gravitaire a une plus grande emprise au fond que dans le cas d'une fondation monopieu ou jacket, mais ne requiert pas de travaux de forage (limités aux fondations monopieu). La mise en place des câbles de raccordement au réseau peut localement affecter les fonds marins dans une moindre mesure. Cependant, une fois sur le littoral, les câbles rejoignent le poste de raccordement au réseau le plus proche déjà existant, limitant ainsi l'impact associé sur les fonds.

A noter que les enjeux associés à une remise en suspension des sédiments sont applicables à des substrats meubles, et non des substrats durs. Les impacts des éoliennes en mer sur la dynamique de sédimentation sont donc fortement corrélés au site d'implantation.

Comme pour tous travaux sur les fonds marins en substrats meubles, la remise en suspension des sédiments lors de la phase d'installation peut engendrer un changement temporaire de la dynamique de sédimentation autour des structures, par exemple en ralentissant l'érosion naturelle et les processus de sédimentation (OSPAR Commission, 2008). Il existe un risque d'affouillement en amont de la structure et de dépôt en aval, là où les courants sont freinés (Péguin, et al., 2014). A noter que l'intensité de l'impact est également fonction de la taille des grains de sédiments, de la turbidité ambiante, et de l'hydrodynamique ; son étendue géographique n'est pas précisée (OSPAR Commission, 2006). Comme pour tous travaux réalisés sur les fonds marins, la perméabilité des sédiments peut être diminuée par ces activités, induisant une rétention accrue des matières organiques (Janssen et al. 2005 cité dans Coates, et al. (2014)). La modification du transport de particules organiques dans les sédiments (par exemple issus de détritiques ou de matière fécale) peut également en influencer la perméabilité, s'il y a colmatage des interstices (Volkenborn et al., 2007 et Zetsche et al., 2011 cités dans Coates, et al. (2014)). Les enjeux associés à cet impact restent cependant peu connus à date.

Lors de la phase d'exploitation, les changements de morphologie des fonds marins en substrat meuble et de la dynamique de sédimentation autour des fondations d'une éolienne en mer posé sont évalués par la mesure de la granulométrie des sédiments à différentes distances des fondations. Les sédiments plus fins sont observés près de la turbine (entre 15 et 50 m). L'augmentation de la taille des grains avec la distance qui les sépare des fondations peut s'expliquer par les activités de pré-construction (dragage des sables selon Van den Eynde et al. (2010)) et le remplacement du substrat par une couche de fondation contenant des graviers concassés ; après la phase de construction, un système de protection contre l'affouillement est installé pour éviter l'érosion (Peire, et al., 2009). Une seconde explication peut être le changement des caractéristiques hydrodynamiques autour des fondations (une faible vitesse du courant dans le sillage de la fondation), dont l'impact peut être limité grâce aux systèmes de protection existants (graviers, béton, etc.) (Whitehouse, et al., 2011; Besioa, et al., 2008).

Lors de la phase d'exploitation, dans le cas de l'éolien en mer flottant, l'effet de dragage induit par le frottement des lignes d'ancrage sur les fonds marins peut générer une remise en suspension des sédiments à proximité. Cet impact est cependant peu étudié dans la littérature.

Selon le type de fondation et d'installation, mais aussi selon la nature des fonds marins, l'intensité des impacts de l'éolien en mer sur la morphologie des fonds marins varie fortement. Les impacts sont générés principalement lors de la phase d'installation, et semblent bien étudiés dans la littérature. Des recherches complémentaires pourraient être menées concernant la

corrélation entre l'intensité de ces impacts physiques et de potentielles perturbations des écosystèmes marins.

Certaines études mentionnent une éventuelle **augmentation locale de la température** du substrat marin autour des câbles ensouillés, du fait de pertes énergétiques dues au passage d'électricité (Tabassum, et al., 2014). La température est ainsi augmentée à proximité du câble ensouillé, en profondeur (jusque 2,5 °C à 50 cm de profondeur, dans le substrat juste au-dessus du câble, selon (OSPAR Commission, 2008)) et dans une moindre mesure au niveau de la surface du fond marin, donc à plus grande distance du câble ensouillé (moins de 1 °C dans les publications (OSPAR Commission, 2008; Péguin, et al., 2013)). Les enjeux associés à cette variation de température sont négligeables à proximité de la surface, et l'aire des fonds concernés est particulièrement réduite.

Le caractère négligeable de l'impact de l'exploitation d'éoliennes en mer (posées ou flottantes) sur l'augmentation locale de la température semble faire consensus au sein de la littérature.

Dans l'ensemble, les impacts physiques sur les fonds marins des éoliennes en mer sont documentés concernant les étapes d'installation et d'exploitation. Les enjeux sur les fonds marins associés au démantèlement des structures sont mal connus, au vu du peu de retours d'expérience existant à date. Les impacts sur les sols terrestres associés à ces phases sont très réduits, et ne font pas l'objet de recherches.

De la même façon que pour les autres EnR, les impacts physiques sur les sols générés lors de l'extraction des matériaux primaires utilisés dans les structures sont mal connus, bien qu'ils puissent être potentiellement non négligeables (compaction, tassement selon les méthodes d'extraction).

5.2.3. Impacts chimiques sur les sols et sédiments

De la même façon que pour l'éolien terrestre, la **contamination chimique** des sols (terrestres) engendrée par l'extraction des matériaux utilisés pour la construction des éoliennes peut être non négligeable, au vu des composants utilisés. Ces impacts ne sont cependant pas spécifiques à la fabrication d'éoliennes et raccords, et peuvent être généralisés à l'ensemble des activités d'extraction de ces matériaux. Des travaux pourraient être menés pour allouer une part des impacts (notamment en termes de pollution des sols) générés par les activités d'extraction à la production d'énergie éolienne en mer.

Lors de l'installation des éoliennes en mer, différents dispositifs ou traitements sont mis en place au niveau des structures afin de lutter contre la corrosion et la colonisation par des organismes marins (algues, etc.) durant toute la durée de l'exploitation. Ainsi, la protection de l'acier contre la corrosion, dans le cas de l'éolien en mer posé se fait majoritairement par le biais d'une protection cathodique (anode sacrificielle, et dans une moindre mesure anode par courant imposé) et/ou de peintures anticorrosives (usage généralement limité aux premiers mètres hors de l'eau du pied de mât d'une éolienne). L'anode sacrificielle, encore principalement utilisée par la filière, est cependant décriée du fait de sa dégradation, qui relâche d'importantes quantités de métaux (aluminium et zinc en particulier) dans l'eau. A noter que ceci est à relativiser par rapport aux quantités de métaux provenant des activités humaines à terre et apporter par les fleuves. La protection avec une anode par courant imposé reste encore peu utilisée car plus complexe et nécessitant davantage de maintenance ; des travaux sont cependant menés vers une plus grande utilisation de cette solution (par exemple pour le projet de parc éolien en mer des îles d'Yeu et de Noirmoutier ou celui de Dieppe - Le Tréport).

Pour empêcher la colonisation par les organismes marins, des enduits *antifouling* peuvent être appliqués sur les structures en mer. En France, l'utilisation de ces peintures dans le cadre des parcs éoliens en mer n'est pas privilégiée. Les projets d'éolien en mer prévoient un dimensionnement des structures (par exemple les flotteurs ou les ancrages) qui leur permette de supporter la biocolonisation. De plus, la mise sur le marché des produits biocides (par exemple le cybutryne) est réglementée en France (et dans d'autres pays) et certains produits sont déjà interdits d'utilisation (par exemple le tributylétain) dans l'Union Européenne.

Enfin, comme pour toute installation en milieu marin, des risques de pollution sont identifiés en cas d'accidents, par exemple lors de fuite d'huiles en cas de rupture accidentelle d'un circuit (Péguin, et al.,

2014) ou *via* un rejet accidentel d'enduit de jointement (sous pression) pendant la phase de construction des éoliennes (OSPAR Commission, 2006). Ces événements restent cependant des accidents, et ne semblent pas avoir un impact significatif sur la pollution des fonds marins du fait de leur très faible fréquence.

Dans l'ensemble, les impacts chimiques générés sur le milieu marin lors de l'installation et de la maintenance des éoliennes sont identifiés, mais ceux sur les fonds marins ne font pas l'objet d'une évaluation dans la littérature sur l'éolien en mer. De plus, la nocivité de certains produits utilisés est à nuancer. En effet, les matériaux sélectionnés pour la peinture et la lubrification des installations doivent être adaptés à l'environnement ("*environmentally sensitive*"). Par exemple, les enduits *antifouling* de nouvelle génération à base de silicone sont moins toxiques que les précédents. L'utilisation des huiles pour les moteurs et des lubrifiants chimiques est réglementée : les huiles doivent être biodégradables autant que possible et être récupérées à la fin du circuit dans des bacs de récupération pour être traitées. De plus, de nouvelles techniques permettant de réduire l'impact sur l'environnement sont mises en place, et des guides de bonnes pratiques développés (AWATEA, 2008; Péguin, et al., 2014).

La qualité physico-chimique des substrats peut être déterminée grâce à des prélèvements sur le terrain, au niveau des zones où les sédiments peuvent être contaminés (MEDDE, 2012).

L'impact sur la qualité des sédiments de ces émissions chimiques (rejet de métaux, substances toxiques, etc.) lors de l'exploitation du parc reste mal connu, en termes d'intensité de l'impact, mais également sur leur emprise spatiale. Les pratiques au niveau des parcs semblent privilégier les systèmes de protection des structures éoliennes les moins nocifs pour l'environnement.

Des résultats relatifs au **potentiel d'acidification** des milieux sont disponibles concernant la production d'énergie éolienne en mer. Comme pour le cas de l'éolien terrestre, cet impact n'est pas évalué dans le cas des sols uniquement, mais agrège les résultats de l'impact potentiel sur les milieux aquatiques, aérien et les sols. Le potentiel d'acidification de la production d'énergie éolienne en mer est plus important que pour celui de la production d'énergie éolienne terrestre (en raison de la combustion de carburant par les navires de construction et de maintenance) ; il reste cependant plus faible que la production d'électricité moyenne en France (Cycleco, 2015). Contrairement à l'éolien terrestre, les étapes d'installation et de démantèlement du parc contribuent de façon équivalente à cet impact potentiel (35 % chacune, plus important que pour les étapes de fabrication des composants), en raison du carburant utilisé lors de ces deux dernières étapes.

Le potentiel d'acidification de l'éolien en mer est étudié dans la littérature, et apparaît négligeable en comparaison au mix énergétique moyen dans le cas français.

5.2.4. Impacts biologiques sur les sols et sédiments, et services écosystémiques

Les impacts biologiques identifiés dans les publications sont principalement liés à une modification du milieu des espèces macro benthiques et de la teneur en matière organique des fonds lors des étapes d'installation et de fonctionnement des éoliennes en mer.

Lors de l'installation des structures en mer, et ainsi que présenté en section 5.1.1, une **modification des habitats** benthiques est générée, d'intensité variable selon le type de fondation et d'installation. Ces impacts font l'objet d'une attention forte de la communauté scientifique.

Lors de la phase d'exploitation, les parcs éoliens en mer sont susceptibles de changer les communautés de la faune et flore du milieu (Tabassum, et al., 2014). Coates et al. (2014) a mis en exergue une augmentation de la densité macro benthique (en individu.m²) ainsi qu'une plus grande diversité, ce qui affecte également les communautés adjacentes *via* une plus grande prédation (Langlois (2005) cité dans Tabassum-Abbasi, et al. (2014)). Cette épifaune (vivant à la surface des fonds marins) se développe sur les fondations, contribue à l'apport en matière organique des fonds marins par sédimentation et modifie donc également l'habitat sédimentaire et *in fine*, les assemblages associés aux substrats meubles (Coates, et al., 2014). D'après une surveillance des assemblages de l'endofaune (vivant dans les sédiments) dans des parcs éoliens situés dans la mer du Nord, la modification physique (granulométrie, etc.) et biologique (changement de la composition spécifique des assemblages de ces habitats sédimentaires) des sédiments ainsi que le changement en termes de prédation sur les communautés des fonds marins peuvent avoir un impact jusqu'à environ 50 m des fondations selon des

estimations (Hammar, et al., 2016). Des informations complémentaires sont fournies en sections 5.1.1 et 5.1.2, en particulier sur d'autres groupes d'espèces (notamment pélagiques), ainsi que sur les effets récifs et l'effet réserve.

La modification de l'habitat à proximité des fondations peut indirectement impacter la **teneur en matière organique** des fonds marins aux alentours, des mesures ont été effectuées dans le cas de parcs existant en mer du Nord (Coates, et al., 2014) à partir de prélèvements de fonds marins. L'intensité de ces variations reste cependant négligeable au vu de la variabilité naturelle observée en dehors de parcs éoliens en mer (augmentation de 0,4 % à 2,5 %, respectivement à 100 m et 15 m des fondations gravitaires étudiées).

Les impacts sur la biologie des fonds marins (sédiments) apparaissent spécifiques à chaque site et aux caractéristiques des projets. Les mécanismes liés à la modification de l'habitat des espèces macro benthiques et l'incidence indirecte potentielle sur la teneur en matière organique des fonds marins (sédiments) sont décrits dans plusieurs publications.

Des études pourraient être menées sur les interactions entre impacts chimiques et biologiques des fonds marins afin de déterminer dans quelle mesure l'émission de substances polluantes peut affecter la biologie des fonds à proximité immédiate et dans une zone plus large (selon les courants marins, etc.).

5.3. Impacts de l'énergie éolienne en mer sur les paysages

Pour rappel, 110 publications traitent des impacts de l'éolien terrestre ou en mer sur les paysages. Quelques auteurs ressortent assez systématiquement dans l'ensemble des publications : Fortin ou Nadaï concernant l'éolien en général, la participation autour des projets ou la planification de cette énergie ; Wolsink ou Pasqualetti plus spécifiquement sur l'acceptation sociale.

Des études rétrospectives sur des territoires variés synthétisent bien les différentes phases du développement de l'éolien terrestre et en mer et les questionnements qui en découlent en matière d'impacts cumulés, d'acceptation, de concertation ou de planification : Bretagne (Tétrel, 2012), Grèce (Katsaprakakis, et al., 2016), Allemagne (Deshaies, 2015) (Nadai, 2008), Québec (Thériault, 2007), Portugal (Nadai, 2008; Nadai, et al., 2010), France (Gueorguieva-Faye, 2006).

5.3.1. Pas de grandes différences entre éolien en mer et éolien terrestre

Les grandes tendances constatées sur l'éolien terrestre sont applicables à l'éolien en mer, notamment sur l'acceptation sociale. Quelques particularités peuvent toutefois être mentionnées.

La modification de la vue depuis la côte est le principal impact mis en avant dans les publications, mais cet impact n'est pas partagé de la même manière par tous les acteurs (Ladenburg, et al., 2012) ; là encore, les paramètres de variations sont nombreux : le type d'usage de la plage, le niveau de revenu, les CSP et l'âge interviennent par exemple dans la demande de diminution de l'impact visuel par un éloignement des éoliennes. Les phénomènes de rejets sociaux face aux EnR marines (éolien en mer le plus souvent) font intervenir de nombreux facteurs « émotionnels » : âge, genre, classe sociale, orientation politique, intérêt pour l'environnement, niveau de confiance dans les institutions, etc. institutions (Cass, et al., 2009). La distance reste un fort critère d'acceptation (plus que pour l'éolien terrestre) : en Languedoc-Roussillon (Westerberg, et al., 2015), un éloignement de 12 km par rapport au projet neutraliserait les objections de surcoûts des renouvelables en termes de consentement à payer pour le paysage (en France, l'État a fait le choix de retenir des zones situées à plus de 10 km des côtes pour des projets éoliens en mer de manière à limiter l'impact sur le paysage et favoriser l'acceptabilité des projets). A noter qu'au niveau de la distance, les enjeux sont légèrement différents entre l'éolien posé et le flottant, le flottant pouvant être plus éloigné des côtes car pouvant être situé en zones plus profondes. Des facteurs tels que l'intérêt pour le changement climatique, l'énergie nucléaire et le rapport coût/efficacité de l'éolien sont également déterminants dans cette étude pour la perception des impacts de l'éolien en mer. La nationalité des touristes est aussi un déterminant (potentiellement en lien avec la politique énergétique du pays d'origine) : les allemands seraient moins gênés par l'éolien que les français. Comme pour l'éolien terrestre, la nécessité d'une concertation transparente et d'une communication efficace, en lien avec politique énergétique, ressort également dans les enquêtes d'opinion, rejoignant les préoccupations constatées sur l'éolien terrestre.

Comme pour l'éolien terrestre, la gêne sur d'autres activités (tourisme balnéaire) est assez généralement mentionnée, avec là encore la distance comme facteur majeur de variations. La force de l'impact est quant à elle difficilement quantifiable, même si des études arrivent à chiffrer des impacts sur le tourisme comme sur les plages catalanes en Espagne, avec une estimation du manque à gagner par saison du fait de la non-venue de touristes consécutive à l'installation d'éoliennes (Voltaire, et al., 2017). Des mécanismes compensatoires sont là aussi évoqués pour aller à l'encontre de ces effets, parfois au niveau européen pour dédommager les zones les plus impactées (Voltaire, et al., 2017). Par rapport aux usages, la pêche est l'une des activités les plus concernées par des interactions potentielles avec l'éolien en mer.

Les méthodes utilisées pour l'évaluation de l'acceptation sociale sont les mêmes que pour l'éolien terrestre, économétriques notamment (en Catalogne par exemple (Voltaire, et al., 2017)).

Des méthodes d'évaluation des impacts visuels sont développées, là aussi sous SIG, intégrant des paramètres géométriques et esthétiques (régularité des éoliennes, perception des alignements, etc.) (Maslov, et al., 2017). D'autres méthodes tentent de spatialiser les approches économétriques via des cartographies sous SIG (Depellegrin, et al., 2014) : en cumulant la visibilité pondérée des éoliennes avec des facteurs socio-économiques (valeur foncière, diversité paysagère, statut de protection des espaces, densité résidentielle et de population, revenus touristiques, distance), un coefficient de sensibilité socio-économique est obtenu et cartographié. Ce type de méthode a parfois été utilisé (avec des indicateurs moins étendus) de manière similaire, en France, pour la définition en amont, de zones préférentielles de développement de l'éolien (ZDE). Ce type de méthode pourrait donc être utilisé également pour de la planification (pour trouver les sites les moins impactants selon des critères déjà déterminés) mais leur pertinence dépend de la représentativité des indicateurs (or, les indicateurs utilisés sont souvent des indicateurs généraux : nombre d'habitants, hiérarchisation du patrimoine, etc.). Certaines méthodes croisent également le calcul avec la fréquence des vues (Griffin, et al., 2015) via des données « de masse » (Flickr, Panoramio).

Le même type de reproches peut être fait à l'encontre des outils d'appréciation des impacts (carte de visibilité notamment) qui ne prennent pas en compte tous les concepts de la visibilité (cohérence, perturbation, passé historique, échelles, imaginaire, complexité, naturalité, éphémère) et seraient ainsi contre-productifs (Wolsink, 2018).

La planification collaborative, la souplesse des gouvernances sont également, comme sur terre, des éléments fondamentaux pour l'acceptation sociale des projets en mer (Wolsink, 2013). Comme pour l'éolien terrestre, l'examen de déroulement de certains projets permet de mettre en évidence des lacunes de gouvernance, de planification, de méthodologie (Nadaï, et al., 2014a; Nadaï, et al., 2014b).

Pour l'éolien en mer comme pour le terrestre, la tentative d'objectivation des impacts devrait être abandonnée au profit des notions de valeurs paysagères, de co-production des projets et de processus ouverts, plus propices pour les projets de production décentralisée, l'enjeu paysager étant finalement : « est-ce que l'infrastructure s'intègre au paysage, en accord avec les populations locales qui s'identifient au lieu ? »

5.3.2. Focus sur le(s) guide(s) disponible(s)

Le guide le plus récent (2017) se concentre également sur des aspects visuels et mesurables alors que les oppositions portent plutôt sur l'acceptation des projets. Le tourisme est par exemple envisagé par rapport aux seuls chiffres de fréquentation. Les impacts paysagers potentiels, négatifs ou positifs, sont difficiles à appréhender sous un angle chiffré.

Les modalités d'association du public sont évoquées mais aucune méthodologie ou prescription (enquête, etc.) n'est précisée, attestant de la difficulté, comme pour le terrestre, de prendre en compte, dans les projets, ces aspects de la concertation. L'entrée par le paysage pourrait justement aider à constituer un cadre de discussion autour des projets, intégrant la variété des thématiques et des acteurs et mobilisant des outils relativement simples (photos, croquis) assimilables par tous. Proportionnellement aux enjeux que représente l'enjeu paysager dans les projets (le paysage est l'un des premiers arguments de contestation des projets), la fiche thématique sur le paysage est l'une des plus réduites (une page et demi) et cantonnée aux aspects visuels de la question, montrant, comme pour le terrestre, le décalage important entre d'une part le guide et d'autre part, le volume et la teneur des publications sur l'acceptation sociale et le caractère de processus que devrait avoir le paysage.

Comme pour l'éolien terrestre, la concertation ne peut clairement pas être entièrement portée par les développeurs des projets mais la partie sur les choix d'aménagement pourrait être discutée dans le cadre des projets : taille des éoliennes, choix d'implantation voire des points de vue présentés dans les études, mesures souhaitables pourraient très bien faire l'objet de concertations plus en amont, en remplacement de réunions ou débats publics qui se déroulent souvent tardivement. L'autre part de la concertation sur la planification des sites éolien en mer (décidé par l'Etat) pourrait se dérouler plus en amont, dans le choix des sites. Si des facteurs techniques interviennent forcément, la prise en compte de données paysagères (notamment celles qui apparaissent comme des leviers d'acceptation sociale : tourisme, patrimoine par exemple), issues d'une participation d'acteurs locaux, désamorcerait une grande partie des oppositions puisque, outre une co-construction du choix des sites d'implantation, elles permettraient de préfigurer les points d'enjeux pour les projets.

Comme pour l'éolien terrestre, les guides pour l'éolien en mer apparaissent suffisants pour la prise en compte des impacts mesurables. Néanmoins ce sont sur les éléments difficilement mesurables et la démarche paysagère de projet que ces guides semblent inopérants, notamment au regard des possibilités d'éviter réellement les impacts en amont.

5.4. Synthèse des impacts de l'énergie éolienne en mer

La qualification des impacts de l'énergie éolienne en mer sur la biodiversité, les sols, les sédiments et les paysages est synthétisée ici, ainsi que les méthodologies d'évaluation rencontrées et le niveau de différenciation des impacts entre technologies et étapes du cycle de vie des infrastructures.

En ce qui concerne la qualification des impacts sur la biodiversité, les connaissances sur les effets de l'éolien en mer s'enrichissent au fur et à mesure des suivis menés sur des parcs en exploitation, qui ne concernent presque exclusivement l'éolien en mer posé. Les connaissances sur les impacts prévisibles sont fondées sur les retours d'expérience à l'étranger, essentiellement en mer du Nord et autour du Royaume-Uni. Elles doivent donc être transposées directement aux écosystèmes des mers françaises avec précaution, notamment dans le cas d'écosystèmes et espèces différents de ceux rencontrés en mer du Nord. Ces connaissances devront être consolidées sur la base des suivis des premiers parcs français, dont le lancement de la construction est attendu prochainement.

Concernant les sols et les sédiments, les impacts les plus documentés et évalués sont relatifs à la modification des caractéristiques des sédiments et le changement morphologique des fonds marins, et dans une moindre mesure la pollution chimique potentielle des fonds marins générée par les systèmes de protection des structures en mer. A noter que la typologie des sédiments est relativement explicitée pour les milieux marins, les parcs éoliens en mer étant actuellement presque exclusivement implantés sur des sédiments de boue, argile, sable ou graviers.

En ce qui concerne les paysages, les grandes tendances constatées sur les impacts de l'éolien terrestre sont globalement applicables à l'éolien en mer, notamment concernant l'acceptation sociale. Si la distance, forcément plus importante entre le parc éolien et la côte rend les éoliennes moins visibles, les impacts n'en sont pas nécessairement plus faibles, en particulier du fait de la présence d'usages très spécifiques (tourisme, pêche).

En termes de méthodes d'évaluation des impacts sur la biodiversité, des méthodes et modèles visent à évaluer les effets des projets de parcs éoliens en mer sur la biodiversité. Ces méthodes reposent classiquement sur des inventaires de terrain (visuels ou à l'aide d'outils comme des enregistreurs acoustiques, des caméras, des radars) mais s'appuient également fréquemment sur des modélisations : modélisations des risques de collision, modélisations des impacts acoustiques prévisibles en phase travaux sur les mammifères marins, modélisations des impacts par perturbation des spécimens (modification de la distribution), modèles ciblant les populations d'espèces ou les individus. D'une manière générale, ces études ne peuvent être génériques et doivent être adaptées aux spécificités de chaque projet et chaque site de projet.

Dans le cas des sols et les sédiments, les données issues de projets existants sont utilisées, notamment concernant l'aménagement des fonds marins. Il est à noter que certains impacts ne sont pas évalués : c'est par exemple le cas de la pollution chimique potentielle sur les fonds marins.

Concernant les impacts de l'éolien en mer sur les paysages, les enjeux de connaissance sont sensiblement les mêmes que pour l'éolien terrestre. Les enjeux de développement étant actuellement forts, des manques tendent à être comblés dans le cadre des projets. Les développeurs des projets en

mer de Dieppe-Le Tréport et Yeu-Noirmoutier ont ainsi publié dans le cours de l'année 2018 (et qui n'a pas pu être intégrée à cette étude) une synthèse de retours d'expérience sur les liens entre tourisme et éolien en mer (« Retour d'expérience tourisme & éolien en mer » 2017-2018, Cabinet Vues sur Mer) suggérant que les impacts négatifs de l'éolien en mer sur le tourisme sont très faibles et sont même le plus souvent positifs. Le même type d'étude est en cours en Ecosse, où le gouvernement a lancé une étude (entre 2017 et 2019) sur le thème des impacts socio-économiques des éoliennes en mer⁷⁵.

Les méthodes d'analyse des effets cumulés des activités en mer ne font pas consensus aujourd'hui. Un groupe de travail piloté par le ministère de la transition écologique et solidaire, animé par le CEREMA et l'AFB et coordonné par France Energies Marines a été lancé en septembre 2018 ; il s'agit du GT ECUME (GT portant sur les effets cumulés des EMR), rassemblant une vingtaine d'experts (spécialistes de chacune des composantes physiques et biologiques des écosystèmes marins).

La **comparaison entre les différentes technologies** pour l'éolien en mer est un axe de recherche suggéré par plusieurs auteurs, bien qu'aucune publication ne traite ce point de manière spécifique. Pour l'éolien en mer, les publications traitent principalement des éoliennes en mer posé, et très peu des dispositifs en mer flottant (au stade pré-industriel). Plusieurs projets de fermes pilotes éolien en mer flottant sont en cours en France (quatre projets avancés, un appel à projets commerciaux en préparation) ; ils pourront permettre d'acquérir des retours d'expérience sur les effets environnementaux de ces technologies dans des contextes jusqu'ici peu étudiés telle que la Méditerranée. Concernant les projets en mer posé, les publications mentionnent souvent que les impacts (sur les sols/ sédiments et la biodiversité) et surtout leur étendue peuvent différer en fonction de la localisation, de la nature des milieux concernés et du type de fondation.

Enfin, en ce qui concerne les **impacts des différentes étapes du cycle de vie**, la majorité des publications traitent principalement des phases d'installation et d'exploitation des éoliennes. Certaines études suggèrent que les impacts relatifs au démantèlement pourraient être similaires à la phase d'installation ; d'autres que le démantèlement pourrait être partiel, avec des impacts *a priori* largement moindres que ceux de l'installation. Les impacts sur la biodiversité et les sols ou sédiments, relatifs à l'extraction de matériaux utilisés dans les structures, ne sont pas étudiés dans la littérature analysée, bien qu'ils puissent potentiellement être non négligeables.

⁷⁵ <https://corporate.vattenfall.co.uk/projects/operational-wind-farms/european-offshore-wind-deployment-centre/scientific-research/oxford-brookes-university/>, consulté le 19/11/2018

6. Impacts des énergies marines

Ce chapitre présente une synthèse des impacts des énergies marines renouvelables (EMR) sur la biodiversité, les sols, les sédiments et les paysages identifiés lors de l'analyse bibliographique. Une attention particulière a été portée à la prise en compte du contexte géographique, temporel et institutionnel. Les résultats qualitatifs et quantitatifs sont mis en avant autant que possible, et les points de divergence et de convergence entre publications sont identifiés.

Plusieurs types d'EMR sont traités dans cette partie et présentés ci-dessous.

Certaines technologies utilisent les **énergies des courants sous-marins et de marée**. Le terme générique d'hydrolienne regroupe des installations de nature très différentes : systèmes à entraînement axial horizontal (dont turbines à effet Venturi) ou vertical ; systèmes à hydrofoil ; systèmes installés sur le fond marin ou flottant sous la surface (MEDDE, 2012; Péguin, et al., 2014). Il existe de nombreux concepts autour de ces systèmes. Deux autres dispositifs, utilisant les courants océaniques, peuvent être rattachés de façon plus indirecte à ce groupe de technologies : les kite-de-marée (ou ailes sous-marines) et les vis d'Archimède.⁷⁶

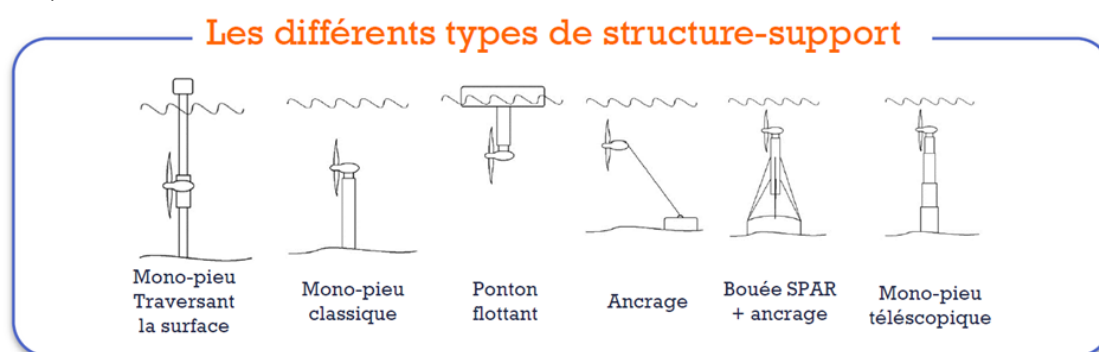


Figure 6 : Schéma des différents types de structure-support des hydroliennes (Présentation ADEME, 2015)

Les **dispositifs houlomoteurs** utilisent l'énergie des vagues et de la houle. De nombreux concepts et systèmes ont été imaginés et testés : installés au fond, flottant en surface, ou adossés au littoral. Les dispositifs exploitant l'énergie des vagues sont situés dans la zone de déferlement, tandis que ceux qui exploitent l'énergie de la houle sont situés plus loin des côtes. Les principaux dispositifs cités dans la littérature sont les suivants : atténuateurs, absorbeurs de houle, convertisseurs du mouvement oscillatoire des vagues, dispositifs de rotation, dispositifs basés sur les pressions différentielles, dispositifs basés sur l'ondulation, colonnes d'eau oscillante, dispositifs de débordement.⁷⁶

Les **technologies marémotrices** utilisent un effet barrage pour exploiter l'énergie potentielle de l'élévation de marée (différentiel d'élévation entre les masses d'eau situées de part et d'autre d'une digue ou d'un barrage). Deux principaux types d'installations existent : les barrages marémoteurs installés dans les estuaires, tel que l'usine marémotrice de la Rance en Bretagne, et les lagunes marémotrices, ne nécessitant pas la fermeture d'estuaires mais reposant sur la création d'un bassin artificiel de retenue d'eau de mer (en domaine côtier ou au large). Plusieurs projets de lagunes marémotrices existent dans le monde, l'un des plus ambitieux concernant la baie de Swansea au Pays de Galles. Des dispositifs mixtes résultant de la combinaison d'un bassin marémoteur avec des hydroliennes sont également imaginés (marélienne ou *Tidal garden*) (Aelbrecht, et al., 2017).

Les **dispositifs ETM** (Energie Thermique des Mers) exploitent les différences de température entre les eaux de surface et du fond (plus de 1 000 m de profondeur), généralement d'au moins 18 à 20 °C (Devault, et al., 2017), à l'aide de machines thermiques (en cycle ouvert, cycle fermé ou cycle hybride).

Les **technologies osmotiques** exploitent la différence de salinité dans les estuaires entre l'eau douce et l'eau de mer. Une pression osmotique est exercée entre l'eau de mer, plus concentrée en ions et l'eau douce lorsque celles-ci sont séparées par une membrane semi-perméable (principe d'osmose).

L'éolien en mer (posé ou flottant) n'est pas traité dans ce chapitre. De nombreuses similitudes existent cependant entre les impacts de ces technologies.

⁷⁶ <http://www.emec.org.uk/marine-energy/tidal-devices/> et Aquaret.com

La dimension des EMR et la densité des parcs varient en fonction du type de technologie EMR utilisé. Une installation hydrolienne a un diamètre compris entre 10 et 20 m alors qu'une installation marémotrice comme celle de l'usine de la Rance en France mesure 390 m de long pour 33 mètres de large et abrite 24 groupes de production.⁷⁷

Les technologies EMR sont conçues pour résister à la corrosion (systèmes anticorrosion) et aux développements des organismes marins végétaux et animaux sur les structures (antifouling, biocides ou matériaux de construction spécifiques).

Les EMR font l'objet de nombreux travaux de recherche, principalement en Europe du Nord-Ouest et en Amérique du Nord. Le Royaume-Uni, dont le potentiel de production d'énergies marines renouvelables est le plus important d'Europe, fournit à lui seul une proportion importante des travaux sur ces sujets dans le monde. En raison du faible développement des EMR en France (quelques prototypes en cours de développement et de test grandeur nature), les données issues de recherches françaises sont peu nombreuses.

Les potentiels de développement de ces différents types d'énergie sont très variables selon les pays. A l'échelle européenne et mondiale, le Royaume-Uni dispose d'importants potentiels de développement pour les dispositifs utilisant l'énergie des courants et des vagues, tandis que les énergies thermiques des mers sont exclusivement envisagées dans les mers chaudes, ces dispositifs nécessitant des différences de température importantes. En France, la Bretagne et la Normandie sont les deux régions au plus important potentiel de développement pour les énergies des courants, avec notamment le Raz Blanchard, le passage du Fromveur et le projet de démonstrateur hydrolien de Paimpol-Bréhat. D'autres projets hydroliens sont envisagés. Les zones avec potentiel de développement houlomoteur sont davantage réparties sur la plupart des régions littorales et le potentiel pour l'ETM est limité aux eaux tropicales et profondes.

A l'échelle française, plusieurs démarches et documents traitent des enjeux environnementaux des EMR (et plus particulièrement des liens entre biodiversité et EMR) :

- Le MTES a publié en 2012 un guide intitulé « Energies marines renouvelables. Etude méthodologique des impacts environnementaux et socio-économiques » (MEDDE, 2012). Ce guide fournit une synthèse détaillée des impacts environnementaux des énergies marines renouvelables, dont le niveau de détail ne peut être repris dans le présent rapport ;
- France Energies Marines a publié en 2013 un Guide d'évaluation des impacts environnementaux pour les technologies hydroliennes en mer : GHYDRO (FEM, 2013) ;
- L'UICN a élaboré en 2014 un document intitulé « Développement des énergies marines renouvelables et préservation de la biodiversité. Synthèse à l'usage des décideurs » (Péguin, et al., 2014) ;
- L'UICN anime un groupe de travail « EMR et biodiversité », pour le compte de l'ADEME ;
- Le MTES pilote actuellement un groupe de travail d'experts scientifiques sur le sujet des effets cumulés des EMR. Ce GT est animé par le CEREMA et l'AFB et coordonné par France Énergies Marines. Il a pour objectif de mieux appréhender cette notion en mer et d'avoir une vision sur une échelle spatiale importante (façade) ;
- France Energies Marines a constitué en mai 2018 un comité national d'experts sur les enjeux environnementaux et socio-économiques relatifs à la mise en place de parcs EMR sur le territoire français (COME³T : Comité d'expertise pour les enjeux environnementaux des EMR) ;
- Un groupe de travail spécifique au marémoteur est porté par la Société hydrotechnique de France (SHF) (Aelbrecht, et al., 2017).

Ailleurs dans le monde, plusieurs démarches collaboratives visent une meilleure compréhension et prise en compte des enjeux environnementaux du développement des EMR. Outre la démarche *Annex IV* de l'OES (Copping, et al., 2016), le programme britannique ORJIP (*Offshore Renewables Joint Industry Programme*) propose plusieurs travaux et plans d'actions autour des enjeux environnementaux des EMR et de l'énergie éolienne⁷⁸.

⁷⁷ <https://www.edf.fr/groupe-edf/producteur-industriel/energies-renouvelables/hydraulique/edf-hydraulique-bretagne-normandie/l-usine-maremotrice-de-la-rance/decouvrir-et-comprendre>

⁷⁸ <http://www.oriip.org.uk/index.html>

6.1. Impacts des énergies marines sur la biodiversité

Les impacts environnementaux avérés, probables ou hypothétiques des installations de production d'énergies marines renouvelables sur les écosystèmes marins, depuis les habitats benthiques jusqu'à la mégafaune pélagique, font l'objet d'une attention très importante de la communauté scientifique internationale, ainsi que du public et des services étatiques.

De nombreux articles scientifiques, rapports d'expert, publications ou revues bibliographiques traitent, de façon générale ou très spécifique, des effets potentiels ou avérés des énergies marines renouvelables sur la biodiversité.

Dans le cadre de la présente recherche bibliographique, plus de 230 documents traitant des liens entre biodiversité et énergies marines renouvelables ont été renseignés. Parmi ces documents, une cinquantaine de publications a été analysée en détail.

En priorité, ont été pris en compte les revues bibliographiques et états de l'art les plus récents ou importants, en premier lieu le rapport d'état de l'art produit en 2016 pour le compte de l'*US Department of Energy* et de l'Agence internationale de l'énergie (Copping, et al., 2016). Ce rapport fournit la synthèse de six ans de travail, en deux phases de trois ans (mise à jour et compléments d'une précédente publication de 2013 (Copping, et al., 2013a)) et émane d'une initiative multinationale visant à augmenter la compréhension des impacts des énergies marines renouvelables (énergies houlomotrices et énergies des courants) sur les écosystèmes, partager les retours d'expérience, accompagner des collaborations scientifiques. Cet état de l'art (Copping, et al., 2016) fournit une synthèse à date des impacts connus et suspectés, de résultats d'expérimentations et de recherche en cours, des pistes de travail, des manques de données et incertitudes, etc. La lecture de ce document de plus de 200 pages fournit de nombreux détails et exemples qui ne peuvent raisonnablement pas être repris ici, mais auquel le lecteur cherchant à approfondir le sujet pourra utilement se référer. Il s'agit, actuellement, de la synthèse la plus approfondie sur les interactions entre EMR et biodiversité.

Il convient par ailleurs de préciser que Tethys (tethys.pnnl.gov), la principale base de données mondiale sur les effets environnementaux des énergies marines et de l'éolien, a été mise en place dans le cadre de ces travaux collaboratifs supportés par l'Agence internationale de l'énergie et le *US department of Energy* (programme OES : *Ocean Energy Systems*). Cette base de données spécifique, mais non exhaustive, ayant trait aux effets environnementaux des énergies marines renouvelables et de l'énergie éolienne, rassemble fin juin 2018 plus de 4 000 documents, dont plusieurs centaines pour les deux grands types d'énergies marines renouvelables actuelles (hydroliennes et énergies houlomotrices). Plusieurs dizaines à centaines de nouveaux documents sont ajoutés chaque année, ce qui traduit l'émulation très importante autour des énergies marines renouvelables et de l'éolien.

Il convient à ce propos de préciser que la France est partenaire de la démarche collaborative portée par l'Agence internationale de l'Energie en lien avec les EMR (*Annex IV*, etc.) avec 13 autres pays.

Les principaux effets documentés des énergies marines renouvelables sur la biodiversité sont présentés dans les sections suivantes. Les références citées ne visent pas l'exhaustivité, mais une certaine représentativité des connaissances et travaux en cours. Les références utilisées ont été retenues en fonction de leur pertinence vis-à-vis de l'objet de l'axe 1 : dresser un état de l'art des impacts environnementaux des EMR sur la biodiversité. De nombreuses références complémentaires auraient mérité d'être ici citées, mais n'ont pas pu être traitées dans le détail dans le cadre de la présente étude.

Outre les publications issues de la démarche collaborative *Annex IV* de l'OES (Copping, et al., 2016; Copping, et al., 2013a), plusieurs revues bibliographiques spécifiques ont été publiées ces dernières années (Hammar, et al., 2017; Willstead, et al., 2017; Gasparatos, et al., 2017; Roche, et al., 2016; Uihlein, et al., 2016; Wiesebron, et al., 2016; Greaves, et al., 2016; Bonar, et al., 2015; Maclean, et al., 2014; Frid, et al., 2012) (Inger, et al., 2009; Wilhelmsson, et al., 2010).

De nombreux documents appréhendent les liens entre EMR et biodiversité selon une échelle de risques et non d'impacts qualifiés ou quantifiés. Cette approche par niveau de risques est à rattacher, en partie, aux nombreuses incertitudes entourant les interactions entre biodiversité et EMR. En effet, le déploiement relativement limité des énergies marines renouvelables à ce jour implique un assez faible retour d'expérience réel, souvent sur des unités isolées. Il semble cependant peu évident, pour de nombreux auteurs, que les impacts à l'échelle de grandes installations puissent être facilement extrapolés depuis ce qui peut être observé sur des unités tests (Copping, et al., 2016).

Par ailleurs, de nombreuses informations sont manquantes sur les comportements des animaux marins à proximité des installations EMR, ce qui explique l'existence de nombreux travaux sur les aspects

monitoring des EMR (Bender, et al., 2017; Waggitt, et al., 2017; Fox, et al., 2017; Roche, et al., 2016; Copping, et al., 2016; Williamson, et al., 2017).

De nombreux auteurs relèvent que les impacts ne peuvent être souvent étudiés qu'une fois les installations mises en place (prototypes) (Bonar, et al., 2015), en raison des difficultés à prévoir et modéliser les effets, dans des systèmes fortement connectés et dynamiques (Bonar, et al., 2015; Lin, et al., 2012). L'extrapolation des effets mesurés sur des petites unités à l'échelle d'installations de plus grande taille (ferme hydrolienne par exemple) constitue un des principaux défis identifiés (Copping, et al., 2016; Roche, et al., 2016; Maclean, et al., 2014).

6.1.1. Destruction / altération des habitats, modifications des milieux

Le premier impact perceptible de la majorité des EMR consiste en la **destruction et l'altération**, plus ou moins localisée, **d'habitats benthiques** en lien avec l'installation des fondations ou des ancrages des technologies EMR. Les emprises concernent les dispositifs ancrés, lestés, posés au fond ainsi que les câbles électriques associés. Ces impacts d'emprise sur les habitats benthiques et espèces associées font l'objet d'une attention forte de la communauté scientifique (Copping, et al., 2016; Bonar, et al., 2015; Miller, et al., 2013; Roche, et al., 2016). Au niveau français, les impacts des EMR et de l'éolien en mer sur les habitats marins sont examinés attentivement par les services de l'Etat en charge de l'application des politiques publiques de préservation de l'environnement marin (notamment les directives européennes DCSMM et Natura 2000).

Energies des courants

La majorité des installations exploitant les courants (type hydrolienne) nécessite des emprises restreintes sur les fonds marins mais des questions se posent sur les effets cumulés à l'échelle d'installations regroupant de nombreuses unités (Copping, et al., 2016; Roche, et al., 2016; Maclean, et al., 2014; Hammar, et al., 2017). Les impacts sont donc en premier lieu dépendant de la nature des fonds marins et des qualités biologiques de l'écosystème local. La manière dont les supports sont fixés au fond (forage, lestage, ancrage) fait varier l'emprise spatiale requise ainsi que les éventuels effets acoustiques. Lors de la phase de construction, au-delà de la perte localisée d'habitats, les travaux peuvent engendrer la remise en suspension de matériaux, sédiments ou polluants qui peuvent affecter les activités ou les conditions de vie de nombreux organismes (poissons, benthos, plancton, organismes filtreurs) (Copping, et al., 2016; Hammar, et al., 2017). Ces effets sont limités dans le temps. Les durées de retour à la normale concernant les remises en suspension de sédiments sont généralement modélisées pour chaque site de projet et sont souvent de quelques heures (variables selon la courantologie, la nature et les volumes de sédiments concernés).

La présence même de certaines installations fixées au fond peut engendrer des modifications hydrodynamiques, susceptibles d'engendrer une modification des habitats sédimentaires et des altérations des habitats benthiques proches par phénomènes érosifs ou d'accrétion, produisant une mise en suspension de sédiments (en aval du courant) ou un dépôt de sédiments (en amont) (Bonar, et al., 2015; Hammar, et al., 2017; Boehlert, et al., 2010; Miller, et al., 2013). C'est notamment le cas pour les énergies exploitant les courants (type hydroliennes), localisées dans des zones à fort hydrodynamisme. Des modèles sont développés pour anticiper les effets hydrodynamiques de la présence de structures mobiles immergées, ainsi que les effets sur les habitats benthiques (Krivtsov, et al., 2012).

La majorité des auteurs s'accordent à recommander l'évitement des secteurs de plus fort intérêt biologique pour l'implantation d'EMR, certains auteurs ayant proposé des approches de cartographie des sensibilités prévisibles des milieux à de tels projets (Gove, et al., 2016; Miller, et al., 2013).

Les installations d'énergies des courants peuvent jouer le rôle de récifs artificiels ou de support de développement d'espèces benthiques (Copping, et al., 2016; Wilhelmsson, et al., 2010; Shields, et al., 2014). Ces **effets récifs** peuvent être positifs ou négatifs (Callaway, et al., 2017) : certaines installations EMR peuvent constituer des habitats contribuant aux réseaux trophiques (colonisation des structures par un cortège d'organismes marins, pouvant constituer la base d'une chaîne proies / prédateurs).

Ces installations sont par ailleurs généralement exclues des zones de pêche : un effet réserve peut alors être observé (site préservé de la pêche, pouvant alors accueillir des densités plus fortes d'espèces à valeur commerciale et servir de zone source à ces espèces pour essaimer alentours).

Dans le cas des dispositifs flottants, ils peuvent former ce que les anglo-saxons nomment des systèmes d'agrégation des poissons, appelés « dispositifs concentrateurs de poissons » (DCP, de l'anglais "*Fish aggregation device*") (Greaves, et al., 2016; Witt, et al., 2011; Fox, et al., 2017), pouvant fortement accroître la biomasse localement (Raoux, et al., 2017; Hammar, et al., 2017). En termes d'effets négatifs possibles, les installations EMR pourraient favoriser la dispersion d'espèces invasives.

Energies marémotrices (barrages, lagunes)

Les **impacts d'emprises des installations marémotrices** sont, de loin, les plus importantes (Copping, et al., 2016; Frid, et al., 2012; Kidd, et al., 2015; Hooper, et al., 2013). Les installations marémotrices, notamment les barrages, impliquent par ailleurs une altération forte des écosystèmes en amont des barrages, par exemple au sein de l'estuaire de la Rance (Hooper, et al., 2013). Le développement de nombreux projets de lagunes marémotrices, qui ne nécessitent pas la fermeture d'estuaire mais créent des baies fermées, de plus ou moins grande dimension, fait l'objet d'attention importante de la communauté scientifique (Roche, et al., 2016; Mackinnon, et al., 2018) et des pouvoirs publics dans les pays concernés. La construction même des installations marémotrices peut engendrer la perte de zones biologiquement importantes pour les organismes marins : zones de forte production primaire, zones de frai ou de nurserie de poissons (Copping, et al., 2016; Frid, et al., 2012; Gasparatos, et al., 2017).

Les installations marémotrices engendrent de fortes perturbations hydrodynamiques et des altérations du fonctionnement hydro-sédimentaire, parfois loin en amont. Le niveau de l'eau est géré artificiellement et fortement perturbé via un décalage temporel de la marée (de façon à produire un différentiel de plusieurs mètres entre l'aval et l'amont du barrage ou entre l'extérieur et l'intérieur de la lagune), même si la quantité d'échanges d'eau à chaque marée reste identique (Hooper, et al., 2013). Pour les barrages marémoteurs, la dynamique sédimentaire est affectée (avec moins d'échanges à long terme) avec un envasement progressif des bassins de retenue, de même que la qualité des eaux (modification du pH, de la salinité, eutrophisation de l'eau souvent observée par concentration d'éléments en provenance du bassin versant) (Copping, et al., 2016; Kadiri, et al., 2012; Kadiri, et al., 2014). Les écosystèmes benthiques peuvent en être fortement affectés (Frid, et al., 2012), avec localement des cas de mortalité en masse de poissons et d'autres espèces benthiques (Broadhurst & Orme, 2014 cité dans Gasparatos, et al. (2017)). Les impacts des lagunes marémotrices, en projet, ne sont pas documentés (pas de retours d'expérience à ce jour).

Energies houlomotrices

Au même titre que les installations exploitant les courants, la littérature indique que le déploiement d'installations houlomotrices peut affecter les peuplements de macrofaune (composition et diversité) de plusieurs manières soit via des modifications de l'environnement physique ou modifications hydrodynamiques à proximité des installations, soit par altération des caractéristiques biologiques des sédiments (Azzellino, et al., 2013; Roche, et al., 2016; Copping, et al., 2016; Hammar, et al., 2017; Langhamer, 2010; Copping, et al., 2013a). Les risques d'effets sont cependant jugés moindres que pour d'autres types EMR (Copping, et al., 2016) mais dépendent fortement des caractéristiques des installations (type, nombre, dimensions).

Des cadres méthodologiques ont été développés par plusieurs auteurs pour l'évaluation des impacts environnementaux des installations houlomotrices (Margheritini, et al., 2011; Uihlein, et al., 2016).

Energies thermiques des mers

Les dispositifs de conversion de l'énergie thermique des mers peuvent également induire des destructions et altération de milieux lors de la construction des installations. Comme pour les autres EMR, ces installations peuvent engendrer des effets récifs (en cas de canalisations de pompage reposant sur le fond, lesquelles peuvent atteindre des profondeurs de plusieurs centaines de mètres) ou des effets DCP (en cas de station flottante supportant des canalisations en pleine mer).

Par ailleurs, le fonctionnement des dispositifs d'énergie thermique des mers engendre des échanges importants entre les eaux profondes et les eaux de surface, susceptibles d'entraîner des déplacements de polluants, de métaux toxiques et de nutriments depuis des zones benthiques profondes vers la surface (Hammar, et al., 2017). Dans le cadre du projet IMPALA (Evaluation de l'impact d'un upwelling artificiel sur le microplancton), et notamment de la thèse de M. Giraud, une influence du relargage d'eau

profonde utilisée pour l'ETM a été mise en évidence sur des communautés phytoplanctoniques, avec un impact à 45 m et négligeable sous 80 m. Les effets mesurés sont variables selon l'importance de l'apport en eau salée profonde (Giraud, 2016). Des risques d'entraînement d'organismes vivants depuis les fonds marins vers la surface sont identifiés, mais l'importance de ces impacts est délicate à estimer (Copping, et al., 2016; Hammar, et al., 2017). Les incertitudes sont nombreuses sur les impacts par déplacement des organismes et ses effets sur les écosystèmes de fonds marins, très vulnérables et fragiles.

Les impacts relatifs à la destruction / altération et aux modifications des milieux sont très variables selon les EMR, notamment au regard de leurs emprises sur les fonds marins et des besoins de construction. Les installations exploitant les énergies des courants et des vagues n'engendrent que de faibles impacts, localisés, sur les fonds s'il s'agit de dispositifs flottants (fixations ponctuelles, de petite dimension) et des impacts plus conséquents s'il s'agit de dispositifs reposant au fond ou adossés au littoral (par exemple, usine houlomotrice à colonne d'eau oscillante). Les installations marémotrices (barrages ou lagunes) requièrent des emprises importantes. Ces effets sont globalement assez bien appréhendés, mais nécessitent des analyses spécifiques à chaque projet / installation. En phase d'exploitation, des modifications hydrodynamiques sont évoquées dans la littérature pour les énergies des courants, notamment mais ces phénomènes restent mal appréhendés. Concernant les installations marémotrices, des modifications importantes du fonctionnement écologique peuvent affecter de vastes surfaces (estuaires).

6.1.2. Dérangement des individus et modification des activités

La présence même de nouvelles installations en mer peut engendrer des modifications des activités d'animaux marins. Par ailleurs, et plus spécifiquement, les émissions sonores, en phase de travaux ou d'exploitation, sont susceptibles de perturber (voire, dans les cas extrêmes de blesser ou tuer) des organismes marins sensibles. Ces deux aspects sont traités dans les paragraphes suivants ainsi que dans la section 6.1.3 relative aux blessures et mortalité d'individus qui sont, pour de nombreuses espèces, directement associés aux comportements à proximité des installations.

Bruit et vibrations

La production de bruit en lien avec les installations EMR peut concerner les phases de construction, d'exploitation et/ou de démantèlement. Les bruits produits par des travaux et par le fonctionnement des installations peuvent présenter des signatures acoustiques⁷⁹ très différentes, concerner des fréquences variées et représenter des volumes sonores hétérogènes. De nombreux groupes biologiques marins sont sensibles aux bruits de leur environnement, en premier lieu les mammifères marins, les poissons et les tortues marines. La sensibilité acoustique des invertébrés fait l'objet de moins d'études à ce jour et d'une attention plus récente. Des effets néfastes de certains bruits sous-marins ont été constatés sur plusieurs groupes d'espèces (céphalopodes, crustacés, bivalves, etc.) : perturbation de comportements, stress, diminution des réactions de fuite, altération des activités d'alimentation (Hawkins, et al., 2017) (Weilgart, 2018; Edmonds, et al., 2016; Tidau, et al., 2016; Thomsen, et al., 2015). Des travaux sont en cours pour affiner les connaissances sur la sensibilité acoustique des invertébrés, notamment dans le cadre du projet ANR/FEM Benthoscope 2 (EMR-ITE 2015) où les impacts de sources sonores (dont des bruits émis par des technologies EMR) sont testés sur plusieurs espèces d'invertébrés benthiques. Les effets des bruits sur les organismes marins ne sont pas spécifiques aux EMR et font l'objet de nombreuses études, en premier lieu sur la sensibilité acoustique aux bruits d'origine anthropique des espèces protégées (cétacés, pinnipèdes, tortues) et exploitées commercialement (par exemple : crustacés, morue, seiche, coquille Saint-Jacques). Des études traitent cependant, plus spécifiquement, sur les effets des phases de construction ou d'exploitation d'unités de production d'énergies en mer (éolien en mer et autres EMR) (Tougaard, 2015; Hammar, et al., 2017; Lossent, et al., 2017) (Thomsen, et al., 2015; Marmo, 2017).

⁷⁹ Terme regroupant les caractéristiques acoustiques des bruits : fréquences, amplitude, puissance

Les bruits liés aux EMR sont plus forts en phase de construction et de démantèlement, en lien avec les travaux en domaine maritime et le trafic associé. Les bruits sont cependant très variables selon les techniques utilisées, le contexte et le types d'installation.

Les principales sources sonores sont liées au trafic maritime ainsi qu'aux travaux de préparation des fonds marins, d'installation de fondations ou d'ancrages (éventuel battage de pieux, forage ou vibrofonçage, selon la nature du sous-sol marin). Les bruits produits varient fortement selon les types d'EMR, la nécessité ou non de fixation sur le substrat, les techniques utilisées pour fixer les éléments dans les fonds marins. Le recours préalable éventuel à des études sismiques constitue un élément important sur le plan des émissions sonores liées à un projet d'EMR.

Les bruits les plus forts sont généralement associés au battage de pieux (en comparaison de technique comme le forage ou le lestage), mais la majorité des installations EMR ne nécessite pas ou peu de battage (généralement de petits pieux). Les bruits de forage et de battage font l'objet d'une attention particulière. Leurs effets sur les organismes marins peuvent être appréhendés à travers la modélisation de signature acoustique, des modèles de propagation des sons permettant de déterminer les puissances sonores perçues en fonction de différentes fréquences acoustiques et à diverses distances de la source de bruit. Ces modèles doivent être combinés avec des estimations du déplacement des animaux pour déterminer les niveaux d'énergie acoustique reçus en fonction de la durée d'exposition cumulée, afin d'en déduire l'impact sur un individu.

Les risques associés à des sons puissants, dans des fréquences acoustiques perceptibles par les organismes marins, concernent le masquage des écholocations, le changement de comportements voire des lésions tissulaires / dommages physiologiques (pour poissons, mammifères marins).

Un projet de recherche spécifique sur les impacts environnementaux des bruits, vibrations et émissions électromagnétiques des EMR a été réalisé sous financement de l'Union européenne (projet MaRVEN) (Thomsen, et al., 2015). Le rapport final de ce projet fournit une synthèse très détaillée de l'état de l'art sur ces aspects, ainsi que des résultats d'expérimentation, des recommandations méthodologiques et des axes de recherche.

Des synthèses de retour d'expérience sur les émissions sonores induites par des EMR ont été compilées sur plusieurs sites, notamment *Strangford Lough* (Irlande du Nord, hydrolienne SeaGen), *Cobstook Bay* (Etats-Unis, hydrolienne), *East River* (Etats-Unis, hydrolienne) ou encore *Puget Sound* (Etats-Unis, houlomoteur) (Copping, et al., 2013a; Copping, et al., 2016; Copping, et al., 2014) ainsi que sur les sites de *Lysekil* (Suède – houlomoteur), *Kishorn* (Ecosse – houlomoteur) et *Wight* (Angleterre – Hydrolienne) (Thomsen, et al., 2015). Robinson et al. (2013, cité dans Copping, et al. (2016)) ont synthétisé une trentaine d'études relatives aux bruits associés au développement d'installations hydrolienne ou houlomotrice, en phase de construction et/ou d'exploitation.

Selon les auteurs de l'état de l'art international *Annex IV* (Copping, et al., 2016), les bruits produits, en phase d'exploitation par les installations d'énergies houlomotrices et hydroliennes, ne semblent pas être de nature à constituer des impacts sur la faune marine (Copping, et al., 2016), que ce soit en termes de risques de blessure, de dérangement d'individus ou en termes de perturbation des activités. Les conclusions du projet MaRVEN (Thomsen, et al., 2015) sont similaires, les bruits de fonctionnement des installations houlomotrices et hydroliennes étudiées étant très faibles. Ces auteurs indiquent cependant que les bruits de fonctionnement peuvent être perçus à quelques dizaines de mètres par certains poissons (23 m pour le site de *Lysekil* en Suède). Néanmoins, et comme indiqué précédemment, tous les retours d'expériences disponibles sont issus de démonstrateurs, constitués d'une à trois génératrices isolées ; aussi, l'extrapolation de ces résultats à des projets d'ampleur commerciale reste sujette à caution.

Pour les installations houlomotrices, une étude détaillée a été réalisée au Danemark, sur le dispositif *Wavestar* (Tougaard, 2015), avec calcul des sons produits, des sons perçus et émergence vis-à-vis du bruit ambiant. Les sons mesurés sont très faibles, difficilement perceptibles par les mammifères marins (marsouins, phoques), peut-être complètement imperceptibles. Les auteurs concluent que les risques d'impacts sonores d'une installation houlomotrice sont très faibles.

Quelques études récentes ont identifié des effets sur les comportements et activités à proximité d'installations EMR. Une étude récente (Hastie, et al., 2018) met ainsi en évidence une diminution d'activité de Marsouin commun à proximité d'une hydrolienne (effets perceptibles jusqu'à 500 m selon cette étude) ; les auteurs rattachent ce constat à une possible conséquence des bruits ainsi que de la présence de l'hydrolienne.

L'aspect relatifs aux impacts sonores est particulièrement bien documenté dans la littérature, avec de nombreux parallèles avec l'éolien en mer (et ceci bien que les modalités d'installation soient généralement différentes de celles de l'éolien en mer posé). Les impacts acoustiques en phase travaux sont très dépendants des caractéristiques des installations (besoins de fixation, ancrages, lestage) et de la nature des fonds et du sous-sol (installation par forage, vibrofonçage voire, rarement, battage de pieux). L'évaluation des impacts est basée sur les connaissances concernant les caractéristiques acoustiques des mammifères marins, des poissons ou d'autres espèces marines ; des manques de connaissance demeurent sur la sensibilité de nombreuses espèces. En phase d'exploitation, les impacts acoustiques sont jugés négligeables pour des démonstrateurs constitués de quelques machines isolées, mais mériteraient davantage d'études pour anticiper les effets d'installations de plus grande ampleur.

Perturbations des comportements et des activités

La présence même des installations EMR est susceptible d'engendrer des modifications de comportement et d'activité d'organismes marins à leurs abords (Bonar, et al., 2015; Roche, et al., 2016). Ces effets sont complexes à étudier finement, au regard des difficultés d'étude précise des comportements des animaux marins, d'autant plus dans des zones contraintes (forte courantologie, dispositifs majoritairement immergés).

La présence et les mouvements des dispositifs, combinés aux bruits qu'ils produisent, peuvent générer des perturbations comportementales / évitement (mammifères marins, autres grands animaux marins) (Copping, 2018), avec une possible habitude de certains animaux à la présence des EMR. Certains dispositifs EMR (installations houlomotrice, par exemple) peuvent par ailleurs constituer des reposoirs pour les oiseaux.

L'étude des comportements d'organismes marins, notamment poissons, mammifères marins et oiseaux plongeurs, à proximité d'installations EMR fait l'objet de nombreuses études *in situ* (Williamson, et al., 2017; Copping, et al., 2016; Fraser, 2017; Copping, et al., 2013b).

Les premiers retours d'expérience sur des installations tests ne mettent pas en évidence d'effets de déplacements notables des mammifères marins ou poissons à proximité d'EMR (Roche, et al., 2016; Copping, et al., 2016; Copping, et al., 2013b). Cependant, il est parfois délicat de conclure de manière totalement définitive sur les réactions comportementales. Par exemple Keenan et al. (2011) (cité dans Copping et al. (2013b), sur le dispositif hydrolien SeaGen dans le *Strangford Lough* (Irlande du Nord) ne relève pas de preuve de modification significative de comportement, même si des individus de Marsouin commun ont semblé éviter le centre du chenal lorsque la turbine était en rotation. Sur le site de *Cobscook Bay* aux Etats-Unis (hydrolienne), les suivis n'ont pas indiqué d'évitement complet des abords de la turbine par les poissons mais ont mis en évidence des interactions de certains poissons avec la turbine (principalement lorsque à l'arrêt, mais également en rotation) (Viehman et al., 2015 dans Copping, et al. (2016)).

Des incertitudes existent cependant sur les risques d'évitement, par les grands animaux marins comme les grands cétacés, de sites regroupant de nombreux installations EMR statiques ou mobiles et qui pourraient alors engendrer la perte de zones d'alimentation, de transit, repos voire de reproduction (Copping, 2018). Les données actuelles ne permettent pas de certifier l'existence de tels phénomènes, ni de fournir des distances d'effets possibles.

Certaines études mettent, au contraire, en évidence des augmentations de densités de poissons à proximité d'installations EMR (voir section 6.1.1 concernant les effets récifs et DCP). Des études récentes (Fraser, 2017; Fraser, et al., 2018) notent ainsi une modification de la distribution spatio-temporelle des poissons, généralement une augmentation des activités / densités, de même qu'une perturbation des rythmes d'activité journaliers à proximité des EMR (pics de présence basés davantage sur l'hydrodynamisme et les effets de sillage). De fortes concentrations de poissons ont été notées dans le sillage de l'EMR, principalement par période de faible courantologie. Ces effets ont été étudiés sur des espèces grégaires (Maquereau, Sprat, Hareng, etc.).

Enfin, comme indiqué dans la section 6.1.1, certains éléments des technologies EMR, peuvent constituer des zones d'attraction de certaines espèces (*Fish attraction device* – FAD, effet récif).

Les effets des perturbations individuelles ou localisées à l'échelle des populations sont complexes à évaluer et font l'objet de nombreux documents (voire, entre autres l'approche PCOD - *Population Consequences Of Disturbances*) (Lusseau, et al., 2012; Harwood, et al., 2014)

Les activités et comportements de la faune marine à proximité d'installations EMR font l'objet de nombreuses études, visant à accroître la compréhension des conséquences comportementales de la présence de ces équipements ainsi que pour mieux évaluer des impacts induits (risques de collision par exemple). Des études *in situ* ainsi que des tests de laboratoire ont été réalisés sur plusieurs sites dans le monde (Copping, et al., 2013a; Copping, et al., 2016). De nombreux travaux sont menés sur les mammifères marins (Cox, et al., 2017; Hastie, et al., 2018; Copping, et al., 2016; Fox, et al., 2017), les poissons (Fraser, 2017; Fraser, et al., 2018; Williamson, et al., 2017) (Viehman & Zydlewski cité dans Roche et al. (2016)) et les oiseaux marins plongeurs (Waggitt, et al., 2017; Robbins, 2017; Wade, 2015; Williamson, et al., 2017). Ces travaux sur les comportements et activités de nage et transit sont souvent rattachés aux risques de collision (traités en section 6.1.3). En effet, les conséquences comportementales de la présence et du fonctionnement des installations peuvent influencer les risques de collision pour certaines espèces comme les poissons ou les oiseaux plongeurs (Wilson, et al., 2006; Hastie, et al., 2018; Copping, et al., 2016; Hammar, et al., 2015).

La présence d'installations EMR peut modifier les comportements d'espèces marines (mammifères marins, poissons, voire certaines espèces d'oiseaux plongeurs), tant par gêne / aversion que par attraction. Les retours d'expérience sur ces aspects restent cependant peu nombreux ; l'étude de ces phénomènes requiert des moyens importants.

6.1.3. Blessures ou mortalité d'individus

Les risques de blessure ou de mortalité d'individus de faune marine avec les dispositifs de production d'énergie marine renouvelable font l'objet d'une attention forte, depuis plus de 15 ans. Les collisions et chocs avec les installations mobiles constituent le facteur de risque le plus important.

De nombreux rapports ou publications traitent de ces risques, principalement pour les mammifères marins, les poissons et les oiseaux plongeurs.

Les technologies d'EMR considérées comme présentant les risques les plus importants en termes de blessure voire mortalité d'individus sont les hydroliennes à axe horizontal, les turbines marémotrices et, plus indirectement, les dispositifs mobiles tels que les ailes sous-marines (Copping, et al., 2016). Les risques de collision d'animaux marins avec les structures mobiles sont généralement considérés comme faibles, à l'exception de certaines hydroliennes à haute vitesse de rotation. Pour les équipements flottants, des risques de collision sont associés aux câbles et chaînes reliant la surface et le fond marin.

De nombreuses incertitudes entourent cependant les risques de collision, blessure ou mortalité, d'animaux marins avec les installations EMR. Les risques d'impacts par collision peuvent être variables selon les caractéristiques des turbines, la configuration des installations, les milieux, les espèces (Bonar, et al., 2015). Les activités des animaux marins sont considérées comme un facteur d'influence important des risques de collision (activités de chasse, recherche de proies pélagiques ou benthiques, déplacement migratoire, déplacements réguliers) (Wilson, et al., 2006; Roche, et al., 2016; Copping, et al., 2016).

Concernant les turbines marémotrices, les capacités de franchissement sont directement dépendantes des dimensions des turbines, de la vitesse de rotation et de la taille des animaux (poissons notamment). Les vitesses de rotation faibles de certaines turbines marémotrices permettent à de proportions importantes de poissons de les traverser sans dommage (Dacre et al. (2007) & Wilson et al. (2007) cité dans Bonar, et al. (2015) et Copping (2018)).

Les dispositifs houlomoteurs présentent des risques considérés par les auteurs comme plus réduits (Copping, et al., 2016).

Plusieurs synthèses de l'état des connaissances sur les risques de collision entre faune marine et hydroliennes ont été réalisées, en premier lieu vis-à-vis des poissons (Copping, et al., 2013b) puis vers d'autres groupes biologiques comme les mammifères marins, les tortues marines et les oiseaux plongeurs (Copping, et al., 2016). L'attention la plus forte est portée aux espèces de taille importante, dont les effectifs sont peu élevés et les taux de reproduction faibles (principalement mammifères marins et tortues marines), puisque les conséquences de collision individuelles sont davantage susceptibles d'affecter les populations (Carlson et al., 2013 cité dans Copping et al. (2016)).

De nombreux travaux récents ont été menés ou sont en cours sur l'évaluation des risques de blessure ou collision des organismes marins avec des installations EMR, en particulier les installations dynamiques utilisant les courants (dont hydroliennes), les installations houlomotrices et, plus

secondairement, les installations marémotrices. Il convient de préciser que la synthèse la plus récente sur les EMR indique qu'aucun élément ne permet de certifier qu'un choc entre une hydrolienne et un mammifère marin pourrait être mortel, ni que de tels événements puissent être réguliers ou même se produire (Copping, et al., 2016).

De nombreuses modélisations et tests en laboratoires ont été menés sur le sujet : modélisation des risques de collision avec les pales d'hydroliennes développée par des chercheurs du *Oak Ridge National Laboratory* (ORNL, Etats-Unis), modélisation avec une turbine marémotrice pour poissons et Marsouin commun (SAMS, Ecosse), modélisation des conséquences d'une collision avec turbine marémotrice (PNNL et SNL, Etats-Unis) (Carlson et al., 2012 dans (Copping, et al., 2016)). Ces tests et expérimentations visent à limiter les incertitudes concernant les comportements des animaux marins à proximité des EMR, étudier les phénomènes d'attractivité ou de gêne ainsi que les taux de survie lors du passage au niveau de turbines immergées. Malgré des retours d'expérience, il demeure cependant de très nombreuses incertitudes concernant les comportements des poissons, mammifères marins ou oiseaux plongeurs au niveau d'installations EMR (Copping, et al., 2016).

Certaines approches sont focalisées sur l'élaboration d'indices de vulnérabilité / sensibilité (notamment pour les oiseaux (Wade, 2015; Furness, et al., 2012; Robbins, 2017), ou les mammifères marins (Lusseau, et al., 2012)), permettant des évaluations *a priori* des risques. Ces approches nécessitent des données nombreuses sur les comportements des animaux, leurs activités générales mais également sur les populations (état, dynamique).

Des modèles d'évaluation des risques de collision / choc sont également développés, notamment par les anglo-saxons, pour les oiseaux plongeurs (Waggitt, et al., 2014; Scott, et al., 2014; Wilson, et al., 2006), les mammifères marins (Schmitt, et al., 2017; Copping, et al., 2017; Hutchison, et al., 2016) ou encore les poissons (Schmitt, et al., 2017; Copping, et al., 2016; Hammar, et al., 2015).

Un guide méthodologique et de recommandations très détaillé a été élaboré sur ces aspects par le Scottish National Heritage en 2016 (SNH, 2016). Il présente trois modèles d'évaluation des collisions d'individus d'espèces de mégafaune marine (mammifères marins, oiseaux plongeurs, Requin pèlerin et Saumon atlantique) avec des turbines immergées. De nombreux paramètres sont fournis sur les individus biologiques et les caractéristiques techniques des installations. Une analyse comparative des modèles est également réalisée, avec évaluation de leurs points forts et points faibles. Enfin, des recommandations sur l'usage de ces modèles et la manière de compiler les données sur le terrain sont fournies.

Les risques de blessures ou mortalité induits par la présence et le fonctionnement d'installation EMR sont ciblés par plusieurs publications analysées, en particulier pour les équipements exploitant les courants marins (type hydroliennes). Des études, modèles et recommandations méthodologiques ont été publiés sur ces aspects, qui demeurent cependant à ce stade partiellement appréhendés. Les mécanismes influençant les risques de blessures font l'objet de travaux de recherche tandis que la réalité de ces risques demeure sujette à validation sur le terrain.

6.1.4. Modifications des paramètres environnementaux

Outre les altérations localisées des fonds marins et les perturbations hydrodynamiques et hydro-sédimentaires que peuvent engendrer certaines installations EMR, les travaux de construction / démantèlement et l'exploitation des EMR peuvent engendrer d'autres types d'impacts :

- L'apport de polluants et produits chimiques (peinture *antifouling*⁸⁰ par exemple) ;
- Champs électromagnétiques au niveau des câbles de transport d'électricité reliant les unités de production entre elles ou avec un éventuel poste électrique en mer, ainsi que vers le poste de raccordement terrestre.

A noter que ces aspects ne diffèrent pas significativement de ceux fournis pour l'éolien en mer, hormis l'échelle des projets. Par ailleurs, l'essentiel des retours d'expérience et tests proviennent de l'éolien en mer. Pour des informations plus détaillées, voir la section 5.1.4 relative aux modifications des paramètres environnementaux dans le cas de l'énergie éolienne en mer.

⁸⁰ Biocide utilisé pour limiter la prolifération des organismes vivants aquatiques

Un exemple de parc EMR marémoteur impactant la **salinité de l'eau** est donné au travers de l'usine marémotrice de la Rance, dont la construction a modifié l'écosystème marin à proximité. Le guide du Développement des énergies marines renouvelables et préservation de la biodiversité de l'UICN français indique que lors de sa construction, l'estuaire de la Rance a été modifié et la marée n'a plus eu d'impact direct sur l'estuaire. Ceci a entraîné une modification de la stabilité de la masse d'eau et des habitats de l'estuaire. La concentration en sel de l'eau a changé, induisant un changement de la faune (Péguin, et al., 2014).

Au vu des spécificités de chaque site, il n'est pas possible de généraliser cet exemple à toute usine marémotrice et à toute EMR.

6.1.5. Méthodes d'évaluation des impacts, méthodes de suivi et incertitudes

Il n'existe pas à ce jour de méthodes faisant pleinement consensus pour évaluer les différents types d'impacts engendrés par les installations EMR sur les écosystèmes marins, cependant des pratiques et recommandations peuvent être mises en avant.

Le recours à des modèles d'évaluation des risques d'impact pour les EMR est, entre autres, lié aux difficultés pour réaliser des suivis réguliers et suffisamment précis des activités de la faune marine au niveau des zones de développement des projets d'EMR (complexité d'accès, conditions délicates de suivi, coûts importants).

Le guide édité en 2012 par le Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (MEDDE, 2012) propose une approche méthodologique d'évaluation des impacts sur les milieux et organismes marins basée sur la caractérisation de la sensibilité des habitats et espèces, ainsi que leur résilience. Ce guide fournit une approche générale et relativement théorique, mais avec des recommandations méthodologiques concrètes concernant l'élaboration de l'état initial, l'évaluation des impacts prévisionnels des EMR sur l'environnement et le suivi de ces impacts. Un tel guide, spécifique et particulièrement détaillé, ne peut être raisonnablement synthétisé dans le cadre de la présente étude.

Un guide d'évaluation des impacts environnementaux pour les technologies hydroliennes en mer a été édité en 2013 par France énergies marines (FEM, 2013). Ce document fournit une approche détaillée des éléments à considérer dans le cadre de l'évaluation des impacts environnementaux, notamment sur la biodiversité, des projets de développement d'hydroliennes dans le contexte français. Ce guide présente des méthodes d'analyse des changements écologiques potentiels, une approche de caractérisation des effets cumulés, une description de programme de suivi environnemental, des mesures d'atténuation des impacts ainsi que des lacunes et programmes de recherche sur des composantes environnementales variées (fonds marins, bruit sous-marin, benthos, halieutique, mammifères marins, avifaune, etc.). Un tel guide spécifique ne peut être raisonnablement synthétisé dans le cadre de la présente étude. Il constitue une base de travail très détaillée et éclairante. Les approches proposées et recommandations peuvent être appliquées à d'autres types d'EMR.

Un vaste programme européen a été réalisé en 2015 et 2016 avec un financement du programme Horizon 2020 de l'Union européenne : le projet RiCORE (*Risk Based Consenting for Offshore Renewable Energy Projects*) (ricore-project.eu). Ce projet visait à établir une approche basée sur l'évaluation des risques dans le cadre des processus de développement, autorisation et suivi des projets d'EMR. Cette approche intègre plusieurs notions clés que sont la sensibilité environnementale du site, les profils de risques de la technologie et l'échelle du projet étudié, afin de limiter les incertitudes entourant les effets réels des projets d'EMR sur les écosystèmes marins. De ce programme, plusieurs recommandations méthodologiques concrètes ont été élaborées sous forme de documents de synthèse regroupés par *work package*. Tous les documents issus du programme sont accessibles en ligne et constituent une source d'informations remarquable sur l'état des connaissances, les caractéristiques techniques des EMR. Plusieurs recommandations méthodologiques détaillées, principalement sur les études d'état des lieux et de monitoring, sont fournies dans les documents associés aux *work package* 3, 4 et 5.

Plusieurs autres publications et documents traitent des méthodes de suivis des effets des EMR sur l'environnement, à travers la synthèse de méthodes et modèles existants, ou bien en proposant des approches novatrices généralement basées sur une caractérisation des niveaux de risques (Bender, et al., 2017).

Comme tout projet d'aménagement, les installations EMR doivent se conformer au cadre réglementaire issu du Code de l'environnement, notamment relatif aux études d'impact (pour les

projets qui y sont soumis). Deux guides récents (MEDDE, 2012; FEM, 2013) fournissent un cadre méthodologique spécifique concernant l'évaluation des impacts des projets EMR en France. Un programme européen a par ailleurs entraîné l'élaboration de recommandations méthodologiques. L'évaluation des impacts des installations EMR restent toutefois très complexe au regard des moyens nécessaires aux expertises, aux difficultés et coûts associés. Par ailleurs, l'essentiel des retours d'expérience ou expérimentations concerne à ce jour des installations isolées : la transposition des impacts à l'échelle d'unités de production de taille industrielle nécessitera des adaptations méthodologiques et un partage des retours d'expérience.

6.2. Impacts des énergies marines sur les sols et les sédiments

6.2.1. Impacts en termes de surfaces de sols et fonds marins

Les impacts relatifs à l'occupation des fonds marins et du littoral par les énergies marines (hors éolien en mer) sont étudiés dans quelques publications, et font référence à l'emprise requise lors de l'installation et de l'exploitation du parc en mer. Il n'est pas fait mention dans la littérature des impacts générés lors d'autres étapes du cycle de vie des structures ; le démantèlement des structures est considéré requérir une emprise similaire à celle des travaux d'installation.

La **planification des fonds marins** au niveau d'un parc est principalement engendrée par l'emprise nécessaire pour les structures et/ou l'ancrage des lignes de mouillages et le passage des câbles électriques. Selon le type de technologie utilisée et le type d'installation, la surface concernée par les fondations peut significativement varier (Hadian, et al., 2014). Certaines installations utilisent des fondations qui reposent sur le fond par gravité (lestage) ou par des pieux (par exemple, houlomoteur à oscillation verticale, hydrolienne à fondation gravitaire ou monopieu) alors que d'autres systèmes sont flottants et ancrés au fond marin par des lignes de mouillages (par exemple, houlomoteur avec chaîne flottante articulée).

L'impact de l'occupation des fonds et du littoral peut être illustré par le cas de l'installation marémotrice de la Rance, de loin la plus importante (puissance de 240 MW avec un bassin de stockage d'environ 22 km²)⁸¹ : l'usine s'étend sur 390 m de long et 33 m de large au niveau du fond marin, une emprise requise de façon prolongée (artificialisation pendant toute la durée d'exploitation). L'installation est complétée par un barrage mobile d'une longueur de 115 m et une digue en enrochement de 164 m de long fermant l'estuaire (Péguin, et al., 2014). De manière plus générale, les projets d'installation marémotrice génèrent une plus forte emprise des fonds (en particulier pour une structure proche de la côte, avec barrage) que les autres types d'EMR ; ce résultat est cependant à relativiser au vu de leur puissance plus importante.

Les câbles utilisés pour relier les génératrices entre elles et pour le raccordement au réseau peuvent également être considérés dans la surface occupée par un parc EMR, mais l'emprise associée reste négligeable (d'autant plus lorsque les câbles sont posés sur les fonds et recouverts de matelas ou d'une coque plutôt qu'ensouillés, ce qui est généralement le cas). Le type de câble utilisé est identique aux parcs éoliens en mer ; les ordres de grandeur disponibles sont autour de 10 à 15 m²/km pour les câbles posés et 2 000 m²/km de câbles pour ceux ensouillés (MEDDE, 2012). A noter que les câbles utilisés pour les installations d'EMR de forte puissance sont de diamètre plus important (Péguin, et al., 2014). Le diamètre des câbles dépend de la puissance à exporter.

Pour les dispositifs flottants, l'ancrage des lignes de mouillages semble être significatif. Il est important de distinguer les systèmes à lignes de mouillage tendues, qui ont peu d'emprises sur les fonds, et les systèmes à lignes souples, qui peuvent occuper des zones de plusieurs centaines de mètres de rayon sur le fond.

Enfin, et comme pour toute production d'énergie, la construction d'une usine de production d'énergie marine implique la mise en place de bâtiments d'exploitation sur le sol terrestre (raccordement au réseau, station de maintenance notamment). L'emprise terrestre par unité d'énergie installée est

⁸¹ L'usine marémotrice de la Rance est le projet EMR le plus abouti en France, en fonctionnement depuis 1966 (24 groupes de production de type « bulbe » de 10 MW chacun)

négligeable pour la majorité des installations, sauf si elles requièrent la construction d'infrastructures portuaires pour assurer leur maintenance.

Dans l'ensemble, les projets EMR en cours (en France notamment) décrivent relativement bien les dimensions des structures. L'emprise sur les fonds marins reste cependant peu évaluée. Il est d'autant plus difficile d'extrapoler les résultats existants que les impacts varient de façon significative d'un projet et d'une technologie à l'autre, étant donnée la diversité des procédés d'exploitation et des installations EMR.

L'**artificialisation** des fonds marins dans le cas d'installations EMR est limitée aux surfaces des fondations et des câbles de raccordement au réseau lorsque ceux-ci ne sont pas ensouillés mais posés sur le fond et éventuellement protégés (par des enrochements, des matelas en béton ou des coquilles métalliques). L'ensouillage reste cependant une pratique peu utilisée, notamment dans des zones à forts courants (les sédiments se déposent peu, et les fonds marins sont durs, généralement rocheux) (Péguin, et al., 2014). De plus, dans le cas d'une fondation utilisant un ancrage par câble sur le fond marin, la surface artificialisée est d'autant plus réduite. La notion d'artificialisation des sols ou des fonds marins est peu mentionnée et n'est pas évaluée dans les publications répertoriées. En fonction du type d'EMR et de l'emprise des structures sur les sols ou des fonds marins, il est fait mention du temps de restauration des substrats et des habitats benthiques.

La question de l'artificialisation des fonds marins et du littoral est mentionnée dans le cas de la production d'énergie marine, mais non étudiée au vu de son intensité négligeable.

6.2.2. Impacts physiques sur les sédiments

Les impacts physiques des énergies marines sont bien décrits dans la littérature, mais restent peu évalués. Il peut s'agir d'impacts directs, *via* une modification de la morphologie des fonds marins ou la compaction du substrat de façon localisée autour des fondations, ou indirects, lorsque des changements courantologiques et sédimentaires (perturbation du dépôt des sédiments) sont générés par les structures, à proximité des fondations ou des câbles. La nature et l'intensité des impacts varient en fonction de la nature du substrat marin et du type d'installation considérée (MEDDE, 2012).

Afin d'évaluer les impacts sur les fonds et plus généralement sur l'environnement et ainsi réduire au mieux les impacts en choisissant l'emplacement le plus approprié, des méthodes diagnostiques, comme la cartographie géomorphologique, et des méthodes prédictives, comme la modélisation hydro-sédimentaire sont utilisées. De nombreux logiciels de simulation (SWAN – *Simulating Waves Near Shore*, etc.) et outils d'études de terrain existent et sont utilisés en phase amont d'un projet d'énergies marines. La **cartographie géomorphologique** est une méthode d'évaluation permettant d'étudier *a posteriori* les variations morpho-sédimentologiques des fonds marins dans le temps (faciès, lithologie des fonds, érosion, transport de sédiments, etc.) ainsi que la nature et structure des fonds marins. Cette cartographie est réalisée grâce à un sonar à balayage latéral utilisé en changeant la fréquence des ondes pour détecter les différents faciès sédimentaires. Pour déterminer la nature géologique des fonds et les caractéristiques granulométriques des profils, **des études sismiques et des prélèvements d'échantillons** sont réalisés. Une **cartographie morpho-bathymétrique** des sites français peut être réalisée pour étudier la bathymétrie des fonds marins à l'aide d'un sondeur mono ou multi-faisceau. Enfin, une **étude morpho-sédimentologique** permet de connaître le faciès et la lithologie des fonds. L'Ifremer a réalisé un inventaire de toutes ces données géologiques pour les sites disponibles pour l'installation d'énergie marine en France. Le SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) a acquis des données bathymétriques et géomorphologiques sur les principaux sites éoliens et hydroliens. En complément des études marines, des études terrestres (géologie, topographie, pédologie) doivent être réalisées pour analyser la fiabilité du projet et limiter les impacts du raccordement, des câbles et des installations sur terre (MEDDE, 2012). Les impacts liés aux installations marines étant peu connus, de nombreuses études doivent être réalisées pour chaque projet afin d'estimer la faisabilité de celui-ci et limiter au mieux les impacts sur les fonds marins en fonction des caractéristiques du projet, des installations et des propriétés des fonds.

Lors de la mise en place d'installations d'énergie marine, les fonds marins peuvent être remaniés et modifiés, et des matériaux sont éventuellement extraits. Dans certains cas, le fond est nivelé par dragage et des forages sont réalisés, ou les fondations sont ancrées au substrat. Des matériaux de

ballast peuvent éventuellement être extraits dans le cas de fondations gravitaires. L'installation des structures des énergies marines et l'enfouissement potentiel des câbles de raccordement entraînent une **modification voire une destruction locale du substrat marin**, dont l'intensité varie fortement d'un projet à l'autre du fait notamment de la diversité des procédés d'exploitation (Cada, et al., 2007).

Par exemple, une installation houlomotrice à oscillation verticale aura un impact plus important qu'une installation houlomotrice avec chaîne flottante articulée au vu de leur emprise différente sur les fonds. C'est également le cas de certaines hydroliennes comme celles du projet de Paimpol-Bréhat en Bretagne, qui pèsent 850 tonnes pour 16 m de diamètre et qui est lestée au fond par son poids. Plus généralement, et comme dans le cas de l'éolien en mer, la modification de la morphologie des fonds marins dépend de la façon dont les structures sont fixées (fondation gravitaire, ancrage par chaîne, etc.).

De plus, si les installations sont reliées à une centrale thermique à terre (dans le cas de certaines installations d'énergie thermique des mers), cela implique le déploiement de tuyaux de plus gros diamètre que dans le cas d'un raccordement électrique. Les tuyaux sont mis en place depuis le rivage sur le fond pour atteindre les eaux froides situées à environ 1000 m de profondeur. Les impacts physiques sur les fonds peuvent s'avérer plus importants dans le cas d'une installation située au niveau d'habitats benthiques plus fragiles, par exemple à l'intérieur (ou en bordure) de lagons ou dans des zones de récifs de coraux (Péguin, et al., 2014), cas représentatif de certains territoires français d'outre-mer.

Selon le type de structure, des **vibrations** peuvent également être générées au niveau des fonds marins lors des phases de fonctionnement, ainsi que lors de l'installation et du démantèlement. Les effets sont *a priori* similaires pour ces deux phases, mais distincts d'une technologie EMR à l'autre). A noter que les vibrations engendrées par le battage des pieux pour l'ancrage d'une structure sont très importantes et ponctuelles tandis que les vibrations engendrées par une turbine se font dans la durée et ont une intensité moindre. Peu de retours d'expérience existent cependant à ce sujet, les énergies marines étant assez récentes (MEDDE, 2012).

Le démantèlement d'infrastructures d'extraction pétrolière constitue une source d'informations potentiellement applicable au cas de certaines EMR, ne pouvant être soulevées directement par des grues en raison de leur poids, et nécessitant d'être découpées sur place. Cela concerne à la fois la mise en œuvre des travaux de démantèlement et la nécessité d'anticiper cette étape avant tout vieillissement des installations (corrosion, source d'accidents, etc.). Les impacts générés lors de cette phase sont cependant très variables selon la technologie EMR. Ainsi, un système houlomoteur flottant sera plus facilement démantelé qu'une hydrolienne, en ayant donc un impact sur le fond réduit

Des éléments complémentaires sur les vibrations, axés sur les bruits sous-marins, sont disponibles en section 6.2.

Selon le type d'installation, les impacts des énergies marines sur la morphologie et les vibrations générées dans des fonds marins semblent fortement varier. Ces phénomènes restent cependant peu étudiés dans la littérature, du fait du caractère récent de ces énergies et de leur diversité : il reste donc difficile d'en généraliser l'intensité, mais l'emprise au sol requise par les différentes technologies EMR peut donner une première indication des enjeux associés.

Plusieurs publications identifiées lors de la revue de littérature mentionnent la question des **perturbations hydro-sédimentaires** pouvant être générées par certaines installations EMR lors des étapes d'installation, d'exploitation et de démantèlement. Ces changements hydro-sédimentaires peuvent modifier localement les habitats benthiques, notamment lors de déploiements à l'échelle commerciale (effets cumulés). La perturbation de la dynamique des sédiments se traduit plus généralement par la remise en suspension de sédiments et l'augmentation de la turbidité de l'eau à proximité des fonds (Pethick, et al., 2009). A noter que l'intensité des impacts varie en fonction de la localisation du parc (notamment, nature du substrat marin), des technologies EMR et des caractéristiques propres à chaque installation.

Durant les phases d'installation et de démantèlement, et selon l'intensité des perturbations des fonds marins, une remise en suspension locale de sédiments peut être observée (MEDDE, 2012). En cas d'ensouillage des câbles, la création des souilles génère une suspension des matériaux (Boye, et al., 2013). Lors de l'exploitation d'énergie hydrolienne ou marémotrice, dont les structures exploitent les courants à proximité des fonds, le charriage et la mise en suspension de sédiments sont modifiés. Des études à partir de modélisations numériques, comme celle de Thiébot et al. (2015), montrent que

l'extraction d'énergie marémotrice induit une réduction de l'hydrodynamisme et des flux de sédiments. Une modification de l'hydrodynamisme en aval des turbines peut être observée (effet de sillage).

La portée de ces impacts (jusqu'à plusieurs kilomètres) est d'autant plus importante pour les parcs composés de nombreuses installations, par effet cumulé (Péguin, et al., 2014). Par exemple, l'érosion et le dépôt des sédiments dans le cas de la modélisation numérique d'une installation marémotrice à une dimension du canal de Bristol ont été affecté jusqu'à 50 km de distance du point d'extraction de l'énergie marémotrice (Neill, et al., 2009). Pour chaque cas, il est important d'étudier le degré d'asymétrie des marées ainsi que l'amplitude locale des courants au point d'extraction de l'énergie. Les retours d'expérience sont peu nombreux et les études se basent surtout sur des modélisations numériques, l'intensité de ces impacts de l'exploitation des hydroliennes reste donc mal connue. Elle est *a priori* négligeable en comparaison des effets générés lors de leur installation.

Des effets similaires sont observés dans des parcs marémoteurs, avec une redistribution géographique de l'érosion et des zones de sédimentation, notamment en fonction de la vitesse de montée de l'eau (El-Geziry, et al., 2009; Pethick, et al., 2009), pour les différentes étapes d'installation, de fonctionnement et de démantèlement.

Dans certains cas, les effets des EMR sur l'hydrodynamisme et la sédimentation peuvent également impacter le littoral. Par exemple, dans le cas d'un parc houlomoteur situé à proximité de la plage de Perrenporth (Royaume-Uni, façade Atlantique), l'intensité des vagues s'est trouvée réduite au niveau de la plage et par conséquent l'**érosion des côtes** également. Inversement, si les apports de sédiments sont réduits, ceci pourrait contribuer à renforcer l'érosion des plages. Ce phénomène induit un changement de dynamique, l'état naturel de la plage est modifié. Les résultats issus du logiciel SWAN (simulation de vagues en zone côtière) montrent que le parc absorbe une partie de l'énergie des vagues, réduisant par conséquent leur force et l'érosion du littoral. Plus le parc est proche de la côte, plus la hauteur des vagues est diminuée : d'après les modélisations, la hauteur des vagues est réduite de 25 %, 12 % et 5 % lorsque le parc est installé respectivement à 2 km, 4 km et 6 km de la côte (puissance du parc non précisée) (Abanades, et al., 2015).

Des informations complémentaires sur les perturbations hydro-sédimentaires, axées sur les impacts pour la biodiversité marine, sont disponibles en section 6.2.

Des impacts sur les régimes sédimentaires au niveau des fonds marins et du littoral (préservation des côtes dans le cas d'un parc houlomoteur) sont étudiés dans le cadre de certains projets, mais semblent difficiles à généraliser du fait des multiples variables (morphologie du fond et de la côte, nature des fonds, etc.). La nature comme l'intensité de ces impacts sont encore mal connus, mais des moyens sont mis en œuvre dans le cadre des projets pour en limiter l'intensité des impacts lorsque ceux-ci sont connus.

Certaines études mentionnent une éventuelle **augmentation de la température des substrats marins** à proximité des câbles de transport d'électricité et de chaleur, du fait de pertes énergétiques associées (Boye, et al., 2013) (MEEM, 2017). Dans le cas de câbles électriques, il semble y avoir un consensus sur le caractère négligeable de ces variations à proximité de la surface des fonds (MEDDE, 2012). Dans le cas de câbles enroulés, la variation de température est de moins de 1 °C dans les différentes publications (OSPAR Commission, 2008; Péguin, et al., 2013). Ces variations de températures sont négligeables mais pourraient avoir un impact plus important en fonction de la densité du maillage des câbles. Dans le cas de l'énergie thermique des mers, aucune étude parmi le corpus de littérature analysé ne mentionne l'impact sur la température des fonds généré par le raccordement au réseau de chaleur, au niveau des câbles au niveau des fonds.⁸² Cependant, la principale perturbation thermique causée par une centrale d'énergie thermique des mers se situe certainement au niveau de la canalisation de rejet, l'eau qui a circulé dans l'échangeur de chaleur ayant une température différente de plusieurs degrés de celle de la masse d'eau environnante.

Le caractère négligeable de l'impact de l'exploitation d'EMR (électrique ou thermique) sur l'augmentation locale de la température du fond marin semble faire consensus au sein de la littérature.

⁸² L'exploitation de l'énergie thermique des mers peut générer des variations thermiques associées aux pompes et rejets thermiques, parfois avec de forts gradients de températures ; il ne s'agit cependant pas d'un impact sur la température du sol.

6.2.3. Impacts chimiques sur les sols et sédiments

Les impacts chimiques potentiels sur les fonds marins de la production d'EMR sont mentionnés dans plusieurs publications, mais ne font pas l'objet d'évaluation quantifiée, ou de présentation des méthodes d'évaluation pouvant être mises en œuvre. De plus, il convient de mettre en regard ces impacts par rapport à ceux générés par des énergies conventionnelles (plateforme pétrolière, etc.) et d'autres activités maritimes (ports, bateaux, etc.). Les enjeux détaillés ci-dessous sont similaires à ceux présentés pour l'énergie éolienne en mer (voir section 5.2.3).

Les installations d'énergie marine renouvelable, comme toute infrastructure marine, peuvent utiliser des substances chimiques pour leur fabrication et leur fonctionnement : des peintures, des agents anticorrosions, des agents anti encrassement biologiques (dits *antifouling*) ou encore des fluides hydrauliques. Ces substances peuvent se dégrader et présenter potentiellement un risque pour l'environnement en se propageant dans le milieu marin et entraîner indirectement une **contamination des sédiments** (MEDDE, 2012). A date, aucune étude n'a encore permis de démontrer une contamination chimique sur les fonds marins de la part des installations d'énergie marine (Gasparatos, et al., 2017) mais divers impacts potentiels sont étudiés, notamment *via* le relargage d'une ou de plusieurs substances chimiques composant les structures sur les fonds marins.

La protection des parties mobiles, du carénage et de la fondation d'une hydrolienne contre la corrosion peut se faire par le biais d'une protection cathodique (anode sacrificielle dans la majorité des cas ou anode à courant inversée) et/ou de peintures anticorrosives. Les anodes sacrificielles sont majoritairement composées d'aluminium, l'oxydation rapide de ces métaux va permettre de protéger la structure de la corrosion. L'utilisation d'anode sacrificielle est cependant décriée du fait de sa dégradation, qui entraîne le relâchement de métaux lourds (cuivre, aluminium et zinc en particulier) dans l'eau. La toxicité de ces métaux dépend de la quantité et de la forme chimique sous laquelle ils sont rejetés.

Pour empêcher la colonisation par les organismes marins, des enduits *antifouling* peuvent être appliqués sur les structures en mer. En France, l'utilisation de ces peintures n'est pas privilégiée. Seuls certains composants spécifiques (ex. pales d'hydroliennes) peuvent être revêtus, et les revêtements les moins nocifs pour l'environnement sont privilégiés. De plus, la mise sur le marché des produits biocides est réglementée en France et certains produits sont déjà interdits d'utilisation dans l'Union Européenne.

Ces phénomènes de contamination du milieu marin sont identifiés dans la littérature, et mentionnés comme pouvant potentiellement contaminer les fonds marins et les organismes marins, par bioaccumulation des substances chimiques, de façon temporaire ou prolongée selon la persistance de la substance dans l'environnement (Péguin, et al., 2014). Ils ne font toutefois pas l'objet d'une évaluation dans la littérature, notamment par rapport à l'emprise géographique pouvant être impactée.

L'utilisation des huiles pour les moteurs hydrauliques et des lubrifiants chimiques est très réglementée. Les huiles doivent être les plus biodégradables possibles et être récupérées à la fin du circuit dans des bacs de récupération pour être traitées. De plus, de nouvelles techniques permettant de réduire l'impact sur l'environnement sont mises en place (par exemple, des installations avec une double étanchéité) et des guides de bonnes pratiques sont développés (AWATEA, 2008; Péguin, et al., 2014).

Enfin, et comme pour toute activité au niveau des fonds marins, la remise en suspension de sédiments lors des phases d'installation et de démantèlement mais également d'utilisation des structures peut également concerner des polluants déjà présents, en particulier si les installations sont à proximité d'un grand port (Shields, et al., 2009; Cada, et al., 2007). En France, la circulaire du 14 juin 2000 et l'arrêté du 9 août 2006 complété par l'arrêté du 23 décembre 2009 réglementent la qualité des sédiments marins et fixent des critères et des seuils, notamment pour des paramètres de granulométrie, des nutriments (azote, phosphore), des métaux lourds (cadmium, plomb, etc.), etc. La qualité physico-chimique des substrats peut être déterminée grâce à des prélèvements sur le terrain à l'aide de bennes preneuses au niveau des zones où les sédiments peuvent être contaminés (MEDDE, 2012).

A noter que selon les matériaux utilisés pour la fabrication des structures EMR et des systèmes de raccordement, la phase d'extraction des matériaux peut avoir un impact non négligeable sur la contamination chimique des sols terrestres. Ces impacts ne sont cependant pas spécifiques aux EMR, et peuvent être généralisés à l'ensemble des activités d'extraction de ces matériaux. Il serait possible

d'évaluer les impacts de l'extraction des matériaux primaires utilisés dans les EMR, en quantifiant les parts de marché associées à ces dernières et ainsi la proportion des impacts à allouer à cette application.

L'impact des émissions chimiques sur la qualité des sédiments reste mal connu à la fois en termes d'intensité et d'emprise spatiale. Il varie selon la nature des éléments rejetés, la phase du cycle de vie des structures EMR, la technologie considérée, etc. Les pratiques au niveau des parcs semblent privilégier les systèmes de protection des structures les moins nocifs pour l'environnement (biodégradables dans certains cas).

6.2.4. Impacts biologiques sur les sédiments, et services écosystémiques

Les impacts biologiques identifiés dans les publications sont majoritairement liés à une modification du milieu des espèces macro-benthiques et de la teneur en matière organique des fonds marins, lors des étapes d'installation et de fonctionnement des structures EMR.

Lors de l'installation des structures en mer, et ainsi que présenté en section 6.1.1, les impacts mécaniques générés par la mise en place d'un parc d'énergie marine renouvelable entraînent une destruction locale du substrat marin et des **communautés benthiques**. L'intensité de ces impacts varie en fonction de la technologie d'énergie marine et, pour une même technologie, du type de fondation et des choix d'installation (lestage, forage, ancrage) (Péguin, et al., 2014). Dans tous les cas, les capacités de résilience des habitats sont variables. En ce qui concerne les communautés benthiques, les impacts sont transitoires dans les zones d'ensouillage du câble par exemple ou permanents et localisés sous les structures recouvrant les fonds marins par leurs fondations : les œufs, les algues et les organismes benthiques fixés sont localement détruits, et seules les espèces mobiles peuvent éventuellement se déplacer pour éviter la destruction. Durant la phase d'exploitation, les fondations des énergies marines peuvent fournir un nouveau substrat dur induisant l'augmentation du développement de certaines espèces benthiques comme les organismes sessiles (Gasparatos, et al., 2017). Ce nouvel habitat possède des caractéristiques différentes de l'environnement naturel non propice à l'endofaune qui est spécifique des habitats sédimentaires,

D'autres publications indiquent toutefois qu'il y a peu d'impacts des énergies marines sur les communautés benthiques (Langhamer, et al., 2010). Une comparaison a été menée sur une période de cinq ans des communautés macro benthiques vivant sur le site de Lysekil (côte Ouest de la Suède), avant et après le développement de projets d'énergies marines. Les résultats indiquent que la faune marine située sur la zone du site évolue aléatoirement avec la mise en place des installations des énergies marines et la macrofaune change principalement à cause du changement d'hydrodynamique.

D'autre part, la perturbation des régimes hydro-sédimentaires présentée en section 6.2.2 peut indirectement impacter la pénétration de la lumière dans l'eau et les cycles biochimiques de certaines espèces (Krivtsov, et al., 2012). La nature et les mécanismes de ces impacts sont bien identifiés dans la littérature, mais ils sont généralisables à toute activité impactant les fonds marins et pas uniquement aux EMR. Des organismes comme le plancton ou les microalgues peuvent être impactés dans une moindre mesure, selon le type de technologie étudiée. Par la suite, le dépôt de ces sédiments peut recouvrir des organismes du fond marin (Péguin, et al., 2014). D'après (Krivtsov, et al., 2012), les énergies houlomotrices pourraient dans certains cas modifier les herbiers marins et diminuer la densité de population de certains microorganismes benthiques. La croissance de certains organismes comme les vers tubicoles est également perturbée par les ancrages au fond. Des éléments complémentaires sont fournis en section 6.1 relative aux impacts sur la biodiversité.

Enfin, la présence de structures EMR peut servir d'habitat à des communautés de la faune/flore du milieu, et indirectement favoriser l'**augmentation de matière organique** au niveau des fonds marins (Langhamer, et al., 2010). L'augmentation de matière organique est mentionnée dans des rapports de recherche mais ne fait pas l'objet d'évaluation dans la littérature.

L'impact des énergies marines sur la biologie des fonds marins reste peu étudié, et peut être difficilement assimilé à d'autres aménagements marins existants. Les effets des EMR sur les écosystèmes marins sont localisés dans des zones très dynamiques (fort courant, forte houle) à l'inverse d'autres aménagements existants (ports situés sur les côtes dans des systèmes abrités, plateformes pétrolières, etc.). Des méthodes d'évaluation existent cependant, et sont identifiées dans le rapport « Etude méthodologique des impacts des énergies marines

renouvelables » du Ministère de l'écologie français. Certaines de ces méthodes ont été standardisées afin de renseigner les indicateurs de la DCE (Directive cadre sur l'eau) et la DCSMM (Directive cadre stratégie pour le milieu marin). Il est ainsi recommandé d'identifier les biocénoses⁸³ locales en analysant la composition faunistique à l'aide de différents paramètres (nombre d'espèces, biomasse, etc.) et de différents indicateurs (indice de Shannon⁸⁴, etc.), grâce à des prélèvements des substrats marins ou de planctons et une cartographie des habitats benthiques (MEDDE, 2012).

6.3. Impacts des énergies marines sur les paysages

Peu de publications traitent des impacts paysagers des énergies marines : un total de neuf publications, dont deux seulement traitent spécifiquement de ces énergies marines. Sur le paysage, la bibliographie concerne quasi exclusivement les éoliennes en mer. En dehors de celles traitant de l'éolien en mer, les publications différencient peu les différents types d'énergie marine et sont très générales, hormis deux publications qui traitent plus précisément des énergies houlomotrice et marémotrice, mais là encore, sans rentrer dans le détail des impacts sur le paysage.

6.3.1. Acceptation sociale et usagers de la mer (tourisme, pêche, transport)

En dehors de l'acceptation sociale et de l'impact sur l'économie balnéaire, aucune publication ne traite d'un impact spécifique.

Comme pour les autres formes d'énergie, l'acceptation sociale est le champ le plus étudié. Comme pour les autres formes d'énergie, notamment l'éolien, les phénomènes de rejets sociaux face aux EnR marines (éolien en mer le plus souvent) font intervenir de nombreux facteurs « émotionnels » : âge, genre, classe sociale, orientation politique, intérêt pour l'environnement, niveau de confiance dans les institutions (Cass, et al., 2009). Une meilleure compréhension des facteurs conduirait à une meilleure prise en compte des oppositions dans le débat sur les politiques énergétiques, au niveau national, régional ou local. L'acceptabilité sera tout de même sans doute meilleure que pour l'éolien en mer pour des raisons d'absence de visibilité.

Les mesures compensatoires (notamment pour la pêche) permettent une meilleure acceptabilité du projet mais la réappropriation ne peut se faire que sur un temps long avec la modification des représentations que chacun associe au milieu marin (Oiry, 2015). La pêche est peut-être la thématique la plus importante en termes d'utilisation des espaces marins car les pêcheurs sont les plus concernés par l'évolution des zones de pêche s'il y a incompatibilité entre les projets et l'autorisation d'exploiter des navires. A noter aussi que le « lien » avec la mer (économie, culture, etc.) et donc le niveau d'acceptabilité des projets EMR est très variable selon les lieux d'implantation. La manière dont on montre les EMR (en particulier les éoliennes en mer) par les simulations (dans ou en dehors du contexte paysager) est également une stratégie d'acceptabilité. Du fait d'une moindre visibilité des EMR, l'acceptabilité des projets est donc plus une question de communication et de gestion de l'équilibre des usages qu'un véritable enjeu de réappropriation (notamment paysagère) du projet.

Comme pour les autres formes d'énergie, la concertation mise en place (liée à une obligation réglementaire) tient souvent plus de la consultation et de la négociation que d'une véritable concertation.

Par rapport aux autres usages, touristiques notamment, l'impact négatif est minoritaire, voire nul (Voke, et al., 2013). Cet impact est lié à une éventuelle visibilité mais l'appréciation de ces énergies est majoritairement positive. Les énergies sous-marines, non-visibles, sont logiquement préférées (Voke, et al., 2013). Ce type de résultats semble applicable au cas français, notamment par rapport à la visibilité. Les résultats sur les autres usages dépendent fortement du contexte, en particulier par rapport aux aspects patrimoniaux et touristiques, fortement présents en France.

⁸³ La biocénose est l'ensemble des êtres vivant évoluant dans un milieu donné, le biotope, et interagissant entre eux et avec le milieu. La biocénose et le biotope forment un écosystème.

⁸⁴ L'indice de Shannon permet d'exprimer la diversité des espèces du sol. Il prend en compte le nombre d'espèces et l'abondance des individus au sein de chacune de ces espèces. Cet indice dépend de la taille des échantillons et du type d'habitat étudié. Il permet en outre d'étudier les changements temporels de la diversité liés à l'augmentation ou la réduction d'une pollution (Pearson et Rosenberg, 1978)

Les impacts paysagers des EMR (identifiés dans l'étude bibliographique) sont assez faibles, notamment du fait d'une faible visibilité et de conflits d'usages territoriaux plutôt rares. L'enjeu de l'acceptabilité est par conséquent nettement moins marqué que pour d'autres formes d'EnR. Des exemples (comme l'usine marémotrice de la Rance) pourraient venir étayer des réflexions sur ces EMR (impacts significatifs au départ puis acceptation avec la mutualisation des usages avec le tourisme et le barrage qui sert aussi de route...).

6.3.2. Méthodes et outils d'évaluation

Les outils d'appréciation des impacts sont les mêmes (voir sections **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** et **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** en particulier) que pour l'éolien ou le photovoltaïque (carte de visibilité notamment) avec toutefois des limites notables liées à la faible visibilité de ces EMR. Dans le cas de projets précis, l'objectivation des impacts paysagers s'avère peu efficiente et devrait être abandonnée au profit des notions de valeurs paysagères, de co-production des projets et de processus ouverts, plus propices pour les projets de production décentralisée, l'enjeu paysager étant finalement celui d'une intégration de l'aménagement au lieu et auprès des usagers plutôt qu'une réduction parfois illusoire des impacts. Cette objectivation reste toutefois pertinente sur les aspects de planification régionale et de la gestion de potentiels conflits d'usage.

Les outils d'évaluation de l'acceptation sociale sont également similaires à l'éolien ou au photovoltaïque avec des méthodes économétriques (Méthode d'Evaluation Contingente, Méthodes des Coûts de Transport) visant à donner une valeur économique à un objet alors que celui-ci est difficilement quantifiable. Elles permettent par exemple de chiffrer un rapport coût-bénéfice ou un consentement à payer dans l'hypothèse d'un aménagement de production d'énergie renouvelable. Les perspectives concernent le perfectionnement de ces enquêtes sociologiques et économétriques pour mesurer l'acceptation des EMR et les retombées économiques (notamment sur le tourisme) (Boye, et al., 2013). Ces enjeux sont à mettre en balance avec des impacts plutôt faibles et une acceptabilité déjà assez bonne.

En dehors des éléments sur l'éolien en mer, les impacts paysagers des énergies marines renouvelables ne semblent pas encore faire partie des préoccupations sur les paysages. Les outils et méthodes sont par conséquent calqués sur ceux des autres EnR, avec les mêmes écueils, mais des limites à apporter du fait d'une faible visibilité et d'une acceptabilité sociale assez bonne. Si le paysage pourrait comme pour les autres EnR servir de support de participation dans le déroulement des projets, la faiblesse des impacts paysagers des EMR ne posent pas cette thématique comme prioritaire dans les recherches d'outils d'évaluation et de précision des impacts.

6.3.3. Focus sur le(s) guide(s) disponible(s)

Le guide le plus récent « *Étude méthodologique des impacts environnementaux et socio-économiques des énergies marines renouvelables* » (MEDDE, 2012) se place dans une approche très visuelle du paysage puisque les impacts sont abordés en fonction de l'implantation, de la taille, de la couleur, etc. des aménagements (éoliennes notamment). Le paysage sous-marin n'est pas vraiment abordé. Le guide reprend des études économétriques au Danemark ou en France (sur de l'éolien en mer) pour montrer que plus le parc est proche du rivage, plus les compensations et l'accompagnement doivent être forts. L'étude souligne également que les opinions négatives existant avant la construction le sont moins une fois le parc construit, les peurs (relatives à la baisse de fréquentation notamment) se révélant non fondées *a posteriori*, et ce d'autant moins pour les EMR hors éolien en mer. L'étude pointe l'intérêt d'étudier ces aspects (consentement à payer, etc.) dans le cadre de l'étude des impacts, mais comme pour le reste des impacts, cet aspect est à mettre en balance avec le faible niveau d'impacts relevé pour ces EMR et aux impacts plus significatifs des autres thématiques (biodiversité notamment).

6.4. Synthèse des impacts des énergies marines

La qualification des impacts des énergies marines (hors éolien en mer) sur la biodiversité, les fonds marins et les littoraux ainsi que les paysages est synthétisée ici, ainsi que les méthodologies

d'évaluation rencontrées et le niveau de différenciation des impacts entre technologies et étapes du cycle de vie des infrastructures.

En ce qui concerne la qualification des impacts sur la biodiversité, la littérature est relativement riche mais basée sur des retours d'expérience d'installations de taille modeste (démonstrateurs ou fermes pilotes), en-dehors du marémoteur estuarien qui seul existe à l'échelle commerciale. Les études sur l'altération/modification des habitats (ex : rôle de support des installations pour les espèces benthiques, « récifs artificiels »), le dérangement et la mortalité des individus ainsi que la modification de paramètres environnementaux comme les champs électromagnétiques sont multiples. Bien que des similitudes puissent être trouvées entre les EMR et l'éolien en mer (notamment flottant), de nombreux impacts diffèrent fortement de ceux identifiés pour l'éolien en mer. Entre autres, et de façon non exhaustive : des bruits sous-marins généralement moins forts lors de la construction (variables selon les techniques utilisées), risques de collision sous-marine pour les espèces de mégafaune supérieures pour les hydroliennes, risques de collision pour les oiseaux et les chiroptères inexistant pour les EMR immergées au contraire de l'éolien en mer.

Dans le cas des « sols », les impacts avérés les plus étudiés sont l'emprise « au sol » (domaine maritime essentiellement et peu sol terrestre), le changement morphologique des fonds ainsi que des perturbations hydro-sédimentaires. La pollution chimique potentielle des fonds marins générée par les systèmes de protection des structures en mer reste peu étudiée. A noter que les typologies des fonds marins où sont implantées les EMR sont principalement des sédiments de boue, argile, sable ou graviers.

En ce qui concerne les paysages, aucune publication ne traite d'un impact spécifique en dehors de l'acceptation sociale et de l'impact sur l'économie balnéaire ou la pêche. Les enjeux dans le cas des EMR (hors éolien en mer) sont plus faibles du fait d'une moindre visibilité qui participe à la meilleure acceptation et appropriation de ces énergies. A noter que les enjeux dans le cas des EMR hors éolien en mer sont plus faibles du fait d'une moindre visibilité, qui participe à une meilleure acceptation et appropriation de ces énergies.

A noter que certains impacts peuvent avoir une portée de plusieurs kilomètres, notamment ceux liés aux perturbations hydro-sédimentaires ; leur ampleur reste cependant négligeable au regard d'autres activités touchant les fonds marins (exploitations minières des fonds marins, etc.).

En termes de méthodes d'évaluation des impacts sur la biodiversité, il n'existe pas à ce jour de méthode faisant pleinement consensus pour évaluer les différents types d'impacts engendrés par les installations EMR sur les écosystèmes marins. Toutefois, plusieurs guides thématiques (MEDDE, 2012; FEM, 2013) fournissent des cadres méthodologiques et recommandations en France. Par ailleurs, des retours d'expérience à l'étranger permettent de se baser sur des bilans de suivis. Il est relativement difficile de réaliser des suivis réguliers et suffisamment précis des activités de la faune marine au niveau des zones de développement des projets d'EMR, d'où le recours à des modèles d'évaluation des risques voire à des tests en laboratoire.

En ce qui concerne les sols et les sédiments, les mêmes méthodes que pour l'éolien en mer sont utilisées, c'est-à-dire des mesures sur site et des estimations. Il est à noter que certains impacts ne sont pas évalués ; c'est par exemple le cas de la pollution chimique potentielle sur les fonds marins, générée par différentes structures EMR.

Concernant les impacts sur les paysages, les outils utilisés sont similaires à ceux employés pour l'éolien (notamment carte de visibilité). Comme déjà mentionné, les approches visuelles ne permettent pas de décrire complètement ni de minimiser les impacts paysagers. Aussi, cette visibilité est beaucoup plus faible pour les EMR, limitant la portée de ces outils. Les outils d'évaluation de l'acceptation sociale sont également similaires à l'éolien ou au photovoltaïque avec des méthodes économétriques (Méthode d'Evaluation Contingente, Méthodes des Coûts de Transport) visant à donner une valeur économique à un objet alors que celui-ci est difficilement quantifiable. Les impacts paysagers des EMR, hors éolien en mer ne semblent pas encore faire partie des préoccupations sur les paysages. Les outils et méthodes sont par conséquent calqués sur ceux des autres EnR et comportent les mêmes limites.

La comparaison entre les différentes technologies est peu traitée dans les publications, et s'explique par la grande diversité de systèmes de production d'énergie et d'installations sur les fonds marins ainsi que par le caractère novateur de nombreuses technologies (en développement ou en phase de prototype et test pré-industriel). De plus, les impacts varient fortement d'un projet à un autre, et ce même pour une technologie donnée. Dans le cas des impacts sur les sédiments, la littérature fait cependant

état, sans les évaluer, des impacts différenciés selon les systèmes de supports aux fonds marins (forage, lestage, ancrage).

Enfin, en ce qui concerne les **impacts des différentes étapes du cycle de vie**, les phases d'installation et d'exploitation sont particulièrement traitées dans le cas des impacts identifiés comme à plus forts enjeux, comme l'altération des habitats au niveau des fonds marins (installation), ainsi que le dérangement et la mortalité d'individus (exploitation).

7. Impacts de l'hydroélectricité

Ce chapitre présente une synthèse des impacts de l'hydroélectricité sur la biodiversité, les sols, les sédiments et les paysages identifiés lors de l'analyse bibliographique. Une attention particulière a été portée à la prise en compte du contexte géographique, temporel et institutionnel. Les résultats qualitatifs et quantitatifs sont mis en avant autant que possible, et les points de divergence et de convergence entre publications sont identifiés.

Les centrales hydroélectriques utilisent la force hydraulique pour produire de l'électricité. Le passage de l'eau entraîne une turbine reliée à un générateur électrique qui transforme l'énergie mécanique de l'eau en énergie électrique. L'électricité produite est ensuite livrée au réseau électrique sur les lignes à basse ou haute tension. La puissance potentielle d'un site est évaluée en fonction de deux facteurs : sa hauteur de chute (en m) et son débit (en m³/s).

Les technologies hydroélectriques diffèrent en fonction de l'utilisation de la quantité d'eau stockée ou non en amont du barrage ⁸⁵ :

- Les **centrales au « fil de l'eau »** turbinent tout le débit d'un cours d'eau - ou une partie de celui-ci - sans retenir l'eau. Une partie du débit du cours d'eau peut être déviée vers la centrale hydroélectrique au moyen d'un canal de dérivation ou d'une conduite forcée pour ensuite rejoindre le cours d'eau. Ces centrales permettent de produire de l'électricité en continu.
 - Les **centrales de haute chute** se trouvent en région montagneuse. Elles utilisent un faible débit d'eau avec un dénivelé important (supérieur à 30 m entre la prise d'eau et la centrale hydroélectrique) pour produire de l'électricité. L'eau est acheminée jusqu'à la centrale par le biais d'une conduite forcée puis elle rejoint le cours d'eau.
 - Les **centrales de basse chute** se situent principalement dans les plaines. Elles exploitent un débit important d'eau avec un dénivelé plus faible (inférieur à 30 m). L'eau est acheminée à la centrale via un canal d'amenée et rejoint la rivière par un canal de restitution.

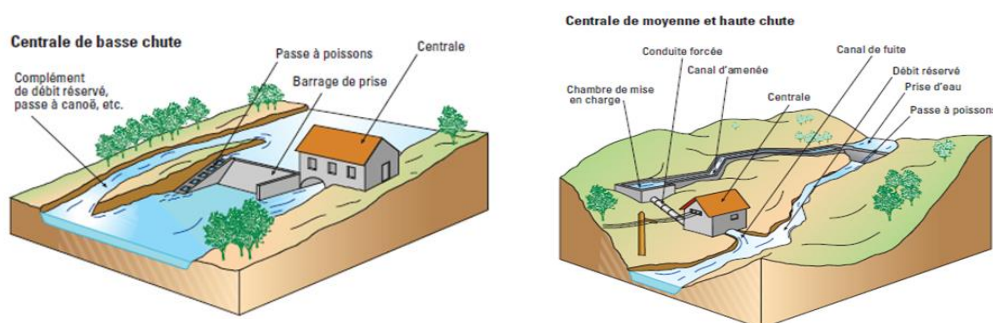


Figure 7 : Schémas des centrales au fil de l'eau : centrale de basse chute (gauche) et centrale de moyenne et haute chute (droite) (Guide pour le montage de projets de petite hydroélectricité, ADEME)

- Les **centrales de lac**⁸⁶ et de type « **écluées** »⁸⁷ sont dotées de barrages permettant de retenir et de stocker des volumes d'eau plus ou moins importants. Les installations de types écluées disposent d'une petite capacité de stockage contrairement aux centrales de lac qui elles disposent de grands barrages avec des retenues d'eau importantes. Ces réservoirs permettent de produire une grande quantité d'électricité en quelques secondes dès que l'eau est libérée, pour ensuite rejoindre le cours d'eau. Ces centrales permettent de stocker de l'énergie utilisable pendant les périodes de forte consommation d'électricité (début et fin de journée).

⁸⁵ Découverte de la petite hydroélectricité, france-hydro-electricité.fr

⁸⁶ Ces centrales sont surtout installées en haute montagne. Elles sont basées sur des débits faibles et un dénivelé important (chute supérieure à 300 m). Les réservoirs ont une durée de remplissage supérieure à 400 heures.

⁸⁷ Ces centrales sont généralement installées en moyenne montagne. Elles sont basées sur des retenues de courte durée (moins de 400 heures),

- Les **STEP (Stations de Transfert d'Énergie par Pompage-Turbinage)**⁸⁸ permettent le stockage de l'énergie : elles convertissent l'énergie électrique en énergie hydraulique en stockant de l'eau en altitude. Le fonctionnement de ces installations est basé sur le pompage de l'eau d'un réservoir bas vers un réservoir haut pendant les périodes de moindre consommation d'électricité, pour turbiner l'eau ainsi stockée afin de produire de l'électricité pendant les pics de consommation (voir Figure 8).

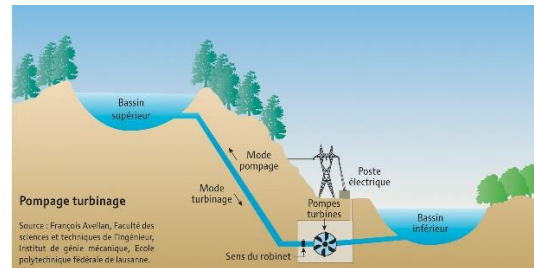


Figure 8 : Schéma d'une STEP (lampiris.be)⁸⁹

L'hydroélectricité est la source de production d'électricité renouvelable la plus importante, en termes de puissance produite, en France et dans le monde. Il s'agit d'une technologie dont le déploiement à grande échelle est nettement plus ancien que celui des autres énergies renouvelables (à l'exception de la biomasse, non traitée dans le cadre de cette étude). En effet, la plupart des grandes installations hydroélectriques en France datent du XX^{ème} siècle (notamment entre 1930 et 1970 pour les centrales à réservoir).

La France est le second pays producteur d'énergie hydroélectrique en Europe après la Norvège. L'hydroélectricité représente, en France, en moyenne 10 à 12 % de la production totale d'électricité et environ 52 % du parc renouvelable en France au 31 mars 2018 (RTE, 2018). Le parc hydroélectrique français compte plus de 2 500 installations, dont plus de 90 % sont des centrales au fil de l'eau, avec une grande majorité de petites centrales hydroélectriques. En termes de puissance, en France les installations au fil de l'eau représentent environ 26 % de la puissance totale générées par les installations hydroélectriques⁹⁰, tandis que les centrales de type éclusées, de lac et les STEP en représentent respectivement les 16 %, 40 % et 18 % restant.

La puissance totale des installations hydroélectriques est estimée à 25,5 GW en France continentale fin 2017⁹¹. Contrairement aux autres énergies renouvelables, notamment l'éolien ou le solaire, les capacités de production d'électricité à partir des centrales hydrauliques progressent peu en France, même si des capacités liées à de nouvelles installations ont été identifiées par l'Etat (MEFI, 2006). En 2013, une étude estimait à un peu moins de 3 000 MW le potentiel d'installation de nouveaux ouvrages et à environ 500 MW le potentiel sur des seuils existants et aménageables (MEDDE, 2013).

Ces orientations ont notamment été reprises par la Programmation Pluriannuelle de l'Energie (PPE). Plusieurs appels à projets ont vu le jour dans ce cadre depuis 2016, incitant notamment les acteurs du secteur à proposer des projets de nouvelles centrales ou d'équipements d'ouvrages existants. Certains projets, lauréats du premier appel ministériel, se positionnent notamment sur l'équipement d'ouvrages de navigation propriété de Voie Navigable de France (VNF)⁹².

La filière de l'hydrolien continental, encore confidentielle, est actuellement en développement en France. Plusieurs entreprises développent des prototypes de turbines. Actuellement, deux sites-test existent en France : l'un sur la Loire à Orléans (projet Hydrofluv) et l'autre sur la Garonne à Bordeaux (projet Seemeoh). Un projet d'hydroliennes sur la Vienne a également été mené. Un premier projet

⁸⁸ Les STEP sont des installations hydroélectriques qui associent un bassin inférieur et une retenue en altitude. La retenue est alimentée par pompage, depuis le bassin inférieur, lors de périodes de faible demande énergétique. La retenue est exploitée par turbinage, en période de forte demande en énergie. Les STEP ne sont pas considérées comme productrices d'énergie de source renouvelable.

⁸⁹ https://www.lampiris.be/sites/lampiris.be/files/schema_pompage-turbinae-1.jpg

⁹⁰ Ces centrales sont installées sur le cours de fleuves ou grandes rivières, et sont caractérisées par un dénivelé faible et des débits importants. Il n'y a pas de retenue d'eau ou alors de très faible dimension (durée de remplissage inférieure à 2 heures).

Source : <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/hydroelectricite>

⁹¹ France Hydro Electricité (<http://www.france-hydro-electricite.fr/energie-hydraulique/chiffres-cles>), d'après le Panorama des énergies renouvelables au 30 septembre 2017

⁹² Listes des lauréats du premier appel d'offres pour le développement de la petite hydroélectricité.

(celui de Génissiat dans l'Ain) devrait voir le jour en 2019, avec l'installation sur le Rhône de 39 machines de la société Hydroquest pour une puissance installée de 2 MW.

7.1. Impacts de l'hydroélectricité sur la biodiversité

En raison d'un historique de déploiement plus ancien et large que pour les autres EnR, les impacts sur la biodiversité de l'énergie hydroélectrique ont été très largement étudiés (Gasparatos, et al., 2017), et font encore l'objet d'une attention très importante à l'échelle mondiale. Quelques milliers de documents traitant des liens entre biodiversité et installations hydroélectriques pourraient certainement être compilés.

Dans le cadre de la présente étude, plus de 200 publications ont été identifiées dans le cadre de la recherche bibliographique, et une trentaine a été analysée en détail. La majorité des publications et documents étudiés traitent des grandes installations hydroélectriques avec barrages ou réservoirs.

En France, comme dans d'autres pays où le développement de l'hydroélectricité est ancien comme en Norvège (May, et al., 2012), les enjeux de développement relèvent d'une amélioration de la situation des centrales existantes, dans l'objectif de reconquête de la qualité des eaux et des milieux aquatiques ainsi que de cohabitation avec les autres usages de l'eau (irrigation, alimentation en eau potable, activités de loisirs...)(voir notamment (Guerber, et al., 2017). Une « Convention d'engagements pour le développement d'une hydroélectricité durable en cohérence avec la restauration des milieux aquatiques suite au Grenelle Environnement » a été signée en 2010 (MEEDDM, 2010) ; elle s'attache à la reconquête de la qualité physique des fleuves et rivières et propose également des engagements pour le développement d'une hydroélectricité en cohérence avec la restauration des milieux aquatiques.

Les principaux types d'impacts sur la biodiversité liés à l'hydroélectricité sont :

- Des impacts d'emprise liés à l'ampleur du chantier et ses méthodes de construction ;
- Des impacts de modification des milieux, notamment par création de réservoirs ou de rupture des continuités écologiques ;
- Des impacts de modification des paramètres environnementaux : température, composition physico-chimique, etc. ;
- Des impacts sur le fonctionnement des écosystèmes après aménagement de barrage et retenues, avec des effets de marnage des retenues ainsi que des lâchers d'eau pouvant être ponctuellement puissants en aval des barrages ;
- Des impacts de destruction directe d'individus (poissons principalement).

L'ampleur de ces impacts dépendent de la localisation du site, des enjeux naturels présents et du climat (tempéré ou tropical) et des aménagements d'atténuation mis en place (notamment pour la montaison et la dévalaison piscicole).

Tout nouveau projet ou aménagement d'ouvrage existant est soumis à l'article L.511-1 du code de l'énergie⁹³ et du code de l'environnement autorisation IOTA et/ ou ICPE en fonction des caractéristiques du projet. Les guides de rédaction de ces études réglementaires et notamment d'évaluation des impacts sont peu nombreux. On peut citer notamment : *Démarches administratives, techniques et intégration des enjeux de continuité écologique*, Ademe, 2017.

Malgré l'ancienneté du déploiement de l'hydroélectricité, des questions restent aujourd'hui en suspens concernant l'évaluation de certains impacts : notamment les mortalités réelles induites par les différents types de turbines, l'impact réel des chaînes d'ouvrages même équipés de dispositifs de franchissement piscicole et la problématique sédimentaire.

7.1.1. Destruction / altération des habitats par emprise directe ou ennoisement

Le type d'installation hydroélectrique influence fortement les impacts induits sur la biodiversité.

Une attention très importante est portée dans la littérature aux impacts environnementaux des grandes centrales hydroélectriques avec réservoirs, notamment lors de la phase de construction.

⁹³ « nul ne peut disposer de l'énergie des marées, des lacs et des cours d'eau [...] sans une concession ou une autorisation de l'Etat. »

Les impacts liés à l'exploitation et l'utilisation des composants nécessaires à la construction de barrage, par exemple, sont peu abordés. Le cas de l'exploitation du sable (largement utilisé dans le domaine de la construction, non spécifique à l'hydroélectricité) est abordé dans une publication récente de l'OREE au regard des besoins importants pour la construction des grandes centrales (Trommetter, 2017).

Grande hydroélectricité avec réservoirs

Les grandes centrales hydroélectriques avec réservoirs (centrales à lac) engendrent des bouleversements importants des milieux dans lesquels elles sont implantées. Leur emprise peut être très importante (quelques km² à plusieurs dizaines voire centaines de km²). En France, la majorité des lacs de retenue couvrent moins de 10 km², le plus grand barrage étant celui du Petit Saut, en Guyane (310 km²).

Lors des travaux, les voies de passage des engins de chantier, les travaux de construction, de recalibrage peuvent directement détruire des habitats. Comme tous les travaux de construction, des risques d'altération des milieux favorisant le développement d'espèces invasives sont à prendre en compte.

Les centrales hydroélectriques et les barrages peuvent inonder de vastes zones situées en amont, engendrant des pertes directes de milieux par destruction (immersion), des modifications des habitats riverains non immergés ainsi que la fragmentation des territoires (Benchimol, et al., 2015; Gasparatos, et al., 2017). Les habitats impactés peuvent être de nature très variée : forêts, milieux humides, milieux ouverts. La mise en eau des réservoirs engendre des impacts immédiats et de forte intensité. L'enneigement en amont des ouvrages entraîne des modifications drastiques du milieu (milieux lenticques (eaux stagnantes)⁹⁴ moins oxygénés, envasement, eutrophisation des eaux, développement algal, etc.), engendrant des modifications importantes des cortèges d'espèces (Hitchman, et al., 2018). En aval, des modifications des milieux rivulaires sont également engendrées mais peuvent être en partie limitées par le maintien d'un débit minimum biologique.

L'attention de la communauté scientifique ainsi que des organismes de contrôle et de financement (via l'application des standards internationaux tels que le PS6 de l'IFC (ifc.org)) est actuellement fortement orientée vers les projets de grandes centrales hydroélectriques en Amérique du Sud (Finer, et al., 2012; Lees, et al., 2016; Winemiller, et al., 2016; Benchimol, et al., 2015; Fearnside, 2016; World Bank, 2018), en Afrique tropicale en Asie (Ziv, et al., 2012; Pandit, et al., 2012; Winemiller, et al., 2016; Gasparatos, et al., 2017; World Bank, 2018) ou encore en Europe centrale. Différentes études suggèrent que le développement de l'énergie hydroélectrique est une menace potentiellement forte pour la diversité biologique dans certains pays qui accueillent des écosystèmes uniques et riches en biodiversité comme l'Amazonie (Gracey, et al., 2016; Gasparatos, et al., 2017). La sélection des sites d'installation a une influence fondamentale sur les impacts sur la biodiversité lors de la création de nouveaux barrages hydroélectriques : les caractéristiques des aménagements doivent être croisées avec les enjeux locaux de biodiversité pour anticiper les impacts potentiels (Winemiller, et al., 2016; Gracey, et al., 2016; Lees, et al., 2016).

La situation est différente en France, puisque le développement des grandes centrales hydroélectriques avec barrage date majoritairement d'il y a plusieurs dizaines d'années et qu'il n'y a plus de grands projets de barrages (déjà existants). Ce sont principalement les écosystèmes montagnards qui sont concernés par les centrales à grands réservoirs. Il existe néanmoins d'autres grandes régions hydroélectriques, possédant des unités à grande retenue : Dordogne, Creuse, Vienne, Bretagne, etc. Une étude spécifique sur les énergies renouvelables et montagnes a été publiée en 2013 par l'UICN (UICN France, 2013) ; l'hydroélectricité y est traitée en détail.

La littérature recommande une étude attentive des zones situées en amont et qui seront susceptibles d'être ennoyées par la réalisation d'un barrage : il s'agit d'évaluer les pertes de zones remarquables (zones humides, frayères, zones d'alimentation d'espèces protégées, etc.) (Souchon, et al., 2011). Les modifications hydrométriques en aval peuvent aussi également fortement perturber les écosystèmes (modification des débits engendrant des évolutions fortes des structures végétales des berges en aval de l'ouvrage et les populations d'espèces animales). Dans les zones de marnage, la végétation est généralement absente.

⁹⁴ Correspond à des milieux aquatiques stagnant ou à très faible vitesse d'écoulement, par opposition aux milieux lotiques, courants

Au-delà de la destruction des milieux originellement présents lors de la mise en eau, les réservoirs artificiels peuvent s'avérer à moyen terme intéressants pour certains groupes biologiques. En effet, bien que des modifications profondes des conditions du milieu engendrent souvent un changement important des cortèges d'espèces présents, plusieurs auteurs soulèvent les intérêts potentiels des zones de réservoirs et de zones annexes à ces retenues pour des peuplements de macro-invertébrés, macrophytes, amphibiens ou certains oiseaux (Dodemaide, et al., 2018; Bubíková, et al., 2018; Hill, et al., 2018; Chester, et al., 2013).

Petite hydroélectricité et centrales au fil de l'eau

Sont regroupées ici plusieurs types de centrales : les petites centrales alpines avec prise d'eau tyrolienne⁹⁵ (sans retenue ou limitée) et les centrales de basse chute au fil de l'eau.

Les premières concernent des impacts d'emprise réduits mais affectant aussi bien les écosystèmes aquatiques (voir section 7.1.2), que terrestres. En effet, le trajet des conduites forcées de transmission de l'eau du seuil de prise d'eau à la centrale de production doit faire l'objet d'une étude de variantes comprenant entre autres la considération des enjeux faune, flore et paysage.

Les centrales de basse chute se servent, quant à elle, du débit de l'eau plus que la hauteur de chute pour actionner leurs turbines. Néanmoins, la plupart des ouvrages possèdent des retenues qui peuvent, bien que moins importantes en surface, être assez longues (remous).

La construction des centrales au fil de l'eau nécessite cependant des travaux dans le lit mineur des cours d'eau, avec des destructions et altérations sur le fonds et les berges localisées au niveau de l'installation ainsi qu'aux abords des installations. L'ampleur des impacts est très variable selon les situations et les caractéristiques des installations ; un nombre non négligeable de centrales au fil de l'eau s'installe par ailleurs sur des aménagements déjà existants (barrages mais également ancien moulin ou autre), ce qui peut limiter les impacts des travaux d'implantation et parfois même réduire ces impacts lorsque, par exemple, des aménagements piscicoles sont mis en place sur un barrage existant qui en était dépourvu. La construction de l'usine ainsi que les réseaux électriques peuvent engendrer des impacts sur les habitats naturels (tranchées linéaires), variables selon les milieux et la longueur de ces réseaux. Les impacts des centrales au fil de l'eau sont moins bien documentés dans la littérature scientifique, et souvent évalués par comparaison avec les centrales avec retenue d'eau, bien que des publications spécifiques récentes fournissent des synthèses sur les principaux impacts environnementaux de ce type d'ouvrages hydroélectriques (Anderson, 2015; Lange, et al., 2018).

En termes d'emprises et de changement de nature des milieux, il est généralement considéré que plusieurs installations hydroélectriques de petite taille ont un impact cumulé inférieur à celui d'un nombre réduit d'installations plus grandes (Koutsoyiannis, 2011, cité dans Gasparatos, et al. (2017)).

Les impacts directs de destruction et d'altération de milieux dans le cadre des projets hydroélectriques constituent un aspect particulièrement bien documenté pour les centrales avec retenue (impacts d'emprise), et faisant l'objet d'une attention forte de la communauté scientifique internationale dans des zones au fort potentiel de développement. La création de centrales hydrauliques avec réservoirs ou à éclusées engendrent des modifications fortes en amont (ennoisement de vallée). Les installations de petite hydroélectricité font l'objet de données plus parcellaires au sein de la littérature scientifique traitée, mais ces impacts demeurent largement abordés pour tout nouveau projet (demande d'autorisation au titre de la loi sur l'eau).

7.1.2. Rupture de la continuité écologique

La prise en considération des impacts sur les continuités écologiques constitue l'un des principaux sujets concernant hydroélectricité et biodiversité en France (voir notamment Guerber, et al. (2017)) mais également ailleurs dans le monde (Chen, et al., 2016; Gasparatos, et al., 2017).

Des études récentes indiquent que les phénomènes de fragmentation pourraient constituer un des principaux facteurs de déclin de la biodiversité des milieux aquatiques d'eau douce, bien que de

⁹⁵ Également nommée « Prise inversée » : l'eau est captée par en-dessous, en tombant à travers des installations en béton ou en métal placées dans le lit de la rivière et qui présentent des trous ou ouvertures

nombreuses difficultés soient associées à cet exercice de comparaison (Gracey, et al., 2016). Deux compartiments sont concernés :

- Le compartiment biologique notamment piscicole : l'ouvrage stoppant les migrations des poissons migrateurs (montaison et dévalaison) et arrêtant les échanges populationnels à l'échelle du cours d'eau (espèces sédentaires ou migrateurs partiels). Les déplacements d'autres groupes biologiques peuvent être perturbés (crustacés, invertébrés aquatiques) ;
- Le compartiment sédimentaire : l'ouvrage stoppant les flux sédimentaires et notamment l'apport des secteurs amont.

Impacts sur le compartiment biologique

Des impacts sur le compartiment piscicole peuvent concerner tous les types d'ouvrages, y compris des ouvrages de petite hydroélectricité.

Les **barrages et grandes retenues** créent une barrière pour les poissons migrateurs ou d'autres espèces aquatiques ; cependant, cette problématique est dorénavant largement prise en compte via la mise en place d'aménagements de rétablissement de la continuité piscicole (type passes à poissons) au niveau des centrales hydroélectriques. La continuité pour la faune aquatique ne peut pas totalement être rétablie par des ouvrages de franchissement, mais les démarches nombreuses en ce sens amènent à la mise en œuvre de solutions techniques performantes (installation de passes à poissons multi espèces, dévalaisons possibles par le barrage, la centrale ou les exutoires).

Les ouvrages transversaux de dimension importante entraînent en effet une barrière aux échanges de nombreuses espèces, qu'il s'agit de poissons migrateurs (exemple du saumon), poissons résidents (Truite fario) mais également certaines espèces de macro-invertébrés benthiques, d'insectes ou de mammifères semi-aquatiques (perturbation de l'utilisation des cours d'eau et des dynamiques de colonisation) (Souchon, et al., 2011; Gracey, et al., 2016; Gasparatos, et al., 2017; Sagnes, 2018). Les poissons migrateurs et salmonidés sont, de loin, les groupes d'espèces faisant l'objet de la plus forte attention concernant les perturbations engendrées par la présence d'ouvrages transversaux (rupture ou gêne des échanges amont / aval) (Lees, et al., 2016; Gracey, et al., 2016; Gasparatos, et al., 2017; Fahrner, 2011; Jouanin, et al., 2012). Des recommandations nombreuses existent sur ces aspects de continuité piscicole (dévalaison et montaison) (Baran, et al., 2012). La fragmentation perturbant les échanges populationnels peut appauvrir la diversité génétique des populations ainsi fragmentées. L'indice poisson DCE peut traduire ces modifications des conditions des milieux par l'étude des cortèges d'espèces piscicoles.

En parallèle, la présence du réservoir créé une barrière très importante pour les déplacements de nombreuses espèces animales terrestres. L'ouvrage et le réservoir engendrent donc des fragmentations importantes des milieux au sein desquels ils sont implantés.

Les possibilités de déplacement des espèces sont fortement réduites en raison des obstacles à l'écoulement, plus ou moins franchissables selon les situations, et de la segmentation du cours d'eau induite par la succession d'obstacles. L'installation d'ouvrages permettant de rétablir des capacités de passage (montaison et dévalaison) au niveau des ouvrages hydroélectriques (et, plus largement, de tout type d'ouvrage hydraulique transversal) constitue une démarche prioritaire depuis plus de 15 ans en France.

Les **centrales au fil de l'eau et la petite hydroélectricité** peuvent également engendrer des perturbations des déplacements et altérations des activités des poissons et d'autres organismes aquatiques. En effet, si les frayères à grands migrateurs sont souvent situées sur les parties amont des bassins-versants, un ouvrage en plaine, peut constituer le premier verrou pour des poissons. La nature et l'intensité des impacts des petites centrales peuvent être très variables (Anderson, 2015).

Si les impacts perceptibles à l'échelle d'une petite installation hydroélectrique sont intrinsèquement plus faibles que des grands ouvrages, mais parfois significatifs (y compris pour des seuils) (Anderson, 2015), les caractéristiques particulières de ces installations nécessitent une approche à l'échelle du cours d'eau (chaîne d'ouvrages) voire du bassin versant (Anderson, 2015; UICN France, 2013; Lange, et al., 2018). Certains auteurs considèrent que les impacts cumulés de nombreuses petites installations pourraient être plus importants, sur le plan fonctionnel (continuité piscicole), que ceux d'une seule grande installation (Bakken, et al., 2014; Bakken, et al., 2012). Les impacts cumulatifs de fragmentation

d'un ensemble de petits ouvrages à l'échelle de bassins versants ont fait l'objet de rares études, principalement ciblées quelques poissons (notamment les salmonidés et l'Anguille) (Lange, et al., 2018) ; selon une étude de synthèse récente, il est en l'état des connaissances particulièrement complexe de bien appréhender les impacts cumulés d'un ensemble de petits ouvrages sur la qualité fonctionnelle des milieux et sur l'état des populations (état de conservation, viabilité génétique à moyen terme) (Lange, et al., 2018).

Le classement actuel des cours d'eau (L214-17 du Code de l'environnement), a permis de prendre en compte cette sensibilité et définir les règles suivantes :

- Un premier arrêté établit la liste 1 des cours d'eau sur lesquels la construction de tout nouvel ouvrage faisant obstacle à la continuité écologique est interdite ;
- Un second arrêté établit la liste 2 des cours d'eau sur lesquels il convient d'assurer ou de rétablir la libre circulation des poissons migrateurs et le transit des sédiments, dans les 5 ans qui suivent la publication de la liste des cours d'eau.

Des solutions sont aujourd'hui développées afin de répondre aux exigences réglementaires liées à la continuité écologique pour les ouvrages hydroélectriques existants ou en projet : passes à poissons, gestion des vannages, rivière de contournement, passe de dégrèvement. Outre l'adéquation de ces systèmes aux espèces ciblées (par exemple : rampe de reptation pour l'Anguille), un entretien régulier est nécessaire au maintien de leur efficacité à moyen et long terme.

Impacts sur le compartiment sédimentaire

Les impacts sur le transit sédimentaire entraînent des changements encore plus drastiques. En bloquant le transport solide d'un cours d'eau, un ouvrage peut entraîner de l'érosion progressive (en aval) dans une rivière, favorisant l'accélération des vitesses d'écoulement et ainsi l'approfondissement du lit mineur ou l'attaque des berges. Les milieux aquatiques s'en trouvent changer et le substrat existant est utilisé par le cours d'eau pour combler les manques, entraînant la création de fosse et l'apparition de la roche mère.

Les impacts sur le compartiment sédimentaire sont classiquement forts pour les grands barrages et retenues. Ils sont très variables pour l'hydroélectricité au fil de l'eau, en fonction de la nature des ouvrages et en fonction du type de cours d'eau (montagne, plaine...). Ces petits ouvrages engendrent également des modifications sur le plan sédimentaire, avec un accroissement de la stabilité sédimentaire, des dépôts plus importants de particules fines (pouvant contribuer au colmatage du lit du cours d'eau) (Anderson, 2015; Lange, et al., 2018).

Comme pour les poissons, des aménagements et des modes de gestions spécifiques sont mis en œuvre pour limiter le blocage des sédiments par les barrages. Des vannes de dégravage sont installées proches des barrages et ouvertes régulièrement lors des périodes propices (crues, hors période de reproduction piscicole...) pour faire transiter les sédiments à l'aval de l'ouvrage. Cela fait partie des obligations réglementaires pour rétablir la continuité.

Les vidanges des grands réservoirs pratiquées pour limiter l'accumulation de sédiments engendre des impacts ponctuels sur l'hydrodynamisme en partie aval des réservoirs, avec baisse temporaire du taux d'oxygène, apports de particules fines.

La perturbation du fonctionnement normal des cours d'eau est intrinsèquement liée à la présence et à l'exploitation d'un ouvrage hydraulique. Les effets sont plus directement perceptibles pour les grands ouvrages hydroélectriques avec réservoirs avec deux conséquences principales : des modifications du compartiment sédimentaire (blocage ou altération des échanges sédimentaires, dépôts...) et une altération de la fonctionnalité biologique (gêne voire rupture des échanges amont/aval pour la faune aquatique, perturbation des déplacements transversaux de la faune terrestre au niveau des grandes retenues). Bien que très largement mis en avant, ces phénomènes restent complexes à étudier.

Le rétablissement de fonctionnement peu ou pas altéré, notamment pour la migration des poissons, est techniquement plus simple sur les centrales de petite hydroélectricité (mise en place d'ouvrage de franchissement) que sur ces centrales à retenue (aménagements de dimension imposantes).

7.1.3. Modifications des paramètres environnementaux

Les principaux effets des centrales hydroélectriques sur les paramètres environnementaux concernent le régime de l'eau, la qualité physico-chimique et biologique de l'eau, les modifications du transport solide (Gasparatos, et al., 2017; Gracey, et al., 2016; Souchon, et al., 2011; Fahrner, 2011).

Les barrages et les seuils en rivières sont des infrastructures qui, par leur présence, modifient les flux liquides, les flux solides, les flux de matières et d'organismes et le régime thermique des cours d'eau sur lesquels ils sont implantés (Souchon, et al., 2011). Ces changements impliquent des altérations des fonctions et services écosystémiques associés aux cours d'eau (régulation des flux sédimentaires, hydriques, organiques, régulation thermique, dépollution, biodiversité, équilibres dynamiques des zones aval fluviales et côtières, etc.) (Souchon, et al., 2011). Les altérations et transformations observées sont dépendantes de l'intensité des perturbations des cycles hydro-sédimentaires et thermiques, de l'effet barrière et des caractéristiques des ouvrages (Souchon, et al., 2011).

Par ailleurs, les centrales hydroélectriques induisent d'autres effets sur le milieu tels que la disparition de la couverture végétale suite à la mise en eau du réservoir, ou encore l'accumulation de matière organique dans le sol associée à un moindre renouvellement des eaux au niveau du réservoir (Thórhallsdóttir, 2007). A l'échelle du réservoir, ces perturbations peuvent générer des émissions de méthane et de dioxyde de carbone, en fonction de la situation géographique, des caractéristiques du réservoir (profondeur et taille), des conditions climatiques et du type d'écosystème (Siddiqui, et al., 2017). Les émissions de gaz à effet de serre (CO₂ et méthane notamment) sont considérées comme faibles en phase d'exploitation, bien que la décomposition de matière dans les très grandes retenues et l'eutrophisation puissent engendrer des émissions de certains gaz, entre autres du méthane (Gasparatos, et al., 2017). La retenue du barrage de Petit saut, Guyane, a été particulièrement étudiée en termes de rejets gazeux, pour le CO₂ et le méthane, avec des émissions de gaz à effet de serre jugées significatives sur une période de 10 ans après construction du barrage (dégradation de l'importante biomasse immergée et de la matière organique des sols ennoyés) (Guérin, 2006; Félix-Faure, et al., 2017), ce qui a conduit à la mise en place en aval du barrage de dispositifs de réoxygénation de l'eau. Ces émissions de gaz semblent très variables selon les barrages, les conditions environnementales et la biomasse immergée. Ainsi, dans les régions équatoriales et tropicales comme au Brésil, représentatives de certains territoires outre-mer français, la décomposition de la matière organique (en conditions anaérobies) dans le fond du réservoir de barrages hydroélectriques peut générer l'émission de méthane dans l'atmosphère (Berchin, et al., 2015). Du méthane a ainsi été produit au niveau des sédiments dans le réservoir de Petit Saut en Guyane pendant environ 3 ans après sa mise en eau.⁹⁶ A noter que ces résultats sur les émissions de méthane ne sont pas généralisables en l'état au territoire français métropolitain, en raison, entre autres, de différences climatiques (Péguin, et al., 2013) et de conditions spécifiques aux sites.

D'autres impacts ont été identifiés, comme la réduction de la teneur en oxygène et la stratification de la température dans les réservoirs. Cela peut induire une réduction *a priori* négligeable de la qualité de l'eau du fait de la présence d'installations hydroélectriques. Des techniques d'aération artificielle par déstratification (injection d'air à travers un diffuseur) ou aération hypolimnétique (introduction d'oxygène dans la couche thermique la plus profonde du réservoir) peuvent être employées afin de remédier à la stratification de la température dans le réservoir. Il pourrait être intéressant d'étudier si ces impacts jouent de façon significative sur les caractéristiques physico-chimiques des sédiments.

Les impacts de la réduction de la teneur en oxygène et la stratification de la température dans les réservoirs sur les sédiments et leurs caractéristiques sont à étudier afin d'évaluer leur significativité. Une quantification de la teneur en oxygène, qui est un des facteurs favorisant la formation de méthane, pourrait également être pertinente.

Le fonctionnement des lacs de retenues et réservoirs impliquent des modifications importantes du régime de l'eau, entraînant plusieurs effets en cascade (Souchon, et al., 2011; Lees, et al., 2016) :

- Ralentissement et uniformisation des écoulements (passage d'un milieu lotique à un milieu lentique) ;
- Modification de la température (réchauffement de l'eau en été, stratification thermique pour les grandes retenues et rejets d'eau plus froides en aval) ;
- Colmatage du substrat ;

⁹⁶ barrages-cfbr.eu

- Baisse de la quantité d'oxygène dissout dans l'eau ;
- Augmentation de l'eutrophisation, du fait de l'apport d'éléments nutritifs et du faible renouvellement des eaux (développement d'une biomasse algale saisonnière pouvant contenir des cyanobactéries) ;
- Diminution de la capacité auto-épuratrice du cours d'eau.

Le passage d'un système lotique (eau courante) à lentique (eau stagnante) en amont des ouvrages engendre une banalisation de la biodiversité (Fahrner, 2011), ces caractéristiques étant favorables aux espèces plus généralistes ainsi qu'au développement d'espèces invasives (Lees, et al., 2016; Winemiller, et al., 2016). Sur la base de plusieurs sources, Souchon et Nicolas (Souchon, et al., 2011) indiquent que, selon toute vraisemblance, les effets de la présence d'un ouvrage transversal sur la densité des espèces vivant en amont sont d'autant plus marqués que la réduction de débit est forte et que des conditions monotones et stables se sont installées pendant de longues durées.

Les impacts sont très différents d'un site à l'autre et il est difficile de définir une localisation des ouvrages les plus impactant. Dans le cas des centrales à éclusées, les impacts sont accentués car subis de manière brutale par l'écosystème aval.

Petite hydroélectricité

Des modifications des paramètres environnement sont également induites par les petits ouvrages hydroélectriques et les centrales au fil de l'eau, en lien avec la modification des écoulements, le ralentissement localisé du débit et la présence de l'ouvrage.

Sur les ouvrages à canal ou conduite de dérivation, une partie du débit du cours d'eau est soustrait à celui-ci. Dans ce cas, des impacts indirects peuvent apparaître :

- Réduction de la section de lit sous eau dans la section de cours d'eau court-circuitée à l'aval de l'ouvrage, entraînant une diminution de surfaces des habitats aquatiques ;
- Possibilité de mise hors d'eau de frayères dans la section de cours d'eau court-circuitée à l'aval de l'ouvrage ;
- Possibilité de colmatage de frayères en lien avec la diminution du courant dans la zone de retenue à l'amont de l'ouvrage ;
- Augmentation du réchauffement des eaux dans la zone de retenue à l'amont de l'ouvrage.

La réglementation impose aujourd'hui sur ce point, la rédaction pour chaque dossier d'autorisation, la réalisation d'une étude sur le Débit Minimum Biologique (DMB).

Pour les petites centrales hydroélectriques, certaines études n'ont décelé que des effets négligeables en termes de qualité de l'eau (Pimenta et al., 2012 cité dans Gasparatos, et al. (2017)) et ont démontré que les effets négatifs initiaux se stabilisaient au fil du temps, une qualité de l'eau proche de celle existant avant la mise en place de l'installation pouvant se rétablir après plusieurs années (Valero et al., 2012 cité dans Gasparatos, et al. (2017)).

Les modifications du fonctionnement naturel des cours d'eau constituent des aspects particulièrement traités dans la littérature. Les perturbations du régime hydrodynamique engendrent des effets en cascade, en particulier en partie amont sur les centrales à réservoirs : passage à un système lotique, banalisation des peuplements faunistiques, modifications des températures, altération du transport solide avec augmentation des volumes de matières organiques, eutrophisation des milieux. L'ensemble de l'écosystème est modifié. En partie aval des réservoirs, des altérations de l'écosystème sont également notés, en lien avec la gestion des débits et les phénomènes d'éclusées. Les effets des petites centrales hydroélectriques sont moins documentés. Les effets des centrales hydroélectriques doivent être considérés à l'échelle des bassins versants (effets cumulés), la littérature insistant particulièrement sur ce point pour les petites centrales.

7.1.4. Blessures ou mortalité d'individus

Chocs et blessures

Les effets liés aux blessures et mortalité d'individus d'espèces de faune et de flore sont peu documentés dans la littérature, à l'exception des risques de mortalité de poissons au niveau des turbines. La

littérature porte notamment une attention marquée aux espèces à valeur commerciale ou récréative (pêche de loisir). Cette mortalité concerne principalement les poissons dévalant et peut être due à des chocs directs ou à des différences de pression dans les turbines (qui peuvent provoquer des lésions internes ou blessures) (Baran, et al., 2012; Gomes, et al., 2008). Cette mortalité dépend de différents paramètres : type et taille de la turbine, espèce/taille des poissons, débit turbiné et vitesse de rotation. Les individus qui ne meurent pas peuvent être désorientés en sortie de turbine, voire subir des pertes de conscience, et être plus vulnérables à la prédation (concentration des prédateurs dans ces zones).

Peu d'études de synthèse sont disponibles sur ces mortalités. Le type de turbines est le principal paramètre influençant la mortalité. Certaines turbines de petites dimensions, notamment installées très en amont (turbines Pelton) sont généralement létales pour une majorité des poissons. Les turbines de plus grandes tailles, installées sur des sections à débits plus conséquents (type turbines Kaplan, Francis) permettent des taux de survie souvent supérieurs à 80 % voire 90 % (Baran, et al., 2012). Les mortalités sur l'anguille en dévalaison font l'objet d'une très forte attention puisque cette espèce est concernée par des niveaux de mortalité nettement supérieurs à d'autres poissons migrateurs (type Saumon atlantique) en raison de sa longueur. Le référentiel RefMADI fournit, par exemple, une fiche spécifique « Démarche diagnostic franchissabilité à la dévalaison de l'Aiguille à l'échelle de l'ouvrage. Application aux aménagements hydroélectriques ». Cette fiche intègre une évaluation de la mortalité globale de l'aménagement par un modèle prédictif. Le modèle EDA (Jouanin, et al., 2012) fournit une approche de modélisation statistique du passage (et de la mortalité) des anguilles à l'échelle d'un bassin hydrographique. De nombreux tests ont été réalisés sur plusieurs cours d'eau du bassin Loire (LOGRAMI).

Des solutions existent pour éviter ou réduire les mortalités des centrales hydroélectriques : prises d'eau ichtyocompatibles, turbines ichtyocompatibles, arrêts de turbinage ciblés pendant la dévalaison, capture et transport). Des grilles interdisant l'entrée de poissons sont indispensables. Des travaux nombreux sont menés en France sur l'Anguille en dévalaison (Thinus, et al., 2017). Depuis quelques dizaines d'années, des turbines ichtyo-compatibles (de l'anglais *fish-friendly*) sont testées (Baran, et al., 2013) et installées VLH (*Very Low Hydraulic*), vis d'Archimède, pales d'hydroliennes à flux transverses. Ces turbines, caractérisées par une vitesse de rotation plus lente, limitent très significativement les blessures et mortalité des poissons (moins de 1 % de mortalité sur 48 h).

Asphyxie

Lors d'opérations de vidange des grands réservoirs (souvent réalisées tous les 10 ans en France), d'importantes quantités de matières en suspension peuvent être relarguées ce qui peut engendrer des mortalités par asphyxie (poissons, invertébrés) ou par abrasion du système branchial.

Piégeage lors des variations de niveaux d'eau

Le fonctionnement d'usines par écluses implique des variations de débits et de hauteurs d'eau pouvant engendrer des phénomènes d'échouage ou piégeage de poissons au niveau de dépressions rivulaires, ainsi que des phénomènes de dévalaison forcée en cas de débits puissants. Des mortalités induites sont possibles par manque d'oxygène ou par prédation, notamment par des oiseaux. En période de reproduction, des destructions d'œufs sont possibles au niveau des milieux rivulaires par assèchement (assec) ou entraînement vers l'aval (lâcher d'eau).

L'analyse bibliographique réalisée indique une attention forte portée aux phénomènes de blessures ou mortalité, principalement des poissons migrateurs en dévalaison (Anguille). Dans les publications générales sur les effets des installations hydroélectriques, cet aspect demeure cependant traité secondairement, en comparaison avec les effets physiques et hydrologiques des installations hydroélectriques. De nombreux tests et suivis de franchissement / mortalité au niveau d'ouvrages ont été réalisés, notamment dans les bassins de reproduction de l'Anguille en France. Une attention importante est portée à tendre vers une meilleure ichtyo-compatibilité des turbines et les prises d'eau sont aménagées pour empêcher les poissons de dévaler par la turbine (grille fine ichtyocompatible) comme le demande la réglementation.

7.1.5. Méthodes d'évaluation des impacts, méthodes de suivi et incertitudes

De nombreuses méthodes d'évaluation des impacts environnementaux des installations hydroélectriques sont utilisées à l'échelle française et mondiale.

En France, un référentiel technique de l'ONEMA nommé RefMADI-Hydroelec (Référentiel Milieux Aquatiques Documents d'Incidence appliqué à l'Hydroélectricité) a été édité en 2014 pour aider les services de l'État, les producteurs d'électricité, les bureaux d'études et autres parties prenantes à élaborer les dossiers de demandes d'autorisation de projets hydroélectriques et/ou à faciliter leur analyse.

Le référentiel RefMADI constitue une base documentaire de 170 fiches et notes techniques traitant du volet aquatique. Il comprend des recommandations concernant le contenu des documents d'incidences ou du volet milieux aquatiques des études d'impact de projets hydroélectriques, des fiches méthodologiques informations sur les méthodologies, les protocoles d'étude, des recommandations méthodologiques pour l'évaluation de certains impacts.

Il n'existe pas, à l'heure actuelle, de guide méthodologique national concernant les projets hydroélectriques en France.

Une publication de l'ONEMA / CEMAGREF (Souchon, et al., 2011) fournit cependant un cadre méthodologique et des recommandations concernant l'étude des effets environnementaux des barrages et des seuils. Cet ouvrage traite des impacts d'un ouvrage unique, puis d'un ensemble d'ouvrages. Sans rentrer dans le détail des recommandations fournies par ce document, plusieurs points fondamentaux soulevés par les auteurs méritent d'être évoqués. Les auteurs indiquent que les impacts des barrages et seuils sur les composantes floristiques et faunistiques résultent de l'interaction de différents paramètres abiotiques et leur niveau de modification. Pour les effets à l'aval de l'ouvrage, les paramètres abiotiques à étudier sont selon cette publication :

- Le régime hydrologique du cours d'eau (pouvant se baser sur des modélisations) ;
- Les dynamiques sédimentaires ;
- La température ;
- Les modifications de la qualité physico-chimique de l'eau.

Les impacts biotiques sont liés à ces paramètres abiotiques. L'évaluation quantitative des impacts est plus complexe à réaliser, de nombreuses métriques étant à prendre en compte (richesse spécifique, diversité spécifique, abondance, structure en âge, etc.). Ces auteurs relèvent que les connaissances sur les effets biotiques des ouvrages transversaux pourraient être largement améliorées à travers des retours d'expérience sur des durées longues (Souchon, et al., 2011).

Il ressort de certaines publications clés que chaque ouvrage et installation est à considérer selon une approche adaptée à ses caractéristiques propres. De nombreux auteurs relèvent les difficultés de généralisation des effets des installations hydroélectriques sur les écosystèmes aquatiques entre plusieurs installations hydroélectriques (Botelho, et al., 2017).

A l'échelle mondiale, plusieurs publications et démarches abordent des recommandations visant à une meilleure intégration environnementale des projets d'hydroélectricité. Une publication récente (Grace, et al., 2016) propose une revue de différents modèles hydrologiques et d'analyse de cycle de vie sur la thématique hydroélectricité / biodiversité.

Au-delà de recommandations générales issues de financeurs (World Bank, 2018) et des standards internationaux (type PS6), un protocole d'évaluation spécifique a été élaboré par l'IHA (*International Hydropower Association*) : le *Hydropower Sustainability Assessment Protocol* (hydrosustainability.org), dont la version finale a été produite en 2010. Les documents de ce protocole ont en partie été mis à jour en juillet 2018. Parmi les différents modules de ce protocole, l'un traite des effets environnementaux (ES-8 - *Environmental Issues & Risks*).

Plus globalement, de nombreuses publications et recommandations méthodologiques internationales s'attachent à anticiper les impacts des grands projets de barrages hydroélectriques (Lees, et al., 2016; Winemiller, et al., 2016; Finer, et al., 2012; Chen, et al., 2015; Grill, et al., 2015; McCluney, et al., 2014), considération plus secondaire dans le contexte français du fait des perspectives de développement de la filière. Des approches intéressantes, basées sur l'évaluation des effets en cascade à l'échelle des réseaux trophiques, ont notamment été élaborées (Chen, et al., 2015). De nombreux travaux de recherche sont menés sur les dispositifs de franchissement des ouvrages transversaux, comme les passages à poissons (Anderson, 2015; Chen, et al., 2016). Sur ce thème, plusieurs publications

françaises s'attachent à fournir des modèles permettant d'estimer les mortalités relatives à la dévalaison au droit d'un ouvrage (même équipé de dispositif de franchissement) voire, pour certains, d'estimer une mortalité relative à l'échelle d'un axe en cumulant ces modèles (entre autres (Gomes, et al., 2008; Baran, et al., 2012; Thinus, et al., 2017).

Une publication non spécifique aux installations hydroélectriques mais plus largement aux méthodes d'évaluation des incidences d'opérations et aménagements sur le milieu aquatique a été produite dès 2000 (Baril, 2000). Ce document traite à la fois des impacts prévisibles sur les milieux et sur les biocénoses.

De nombreux protocoles et indices peuvent être utilisés dans le cadre de l'évaluation et des suivis des effets des centrales hydroélectriques sur la biodiversité :

- Indice planctonique (IPL), indice diatomées (IBD) pour la qualité de l'eau ;
- Indice biologique global normalisé (IBGN) ;
- Suivi des peuplements de poissons par échantillonnages répétés (conséquences de la présence de l'ouvrage, à long terme) ;
- Pour le suivi des déplacements / franchissement par les poissons : comptage (vidéo) au niveau des ouvrages ; marquage et recapture ;
- Pour la mortalité : modélisations des collisions ou tests de mortalité.

Concernant spécifiquement les impacts des éclusées, une méthodologie de caractérisation des éclusées hydroélectriques et la définition d'un indicateur du niveau de la perturbation ont été élaborées en France (Courret, 2014). Cet indice permet de quantifier la sévérité des modifications hydrologiques et de leurs impacts potentiels sur les poissons. La méthode Carhyce, développée en 2010 par l'ONEMA, permet de suivre l'état hydromorphologique du site.

Concernant l'évaluation des effets environnementaux des petites centrales hydroélectriques, il est préconisé par plusieurs auteurs de travailler à l'échelle des cours d'eau dans leur ensemble ou à l'échelle de bassins versants, afin d'intégrer les effets cumulés de l'ensemble des installations (Anderson, 2015; Gracey, et al., 2016; Lees, et al., 2016; UICN France, 2013; McCluney, et al., 2014; Lange, et al., 2018). Des approches méthodologiques spécifiques sont présentées dans certaines publications.

A noter qu'en France, chaque nouvelle installation hydroélectrique fait l'objet d'un dossier réglementaire simple voire d'une concession pour les barrages les plus importants. Dans ces dossiers, sont étudiés de manière détaillée l'ensemble des impacts présentés précédemment. Ces éléments sont, néanmoins, peu mobilisables à l'heure actuelle pour une synthèse nationale, bien que cela puisse représenter une nécessité dans le cadre des perspectives actuelles de développement de la filière.

Sur le plan de la recherche, un axe de travail identifié cible l'évaluation des impacts des petites centrales hydroélectriques (Anderson, 2015) et, plus particulièrement, les impacts cumulés à l'échelle de bassins versants. Sur ce point, Anderson et al. (Anderson, 2015) préconisent des investissements conséquents pour la mise en œuvre de programmes de suivi long terme et à grande échelle des effets des installations au fil de l'eau.

7.2. Impacts de l'hydroélectricité sur les sols et les sédiments

La production d'énergie hydroélectrique requiert dans la majorité des cas des installations et réservoirs d'eau ; ces derniers permettent à l'échelle régionale la régulation de l'approvisionnement en eau, le contrôle des inondations et des sécheresses ainsi que l'irrigation agricole. De façon plus locale, des impacts non négligeables sont induits sur les sols (Gasparatos, et al., 2017). La revue bibliographique de 25 publications a permis de mettre en exergue les principaux impacts chimiques, physiques et biologiques ainsi qu'en termes de surfaces de sols, induits par les centrales hydrauliques, sur les différentes étapes du cycle de vie des installations, et à différentes échelles (du local au global). Les impacts spécifiques à certaines technologies sont examinés.

Les impacts des différentes installations hydroélectriques varient considérablement d'une technologie à l'autre mais également en fonction du site d'implantation, du cours d'eau, de la conception et des

moyens de gestion de l'installation, rendant ainsi impossible une généralisation des impacts et de leur intensité. La comparaison entre différentes technologies de production d'hydroélectricité est donc peu évoquée dans la littérature. Les installations avec réservoir sont davantage étudiées que les centrales au fil de l'eau. De fait, les centrales au fil de l'eau n'impliquent pas la dégradation de la biomasse (qui induit des émissions de gaz à effet de serre) et affectent peu les caractéristiques physico-chimiques (et donc la charge sédimentaire) de la rivière puisque ces structures n'ont pas de réservoir (Siddiqui, et al., 2017). Par ailleurs, leur implantation nécessite moins d'espace. Cependant, en fonction de la présence ou non d'un canal d'amenée (qui permet la dérivation d'une partie du cours d'eau), les microcentrales hydrauliques au fil de l'eau affectent plus ou moins le débit de la rivière. Concernant la taille des installations, il apparaît que la sévérité des impacts des petites centrales est généralement moindre ou plus facilement réductible, par rapport aux grandes installations (Péguin, et al., 2013). Ces conclusions gagneraient cependant à être étayées par la description des méthodes d'évaluation et des résultats correspondant. A l'inverse, certaines études indiquent qu'à quantité d'électricité générée égale, une multitude de petites installations peuvent avoir un impact environnemental supérieur à celui d'une unique mais plus grande installation (Kumar, et al., 2014).

A noter que la typologie des sols ou sédiments, selon le cas, n'est en général pas mentionnée dans les publications, et peut seulement être déduite des informations fournies concernant les milieux étudiés.

7.2.1. Impacts en termes de surfaces de sols

La majorité des publications évoque les surfaces de sols impactés, notamment via leur occupation ou leur changement d'affectation. Si le premier sous-impact correspond à la surface occupée, le second représente la manière dont la surface est utilisée (par exemple pour la mise en place d'un réservoir, la construction d'une installation). Les impacts mentionnés sont principalement issus d'observations, évalués (quantitativement et qualitativement) et font peu l'objet de modélisations ou d'une évaluation de risques potentiels. A ce stade, il apparaît que les impacts sur les surfaces inondées sont mieux étudiés que ceux sur les surfaces à proximité mais non inondées. Bien que les étapes liées au démantèlement et la fin de vie du projet ne soient pas couvertes dans la littérature, on peut néanmoins noter qu'elles vont perturber l'écosystème aquatique de la retenue d'eau.

La construction et la mise en exploitation de structures nécessaires à la production d'hydroélectricité génèrent un impact sur l'**occupation des sols**, par exemple dans les projets de barrages, digues et lacs artificiels qui impliquent la construction de réservoir et représentent la majorité de la puissance des projets d'hydroélectricité. Ainsi, les centrales utilisant des réservoirs nécessitent davantage de terres que les centrales au fil de l'eau (Fthenakis, et al., 2009). On peut noter que certaines centrales au fil de l'eau sont implantées sur des sites déjà existants (ancien moulin, usine, etc.), ce qui limite les impacts induits par la construction des structures. Les grandes centrales hydroélectriques avec réservoirs (centrales à lac) engendrent des bouleversements importants des milieux dans lesquels elles sont implantées. Leur emprise peut être très importante (quelques km² à plusieurs dizaines voire centaines de km²). En France, la majorité des lacs de retenue couvrent moins de 10 km², le plus grand barrage étant celui du Petit Saut, en Guyane (310 km²). Les centrales hydroélectriques et les barrages peuvent inonder de vastes zones situées en amont, engendrant des impacts sur les sols immergés.

L'étape de construction des installations nécessite également l'extraction de boues, notamment pour la construction de tunnels. Lorsque cette boue n'est pas déposée sur des sites de décharge dédiés, elle affecte les sols à proximité du chantier, venant s'ajouter à l'emprise liée à la structure et la mise en eau du réservoir (Kumar, et al., 2014).

L'évaluation de cet impact se traduit dans la majorité des publications concernées par une mesure de la surface mise en eau, complétée dans certains cas par la surface indirectement impactée. A titre illustratif, la construction du barrage Manwan (en 1974) le long de la rivière Lancang (Chine) et la mise en eau du réservoir associé ont respectivement induit des impacts jusque 5 000-6 000 m (entre 1974 et 1988) puis 2 000-3 000 m depuis la rive (entre 1988 et 2004, la fin de la période d'étude). Les impacts incluent les sols inondés et les sols indirectement impactés. Les impacts de la construction du barrage et de la mise en eau du réservoir sont plus importants dans les terres en amont qu'en aval (Zhao, 2013). Dans cet exemple précis, non représentatif du cas français en raison de sa taille (1,7 GW), la mesure de l'impact après construction du barrage et mise en eau du réservoir a été réalisée à partir d'images satellites.

Le reste de la littérature analysée donne une indication de la surface occupée par rapport à la quantité d'énergie produite (en m².an/GWh ou m²/GWh selon les publications) ou de l'intensité d'utilisation des terres (en km²/TWh/an, estimée par (McDonald, et al., 2009) sur différents scénarios prospectifs). L'emprise terrestre d'une installation au fil de l'eau est négligeable, lorsque ramenée à la production d'un GWh d'électricité, en comparaison à l'emprise requise par une centrale avec réservoir (Fthenakis, et al., 2009). Une installation au fil de l'eau occuperait 3 m²/GWh au Canada, tandis qu'elle peut atteindre 25 000 m²/GWh pour une centrale avec réservoir aux Etats-Unis (Fthenakis, et al., 2009). L'occupation des sols par quantité d'énergie produite dépend non seulement de la technologie (installation au fil de l'eau *versus* centrale avec réservoir), mais aussi de la topographie (les retenues d'eau situées dans des zones relativement plates sont plus longues et larges et mobilisent donc plus de surfaces que celles situées en montagne, qui sont plus profondes et plus courtes). L'approche privilégiée dans une autre publication pour refléter l'occupation des sols est d'intégrer aussi la durée nécessaire pour que les terres transformées reviennent à leur état initial. Cet impact est mesuré comme un produit de la surface de terres considérées et de cette durée (m².an). L'estimation du temps nécessaire pour retrouver la productivité initiale des terres est néanmoins difficile à évaluer ; il est d'environ 5 ans dans le cas de sols arables (Fthenakis, et al., 2009), une durée négligeable en regard de la durée de vie moyenne d'une installation, mais probablement de plusieurs décennies, voire siècles pour des écosystèmes forestiers (durée de vie qui n'est plus négligeable).

A noter que dans le cas des STEP (Station de Transfert d'Énergie par Pompage), l'activité de stockage est située sur le site même de production d'énergie hydroélectrique. L'emprise additionnelle associée à l'installation en aval du barrage (pour le second bassin) est cependant négligeable en regard de l'emprise totale de la centrale hydroélectrique.

L'occupation des sols est un impact avéré, évalué dans les publications analysées par des données satellites ou des modèles. Au-delà des indicateurs spatiaux (par exemple, en ha/MW), certaines publications complètent avec des indicateurs temporels comme le temps de restauration nécessaire aux terres, c'est-à-dire la durée nécessaire pour que la zone transformée revienne à son état initial (négligeable dans le cas de terres arables, au vu de la durée du projet, à très important dans le cas d'écosystèmes forestiers).

Les centrales avec réservoir sont davantage étudiées que les installations au fil de l'eau dans les publications analysées, principalement en raison de leur plus faible emprise (à production d'énergie identique) sur les sols. L'occupation des sols est également moindre pour les structures hydroélectriques implantées sur des sites déjà existants.

Le **changement d'affectation** des sols est un impact potentiellement induit par la construction et la mise en exploitation de structures comme les barrages, digues et lacs artificiels. La construction du barrage des Trois Gorges, en Chine a nécessité un réservoir de 65 000 ha et a aussi provoqué l'inondation de 45 000 ha de terres sur les affluents du Yangtsé. En plus de ces changements d'affectation des sols directs, on comptabilise aussi des changements d'affectation des sols indirects : la construction de ce barrage a nécessité de réinstaller les populations qui vivaient dans la zone inondée (nouvelles surfaces nécessaires pour les villes et villages, mais aussi pour les activités agricoles), 1,8 millions de personnes ayant été déplacées (Padovani, 2004; Savoie, 2003).

La notion d'imperméabilisation dans le cas de l'hydroélectricité avec retenue est présente dans une moindre mesure. Les sols sont **imperméabilisés** par la construction, entre autres, des barrages, des centrales, des canaux de dérivation et des routes d'accès (dont des routes utilisées pendant la phase de chantier et pendant la phase opérationnelle de la centrale afin d'effectuer des opérations de maintenance, ainsi que les stations de conversion d'énergie que sont les onduleurs et les transformateurs par exemple). En raison de leur faible importance par rapport à l'emprise requise par la retenue d'eau, ces impacts sont mentionnés dans la littérature mais ne font pas l'objet d'une évaluation particulière. Dans des conditions extrêmes (fortes précipitations, etc.) ou dans des zones spécifiques (sols très argileux, etc.), non représentatives du cas français, ces infrastructures peuvent causer des inondations (Berchin, et al., 2015). Cette mention concerne un barrage particulièrement important au Brésil (11,233 MW). Les installations françaises, du fait de leurs conditions d'implantation, ne sont *a priori* pas génératrices d'impacts d'une telle intensité.

Contrairement au changement d'affectation des sols dans le cas de la mise en place d'installations avec réservoir (qui induit une immersion des terres), l'artificialisation des terres est un impact de l'énergie hydraulique d'intensité négligeable au regard des enjeux sur l'emprise des sols. Les principaux cas d'étude sont de grands projets (Brésil, Chine), dont l'intensité des

impacts (totale, mais également par GWh produit) n'est pas forcément applicable aux projets français, généralement de plus petite taille.

7.2.2. Impacts physiques sur les sols et sédiments

D'une manière générale, les impacts physiques sur les sédiments sont bien documentés pour les installations avec un réservoir avec notamment la description d'impacts observés tels que la rétention des sédiments et l'érosion des dépôts alluviaux sédimentaires et des rives en aval. Les installations au fil de l'eau sont peu étudiées ; cependant elles ne disposent pas de réservoir, cause principale de la rétention des sédiments, et leur impact sur l'hydrodynamique du cours d'eau dépend de la technologie utilisée (présence ou non d'un canal d'amenée qui dérive une partie du cours d'eau). Les impacts physiques relatifs à la rétention de sédiments et l'érosion des dépôts sédimentaires et rives font l'objet de modélisations dans la majorité des publications les évaluant ou sont estimés en utilisant le *Soil and Water Assessment Tool*. Il est néanmoins à noter que l'intensité des impacts sera moindre pour des installations françaises plus petites (sans pour autant être négligeable), en comparaison des impacts induits par les grands projets avec barrage étudiés dans les publications. La France compte également de nombreuses installations au fil de l'eau dont les impacts seront de plus faible intensité.

Par ailleurs, ces impacts concernent uniquement les phases de mise en eau du bassin et d'utilisation des installations. En se basant sur les publications analysées, les impacts potentiellement générés sur site en fin de vie des centrales ne sont pas étudiés, ce qui peut s'expliquer par le fait que les centrales actuelles et barrages sont encore opérationnels. Leurs durées de vie varient d'une dizaine à une centaine d'années environ selon les caractéristiques des structures, les matériaux qui les constituent ainsi que du mode de gestion des installations. Des besoins de recherches pourraient s'avérer nécessaires afin d'évaluer les impacts à long terme du stockage des sédiments sur la biodiversité ainsi qu'en regard d'épisodes de sécheresses et d'incendies (Norman, et al., 2015).

La **rétention des sédiments** est principalement due à la présence d'un réservoir, et est de fait peu observée pour les installations au fil de l'eau. La capacité à sédimenter dépend de l'apport en sédiments et de leurs caractéristiques, de la vitesse du courant, du réservoir et de sa gestion (par exemple : opération de vidange, planning d'ouverture des vannes pour favoriser le transport sédimentaire) (Zhai, et al., 2010). Par exemple, dans des cas extrêmes comme pour des installations de taille très importante comme le barrage de Manwan (rivière Lancang, Chine), celui-ci sera entièrement rempli de sédiments d'ici 2050 si aucune mesure n'est prise avant (Zhai, et al., 2010). Différents modèles de transport des sédiments sont développés (modèle InVEST développé en 2008 par exemple), généralement avec pour objectif d'analyser et prédire les changements sur l'intégrité de l'écosystème de la rivière. D'autres évaluations reposent sur l'utilisation du *Soil and Water Assessment Tool* (Norman, et al., 2015). Le reste des publications expliquent principalement le mécanisme de rétention des sédiments mais ne l'évaluent pas ou citent simplement les résultats d'autres études.

A l'échelle régionale voire nationale, la modification de la charge en sédiments, altérée principalement par les installations hydroélectriques avec réservoir, peut conduire à des changements morphologiques de la rivière en aval, de son lit et des rives, ainsi qu'au niveau des embouchures (delta et estuaire) et des côtes (Kleinman, et al.; Thórhallsdóttir, 2007). D'après Zhai, et al. (2010), l'intensité de ces impacts varie selon l'efficacité de piégeage des sédiments, sans qu'un consensus se dégage sur leur quantification : plus de 99 % de retenue pour les larges réservoirs (dont le volume est supérieur à 107 m³) (Williams and Wolman, 1984 ; Graf, 2005 cités par Zhai, et al. (2010)) ; entre 10 % et 90 % pour les petites installations (Brune, 1953, cité par Zhai, et al. (2010)) selon leur type et les opérations de gestion. Un dessableur peut être mis en place afin d'éliminer les matières en suspension et les sédiments par exemple. Une publication plus récente indique que la retenue totale des sédiments par les barrages sur le bassin versant aux Etats-Unis est d'environ 50 % (soit 178-242 tonnes/an) (Norman, et al., 2015), résultat confirmé lors d'une étude de 4 ans sur les barrages (Polyakov, NA, cité par Norman, et al. (2015)). A noter que les impacts liés à la sédimentation en amont et en aval des infrastructures ne font pas l'objet de recherches dédiées dans la littérature, mais peuvent être déduits de l'étude du transport des sédiments (et plus particulièrement l'interruption du transport), phénomène bien étudié dans la littérature.

L'accumulation d'alluvions et sédiments est observée pour les grandes installations hydroélectriques mais également sur les petites installations sur les petits cours d'eau, sans qu'une analyse comparée de ces impacts ne soit disponible sur le sujet (Péguin, et al., 2013).

La perturbation du fonctionnement normal des cours d'eau est intrinsèquement liée à la présence et à l'exploitation d'un ouvrage hydraulique. Les effets sont plus directement perceptibles pour les grands ouvrages hydroélectriques avec réservoirs avec une conséquence principale: la modification du compartiment sédimentaire (blocage ou altération des échanges sédimentaires, dépôts, etc.). La rétention des sédiments est un impact avéré des installations avec un réservoir ; son intensité (notamment sur le piégeage des sédiments) varie cependant en fonction de la taille et de l'implantation de la centrale ainsi que des opérations de maintenance du réservoir (par exemple : vidange). L'utilisation de modèles de transport des sédiments permet notamment d'en suivre l'évolution. Une lecture critique de ces résultats est nécessaire : il s'agit principalement de projets avec réservoir situés hors d'Europe (Etats-Unis, Chine, Inde, Islande). Les infrastructures sont dans la plupart des cas beaucoup plus importantes qu'en France avec des débits d'eau plus élevés : l'intensité des impacts associés et les enjeux ne sont donc pas les mêmes.

Les impacts sur le transit sédimentaire entraînent des changements encore plus drastiques. En bloquant le transport solide d'un cours d'eau, un ouvrage peut entraîner de l'érosion progressive (en aval) dans une rivière, favorisant l'accélération des vitesses d'écoulement et ainsi l'approfondissement du lit mineur ou l'attaque des berges. Les milieux aquatiques s'en trouvent changer et le substrat existant est utilisé par le cours d'eau pour combler les manques, entraînant la création de fosse et l'apparition de la roche mère. Les impacts sur le compartiment sédimentaire sont classiquement forts pour les grands barrages et retenues. Ils sont très variables pour l'hydroélectricité au fil de l'eau, en fonction de la nature des ouvrages et en fonction du type de cours d'eau (montagne, plaine...). Ces petits ouvrages engendrent également des modifications sur le plan sédimentaire, avec un accroissement de la stabilité sédimentaire, des dépôts plus importants de particules fines (pouvant contribuer au colmatage du lit du cours d'eau) (Anderson, 2015; Lange, et al., 2018)

Un autre impact particulièrement étudié dans les publications est l'**érosion des dépôts sédimentaires et des rives**. La majorité des publications porte cependant sur des centrales hydroélectriques non représentatives du cas français. Ainsi dans les environnements arides, la dégradation des sols est principalement due à l'érosion causée par les inondations ; les fluctuations des niveaux d'eau dans les réservoirs altèrent les rives et contribuent à leur érosion (Pimentel, et al., 2002). Zhai, et al. (2010) indiquent que si le réservoir retient une quantité de sédiments inférieure à celle transportée par le courant, les sédiments du lit de la rivière et de la rive seront érodés en aval de la retenue. Dans le cas inverse, davantage de sédiments seront accumulés dans la rivière (mécanisme non explicité dans la publication).

D'autres publications étudient la question de l'érosion des sédiments et rives dans le cas d'une succession de barrages, dont la taille et le nombre ne sont pas représentatifs du cas français. Ainsi en Turquie, le cas exceptionnel de la construction de 10 barrages successifs (nommée la Coruh cascade) a induit un apport de sédiment moindre en aval et a augmenté de fait l'érosion des dépôts alluviaux sédimentaires côtiers et des rives. La perte totale en sédiment près du delta de Coruh est estimée entre 83 % et 89 % (selon l'approche utilisée pour l'estimation) (Berkun, 2010). Il en est de même en Chine où l'érosion des rives s'accroît du fait du développement des barrages sur la rivière Lancang (14 dont 9 planifiés, 3 en construction, 2 opérationnels). Ainsi, l'érosion des rives et sédiments de la rivière Lancang était de 1 087 t/km²/an en 2005 et est estimée (par modélisation) atteindre 3 222 t/km²/an en 2050 lorsque la cascade de centrales hydroélectriques sera opérationnelle. Il a été observé que l'érosion était la plus sévère au milieu du bassin versant et en aval avant et après les constructions de la cascade (Zhai, et al., 2010). Ces études de cas ne sont pas applicables en France à cette échelle mais mettent en exergue l'impact des barrages à retenue sur les dépôts sédimentaires et rives dans des cas extrêmes. En France métropolitaine, la majorité des barrages sont construits et il n'y a peu perspective de développement supplémentaire.

L'érosion des sédiments et des rives est dépendante du nombre d'installations hydroélectriques et de leur impact sur l'hydrodynamique du cours d'eau, mais également du type de sol/sédiment et du climat dans la région concernée.

Ces éléments peuvent être pris en compte par modélisation. Ainsi, l'équation universelle de perte des sols (*Universal Soil Loss Equation*, USLE) utilisée par (Zhai, et al., 2010) permet d'estimer l'érosion au long terme des rives. De même, (Norman, et al., 2015) utilise un modèle afin d'estimer la perte annuelle en sédiments (en t/an) (également via l'équation USLE) et le rendement moyen en sédiments (en t/an).

Dans la mesure où l'érosion des côtes est un problème multifactoriel créé par diverses activités humaines, il est difficile de prévoir les effets directs induits par les installations (Berkun, 2010). Ce

problème est également mentionné par (Norman, et al., 2015), qui stipule que les modifications en charge sédimentaire peuvent résulter de changements en termes de gestion des terres (par exemple avec de meilleures pratiques de gestion – *Best Management Practices*), du climat ou suivant des cycles naturels.

L'érosion des dépôts sédimentaires et des sols des rives est un impact avéré, bien étudié et évalué dans les publications notamment via des modélisations. La création de retenue d'eau artificielle et la modification du débit d'eau entraîne une modification de l'érosion naturelle des rivages et une sédimentation au niveau des bassins. Des techniques peuvent être mises en place pour vidanger les barrages et limiter leur remplissage progressif en sédiments, comme dans le cas français. A noter également qu'en France, les perspectives de développement de l'hydroélectricité sont faibles, la plupart des centrales hydroélectriques et barrages sont en place depuis plus d'une dizaine d'années.

Les transformations hydrodynamiques au niveau du réservoir (passant d'écosystèmes d'eaux rapides à calmes) lors de la construction d'installations hydroélectriques affectent la limnologie⁹⁷ et les caractéristiques physico-chimiques de l'eau (exemple : stratification thermique), et conduisent à **un changement morphologique du cours d'eau**, comme mentionné précédemment. En amont du réservoir, la conséquence est l'ensablement et l'élargissement du lit de la rivière si la topographie le permet, ou une augmentation de la ligne d'eau avec un risque d'inondations ; en aval, la zone inondée peut être réduite, avec des sols davantage exposés pendant de longues périodes (assèchement) et submergés pendant de courtes périodes (Berchin, et al., 2015). Le changement morphologique du cours d'eau peut conduire par extension à un changement d'affectation des sols environnants (voir section 7.2.1).

Contrairement aux grandes installations hydroélectriques, les microcentrales hydrauliques situées au fil de l'eau semblent affecter de façon plus réduite le débit de la rivière et ses caractéristiques physico-chimiques ; l'intensité de cet impact varie selon le type d'installation et la présence ou non d'un canal d'amenée (qui permet la dérivation d'une partie du cours d'eau). Ce résultat ne semble cependant pas avoir fait l'objet d'une évaluation ou d'une analyse comparative quantifiée (Pointereau, et al., 2009), ce qui limite l'interprétation des résultats.

Le changement morphologique du cours d'eau du fait de la présence de centrales hydrauliques ne fait pas l'objet d'évaluation dans la littérature. L'identification d'indicateurs pertinents permettrait d'en suivre l'évolution pendant l'installation, l'exploitation puis le démantèlement des centrales.

7.2.3. Impacts chimiques sur les sols et sédiments

La majorité des impacts chimiques abordés dans les publications sont relatifs à l'acidification des sols (sur l'ensemble du cycle de vie). En comparaison aux impacts physiques ou relatifs aux surfaces occupées de sols, ces impacts restent peu mentionnés dans les publications. Les principaux impacts spécifiques aux installations hydroélectriques concernent l'accumulation de matière organique au niveau des retenues d'eau, et peuvent être limités par la vidange régulière des sédiments. Les impacts liés au démantèlement des installations sur la chimie des sols ne sont pas évalués dans le cas français.

Parmi les publications analysées, une évaluation est menée sur l'impact des étapes du cycle de vie (y compris les étapes d'extraction et de fabrication des composants) des installations hydroélectriques sur le **potentiel d'acidification du milieu** (Siddiqui, et al., 2017). Cet impact n'est pas évalué dans le cas des sols uniquement, mais agrège les résultats de l'impact potentiel sur les milieux aquatiques, aérien et les sols. Un changement de pH des sols/sédiments peut entraîner leur altération chimique et biologique, et indirectement impacter la qualité de l'écosystème associé. Dans l'étude, la construction et le démantèlement de la centrale contribuent respectivement à 25 % et 75 % à l'impact potentiel d'acidification du milieu. La phase d'exploitation, représentative de la majorité du parc français actuel, ne contribue pas au potentiel d'acidification. Les résultats posent néanmoins la question de la gestion de fin de vie des centrales concernées. Le potentiel d'acidification des sédiments des réservoirs

⁹⁷ Etude des lacs et des eaux lacustres

hydrauliques reste relativement faible comparé à d'autres énergies comme le nucléaire ou l'éolien (Siddiqui, et al., 2017).

Le potentiel d'acidification de l'hydroélectricité avec retenue est étudié dans la littérature, et apparaît négligeable en comparaison à d'autres énergies.

Des cas de **pollution des sols**, par exemple lors d'un rejet accidentel d'huile ou de graisse, peuvent survenir pendant la construction ou le fonctionnement de la centrale, avec une faible incidence. Des bacs de récupération sont mis en place sur les centrales, notamment pendant les travaux, et de nombreuses centrales utilisent des huiles biodégradables pour réduire leur impact en cas de rejet accidentel. A noter que la pollution des sols n'est pas un impact évalué dans la littérature, mais plutôt traité comme un risque potentiel (Pointereau, et al., 2009). Il serait intéressant de déterminer si ces rejets sont relativement fréquents et si des quantités d'huile non négligeables se déposent sur les sols.

7.2.4. Impacts biologiques sur les sols et sédiments, et services écosystémiques

Les milieux sont ennoyés changent de nature, ils deviennent de fait des milieux aquatiques. Lors de l'enneigement des sols, la faune du sol (et probablement la microflore du sol) est fortement impactée : la faune du sol disparaît au profit de la faune aquatique vivant dans les sédiments et la microflore est modifiée du fait de l'évolution des conditions physico-chimiques du milieu. Parler d'impacts et de modifications sur les sols est ainsi complexe puisque les sols à proprement parler n'existent plus.

A l'instar des impacts chimiques, les impacts biologiques sont moins étudiés dans les publications analysées, malgré les recherches complémentaires effectuées par l'équipe projet sur le sujet. Les principaux éléments mis en exergue sont notamment la disparition d'espèces endémiques, ainsi que la perte de sols fertiles en aval et les fonctions de rétention du sol. Ces deux derniers points sont mentionnés dans certaines publications mais ne sont pas directement liés à des sous-impacts identifiés en amont de l'étude.

D'après les publications analysées, les impacts de l'hydroélectricité sur la faune et la microflore du sol ne sont pas étudiés, bien qu'ils soient indirectement liés aux impacts physiques et chimiques détaillés dans les précédentes sections. De fait, il pourrait être pertinent de mener des recherches afin de mieux évaluer et quantifier les impacts de cette EnR sur la biologie des sols et les services écosystémiques associés au niveau des zones immergées. Les impacts identifiés sont principalement liés à la phase de mise en service des installations, donc peu applicables au cas français, le parc étant déjà majoritairement construit.

La présence de centrales hydroélectriques affecte **le service écosystémique de production agricole ou sylvicole rendu par les sols** (qui n'existent plus) et **la capacité biogène des sédiments** via la modification de la charge sédimentaire. Cette dernière a un intérêt écologique significatif, notamment dans les rivières et plaines inondables, puisque la survie de certains organismes aquatiques dépend de la présence des sédiments. Il est estimé que la situation est critique pour une partie de la biodiversité lorsque la charge sédimentaire est en dessous de 70 % (comparé à la valeur normale), cette charge pouvant être inférieure à 50 % (comparé au niveau normal) dans les milieux concernés par trois installations hydroélectriques consécutives (Kurdoglu, 2016). Par exemple dans le cas de la rivière Coruh (Turquie), la succession des 10 barrages induit une forte rétention de sédiments, donc d'éléments biogènes, ce qui modifie l'équilibre géochimique des masses d'eaux côtières (ratio silice/azote) ainsi que la composition et productivité des phytoplanctons ; aucune évaluation quantifiée n'est cependant réalisée sur la fertilité des sols et la capacité biogène des sédiments (Berkun, 2010).

La perturbation de la fertilité des sols inondables (qui n'existent plus en tant que tels car transformés en milieux marins) et la capacité biogène des sédiments est identifiée dans le cas d'une installation hydroélectrique avec barrage, tandis que cet impact est considéré négligeable pour les installations au fil de l'eau. L'intensité de cet impact varie également selon la nature du sol/du sédiment lui-même et son écosystème.

La disparition de la couverture végétale lors de la mise en fonctionnement des barrages à retenue, la **teneur en matière organique du sol** et la perte d'habitat pour des espèces sessiles et mobiles sont abordés dans la littérature (voir section 7.1) (Thórhallsdóttir, 2007). Kurdoglu (2016) a réalisé un sondage auprès de 60 experts scientifiques de différents secteurs (privé, public, académique) afin d'évaluer l'impact des centrales hydroélectriques en Turquie. Les résultats de l'étude ont montré que les impacts parmi les plus significatifs seraient la destruction des flancs des collines et des zones riveraines aux abords des rives ainsi que les effets liés au flux de sédiments qui empêche la migration du phytoplancton et du zooplancton.

De plus, plusieurs publications indiquent que le stockage de grandes quantités d'eaux dans les réservoirs pourrait, dans certains cas, altérer le microclimat local (Berkun, 2010). Par extension, le cycle de l'eau pourrait en être modifié et l'humidité des sols également.

Le service écosystémique de **régulation des flux d'eau** rendu par l'ensemble des sols du bassin versant peut également être amoindri dans le cas de centrales hydroélectriques. La diminution du débit des cours d'eau entraîne un taux d'humidité moindre, pouvant impacter localement la faune et la flore en aval de la retenue, ainsi que l'alimentation des nappes phréatiques en aval (Kurdoglu, 2016). Du fait de la présence du barrage, le niveau d'eau est relativement stable en amont d'une centrale avec retenue. Les nappes phréatiques et les zones humides bénéficient donc d'un maintien relativement stable dans le temps de leur niveau d'eau. Quelques études ont montré une diminution des niveaux d'eau des nappes phréatiques lorsqu'un barrage vient à être supprimé (Riggsbee, et al., 2012). Des mesures de repeuplement de végétaux au niveau des rives peuvent être mises en place afin de favoriser la fixation des sols contre l'érosion. Concernant la fonction de rétention des sols, l'étude Liang et al. (2016) propose un cadre d'évaluation des bénéfices et pertes dans les zones humides riveraines (incluant une analyse et une évaluation quantitative des services écosystémiques). Ainsi, l'inondation des sols amoindrit leur fonction de rétention, comme observé sur la Yellow River en Chine où a été construit le réservoir Xiaolangdi. La valeur de la fonction de rétention des terres cultivées submergées, terres forestières et parcelles de jardins est calculée afin de déterminer la perte due à l'eau et l'érosion des sols (en yuan/ha), à partir de données statistiques. Dans cet exemple, la perte annuelle des rendements agricoles des terres concernées est d'environ 16 millions de yuan (2 millions d'euro), soit 208 millions de yuan (près de 27 millions d'euro) entre 2000 et 2012 (Liang, et al., 2016) pour des installations hydroélectriques d'une puissance totale de 1,8 GW. Ces résultats sont à mettre en regard des émissions de gaz à effet de serre évitées grâce à l'usage d'installations hydroélectriques par rapport au mix énergétique (dominé par l'usage du charbon en Chine) qui peut conduire à l'émission de particules polluantes.

La monétarisation de fonctions rendues par le sol est une approche intéressante pour évaluer l'impact de l'hydroélectricité sur ces fonctions, par exemple une rétention d'eau moindre ; à noter cependant que les résultats de l'étude réalisée en Chine ne peuvent être assimilés au cas français, au vu des dimensions des infrastructures et des débits concernés.

7.3. Impacts de l'hydroélectricité sur les paysages

Les publications sur les impacts paysagers des centrales hydroélectriques s'attardent peu sur les impacts liés aux infrastructures elles-mêmes, ou alors, en lien avec d'autres impacts (naturalistes ou autres). Les impacts de l'hydroélectricité au fil de l'eau ne sont pas vraiment abordés. Les publications reviennent assez souvent sur l'acceptation sociale des barrages : cette forme d'EnR étant plus ancienne que les autres, des retours d'expérience donnent des résultats intéressants, à comparer avec l'acceptation des autres formes d'EnR, plus récentes.

7.3.1. Visibilité et appropriation paysagère

La visibilité comme entrée privilégiée

Comme pour les autres EnR, la visibilité reste un aspect important qui conditionne l'impact sur les paysages. Des classifications existent même pour montrer comment jouer sur la visibilité ou non-visibilité de l'aménagement (Ferrario, et al., 2017) : dissimulation, enfouissement, camouflage, remplacement, diversion, mise en scène, cartographie, « historisation » ou *storytelling* sont ainsi 10

manières de gérer la visibilité des nouveaux aménagements. Ces stratégies sont plus des classifications *a posteriori* que des manières pragmatiques d'aborder les impacts. L'étendue du bassin est logiquement mentionnée comme un impact potentiel, avec un impact évidemment moindre des microcentrales (Wolsink, 2018). Enfin, plus que pour les autres EnR, les constructions annexes aux installations hydroélectriques (prise d'eau, locaux techniques, conduites forcées etc.) sont abordées spécifiquement avec leurs enjeux d'intégration. Les logiques d'intégration rejoignent les stratégies sur la visibilité avec par exemple du pastiche d'architecture traditionnelle pour ces bâtiments afin de les intégrer dans un contexte de milieu naturel montagnard protégé (Josimovic, et al., 2012).

Une planification « par le vide »

Comme sur les autres formes d'énergies, la planification se fait souvent « par le vide » (installations placées là où elles ne gênent pas) alors que de nombreuses publications plaident pour une planification plus active (là où elles peuvent faire projet), seule solution pour créer des paysages de l'énergie, plus acceptables. La plupart des publications s'intéressent ainsi aux éléments à prendre en compte dans la planification de l'aménagement : aires protégées, aires naturelles, cœurs des parcs nationaux, zones humides, aires urbaines, touristiques, plages, ou zones minières (Baltas, et al., 2012) sont ainsi répertoriées comme des facteurs de sensibilité et donc d'éloignement à considérer dans la planification. La proximité avec d'autres installations et la fragmentation des paysages associée est aussi relevée (Lopes, et al., 2014). Ces questions de planification semblent finalement secondaires du fait sans doute de la maturité de cette forme d'énergie, en Europe ou en Amérique du Nord en tout cas, où les questions d'impacts paysagers se posent plutôt sur des projets de démantèlement que sur des projets de nouvelles installations.

Une appropriation paysagère forte des installations hydroélectriques

La majorité des publications abordent la question de l'acceptation sociale des barrages ou des installations hydroélectriques. A noter que dans le cas des barrages français, les oppositions initiales étaient nombreuses et l'intégration paysagère s'est fait progressivement, en lien avec l'évolution du regard sur l'infrastructure et le développement d'usages associés (visites des barrages, activités nautiques, emploi associé à l'activité technique du barrage en lui-même, etc.). C'est bien la multifonctionnalité des aménagements (incluant la compréhension des intérêts en termes de retombées de toutes sortes sur le territoire et la participation à son fonctionnement) qui ont conduit à leur intégration. Cet aspect transparaît nettement dans la bibliographie mais dans la perspective de projets de démantèlement et pas pour des projets d'installation. La comparaison avec d'autres formes d'énergie, potentiellement conflictuelles (Brühne, et al., 2015), est alors particulièrement édifiante, l'hydroélectricité présentant une maturité que les autres énergies n'ont pas. Cette maturité conditionne largement l'acceptation de cette forme d'énergie alors même que ses impacts sont, au moins à proximité, plus importants au premier abord (modification brutale des paysages, des cours d'eau, etc.). Dans de nombreux pays, les projets de démantèlement de barrages rencontrent ainsi le plus souvent une opposition pour conserver les retenues et les digues (Keilty, et al., 2016), preuve d'une appropriation forte et d'une intégration sociale de ces aménagements dans le paysage et par les usagers (y compris parfois ceux qui ont été lésés au départ par sa construction).

L'historique de l'hydroélectricité (Loloum, 2016; Rodriguez, et al., 2014) est également intéressant puisqu'il montre souvent qu'on est passé d'une communication basée sur l'épopée industrielle, la prouesse technique, l'aventure humaine à une mise en avant de la multifonctionnalité des installations : tourisme, industrie, pêche, etc. et au développement de valeurs esthétiques (pratiques de *Land Art* sur certains barrages), paysagère, culturelle voire sociale (pour ceux qui y travaillaient). On est ainsi passé d'une « ressource naturelle » renouvelable (la houille blanche) à une « ressource culturelle » (Rodriguez, 2012), et les paysages hydroélectriques dépassent ainsi l'opposition classique entre nature et culture.

Ces aspects vont même jusqu'à la demande de patrimonialisation de certaines installations (3 installations seulement en France sont classées aux Monuments Historiques et constituent pourtant un patrimoine hydroélectrique) : aboutissement ultime, à l'instar de la Tour Eiffel, pour des aménagements décriés au départ.

A l'inverse de ces impacts positifs des installations hydroélectriques, l'appropriation privée de ressources naturelles collectives est parfois reprochée (Tremblay, 2005), rejoignant en cela les autres

formes d'EnR. La question dépasse là aussi le syndrome NIMBY puisque l'opposition ne se fait pas sur la base de la défense d'intérêts strictement privés.

Comme pour les autres formes d'énergie, la question de l'acceptation sociale apparaît (Newman, 2007), avec des différences classiques d'appréciation (Pagnussatt, et al., 2018) entre catégories d'usagers (locaux, néo-arrivants, etc.). Les méthodes utilisées pour recueillir les niveaux d'acceptation sont les mêmes que pour les autres formes d'énergie, principalement sociologiques et économétriques, pour essayer de quantifier une valeur difficile à mesurer (Q-Méthode, évaluations contingentes, commentaires de photographies, promenades, etc.).

Là encore, le paysage est mobilisé comme support de réconciliation potentiel, autour des paysages de l'énergie (Briffaud, 2014), comme la mise en lumière de la transition énergétique et la trace d'une nouvelle forme de nature créée par l'homme (Schöbel, et al., 2010), acceptée et assumée : « *il est possible d'aimer les paysages du zéro carbone* » (Sherren, et al., 2016).

Les installations hydroélectriques, du fait de leur maturité, montrent finalement comment pourrait être menée une politique de planification des paysages de l'énergie, avec pour objectif de générer des paysages dégageant leur esthétique propre, multifonctionnels et assumés voire appropriés par les usagers. Ces installations hydroélectriques ont ainsi généré des paysages culturels à part entière.

7.3.2. Focus sur le(s) guide(s) disponible(s)

Les quelques guides traitent essentiellement des petites centrales hydroélectriques et traitent très peu voire pas du tout de la question paysagère. Quand celle-ci est traitée, c'est sous l'angle « patrimoine et urbanisme », pour que l'installation soit en conformité réglementaire avec les textes régissant les autorisations en lien avec le droit du sol.

7.4. Synthèse des impacts de l'hydroélectricité

La qualification des impacts de l'hydroélectricité sur la biodiversité, les sols, les sédiments et les paysages est synthétisée ici, ainsi que les méthodologies d'évaluation rencontrées et le niveau de différenciation des impacts entre technologies et étapes du cycle de vie des infrastructures. La portée des impacts étudiés peut être locale et régionale (notamment pour les paysages et certains impacts liés au sol).

En ce qui concerne la qualification des impacts sur la biodiversité, les principaux impacts sont liés à des modifications profondes du fonctionnement des écosystèmes (cours d'eau), notamment pour les barrages à retenue ; ce qui en fait une EnR à part. Les impacts de l'hydroélectricité au fil de l'eau semblent plus limités en regard (perturbations plus faibles, mais réelles, de la continuité écologique ; modifications plus limitées des caractéristiques hydro-sédimentaires), mais des différences importantes existent entre les dispositifs de production d'hydroélectricité au fil de l'eau. Par ailleurs, c'est à l'échelle des bassins versants, et non uniquement à l'échelle d'une installation, que doivent être appréhendés ces impacts.

Les impacts recensés sur les sols et/ou sédiments sont davantage liés aux infrastructures et induisent notamment une altération de la qualité physique, chimique et biologique des sols et/ou sédiments mais également de leur structure. Les impacts les plus documentés et évalués sont relatifs aux surfaces utilisées puis aux impacts physiques, chimiques et enfin biologiques. D'une manière générale, les principaux impacts avérés et étudiés (en termes de volume de publications et de sévérité de l'impact), sont l'occupation des sols, la rétention des sédiments (notamment pour les installations avec réservoir), l'érosion des sols et le changement morphologique des terres. A noter que la typologie des sols n'est en général pas mentionnée dans les publications, et peut seulement être déduite des informations fournies sur les milieux étudiés.

Les impacts associés aux aménagements annexes sont moins étudiés par les publications dans le cas des sols, contrairement à la section relative aux paysages qui aborde de manière spécifique les constructions annexes (exemple : locaux techniques) avec leurs enjeux d'intégration.

Concernant les impacts sur les paysages, les publications s'attardent peu sur les impacts liés aux infrastructures elles-mêmes mais sont souvent relatif à l'acceptation sociale des barrages, et notamment concernant des projets de démantèlement. En effet, la maturité de cette EnR fait que l'acceptation sociale s'est « décantée » et que les ouvrages sont aujourd'hui largement appropriés par les populations : la prouesse technique initiale a fait place au développement de valeurs esthétiques et à la patrimonialisation et à la multifonctionnalité des installations (tourisme, pêche). Et ce à tel point que les projets de démantèlement rencontrent eux-aussi des oppositions. Les installations hydroélectriques, du fait de leur maturité, donnent finalement des clés pour comprendre comment pourrait être menée une politique de planification des paysages de l'énergie. Néanmoins, l'appropriation privée de ressources naturelles collectives est parfois reprochée.

En termes de méthodes d'évaluation des impacts sur la biodiversité, de nombreuses publications et recommandations méthodologiques internationales existent, et évaluent notamment les impacts d'emprise (notamment ennoiment des retenues), les impacts sur la continuité piscicole ainsi que les impacts cumulés à l'échelle des réseaux trophiques. Plusieurs méthodes d'inventaire et de suivi sont développées. Des recommandations méthodologiques ont été élaborées en France pour la prise en compte, dans le cadre de projets hydroélectriques, des composantes biologiques et du compartiment aquatique.

Concernant, les sols et/ou sédiments, des données satellites, des modèles (transport de sédiments, ACV) permettent une mesure réelle ou une estimation des impacts. Néanmoins, de nombreuses publications font référence à des résultats issus d'autres articles et ne détaillent pas la méthode utilisée. Par ailleurs, certains impacts ne sont pas explicitement décrits et aucune stratégie d'évaluation n'a été identifiée à date ; c'est par exemple le cas pour le changement d'affectation et l'artificialisation des sols. Enfin, peu de publications avec des données quantitatives traitent du cas français ou européen ; la plupart des documents s'intéressent aux projets américains.

Pour les impacts sur les paysages, les quelques guides identifiés traitent essentiellement des petites centrales hydroélectriques mais très peu voire pas du tout de la question paysagère. Des classifications existent néanmoins (généralement *a posteriori*) pour montrer comment jouer sur la visibilité ou non-visibilité de l'aménagement, au sens large, et des méthodes principalement sociologiques et économétriques sont utilisées pour essayer de quantifier des niveaux d'acceptation, difficiles à mesurer (Q-Méthode, évaluations contingentes, commentaires de photographies).

La comparaison entre différents projets de production d'hydroélectricité (par exemple, avec retenue) est peu évoquée dans la littérature. L'impact des installations avec réservoir est dans l'ensemble davantage étudiée que les centrales au fil de l'eau, principalement du fait de leur intensité distincte. De même, aucune analyse comparative entre grande et petite installations au fil de l'eau n'a été identifiée à date.

Enfin, en ce qui concerne les **impacts des différentes étapes du cycle de vie** des centrales sur les sols, la littérature s'intéresse principalement aux phases d'installation et d'exploitation. En revanche, en ce qui concerne les paysages, la phase de démantèlement est davantage abordée lorsqu'il s'agit d'acceptation sociale. Dans de nombreux pays, les projets de démantèlement de barrages rencontrent souvent une opposition pour conserver les retenues et les digues, preuve d'une appropriation forte et d'une intégration sociale de ces aménagements dans le paysage et par les usagers.

8. Impacts de la géothermie

Ce chapitre présente une synthèse des impacts de la géothermie sur la biodiversité, les sols et les paysages identifiés lors de l'analyse bibliographique. Une attention particulière a été portée à la prise en compte du contexte géographique, temporel et institutionnel. Les résultats qualitatifs et quantitatifs sont mis en avant autant que possible, et les points de divergence et de convergence entre publications sont identifiés.

La production d'énergie géothermique repose sur la récupération d'énergie thermique de la croûte terrestre, à des profondeurs variables (de 1 m à plus de 2 km pour la géothermie profonde) selon le type de technologie (géothermie de grande profondeur, géothermie de faible profondeur, géothermie de surface).

Les **installations géothermiques de grande profondeur** (haute énergie) sont généralement implantées dans des secteurs marqués par une forte activité tectonique (zone de subduction, failles) ou volcanique ; au niveau de ces secteurs, des réservoirs à haute température (entre 150 et 300°C) peuvent être exploités à des profondeurs de 2 à 5 km, parfois plus. La géothermie de grande profondeur est utilisée pour la production d'électricité. Ce type de géothermie est actuellement fortement étudié en France, avec plusieurs projets de développement. La technique EGS (*Enhanced Geothermal System*) a été mise en service pour la première fois en France en 2008 sur le pilote de Soultz-sous-Forêts, en Alsace, après 22 ans de recherches. Cette centrale injecte 1,5 MWh de production nette sur le réseau électrique. Les systèmes EGS concernent principalement la production d'électricité, mais il existe des projets de cogénération à l'étude, et ou de production de chaleur (par exemple la centrale de Rittershoffen depuis 2016).

Les **installations géothermiques** (basse et moyenne énergie) **de faible profondeur** (jusqu'à 2 000 m) sont plus largement réparties dans le monde. Elles utilisent des aquifères peu profonds pour échange de chaleur, avec des températures sources plus basses (comprises généralement entre 30 et 150 °C). Ce type de géothermie est généralement utilisé pour la production de chauffage, pour alimenter des réseaux de chaleur ou des grands ensembles de bâtiments. Il est très largement développé en France (bassin parisien notamment) et ailleurs en Europe (Allemagne en particulier).

Enfin, les **installations géothermiques de surface** (très basse énergie) se basent sur l'exploitation d'un différentiel de température dans les premières dizaines de mètres des sols, en vue d'une production de chauffage (ou de froid) à l'aide d'une pompe à chaleur (ou d'une pompe à chaleur réversible, fonctionnant comme climatiseur). Les forages sont installés en sous-sol, mais les pompes à chaleur restent des équipements installés en surface (pompes de circulation, échangeurs, ballons, etc.). Les capteurs peuvent être enterrés verticalement (dans le sous-sol) ou horizontalement (dans le sol), ou dans l'eau des nappes phréatiques (ADEME et BRGM, 2012) (voir Figure 9).

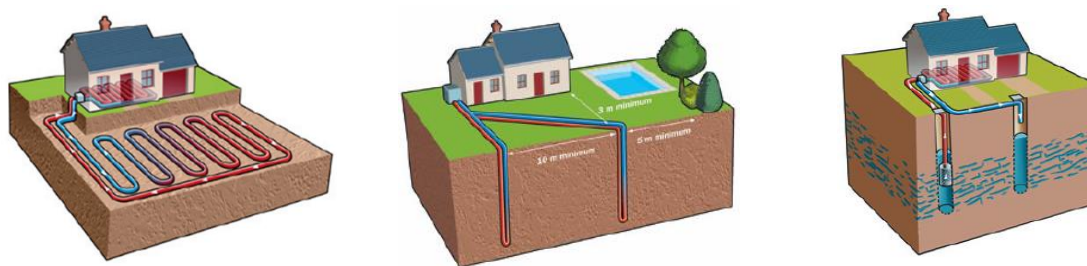


Figure 9 : Schémas des pompes à chaleur géothermiques avec des capteurs horizontaux (gauche), des sondes géothermiques verticales (milieu) ou des pompes à chaleur sur nappes ou sur aquifères (droite) (BRGM, 2010)

Les impacts de la géothermie traités dans la littérature concernent principalement des zones non urbanisées ou peu urbanisées, car les enjeux y sont *a priori* plus importants (intensité des impacts, potentiel de développement). Les projets développés en zones urbaines sont à l'inverse mieux intégrés au paysage existant, et génèrent des impacts moindres sur la biodiversité et les sols (impacts marginaux par rapport aux infrastructures déjà en place). Ils ne sont pas traités dans le présent chapitre.

Les documents analysés mettent tous en évidence des impacts environnementaux globalement réduits pour la production d'énergie par géothermie, très inférieurs aux impacts environnementaux de la production d'électricité par centrales gaz, charbon ou nucléaires, et considérés également faibles vis-à-vis d'autres sources de production d'énergie renouvelable (Lavoie, et al., 2015; Hastik, et al., 2015;

Bayer, et al., 2013; Akella, 2009; Kochan, et al., 2007; MIT, 2006; Kagel, et al., 2005; Kristmannsdóttir, et al., 2003).

8.1. Impacts de la géothermie sur la biodiversité

Les impacts environnementaux certifiés, probables ou envisagés des installations géothermiques sont globalement bien documentés, pour les impacts d'ordre physico-chimique (rejets gazeux ou aqueux), les impacts sur la qualité des eaux, les modifications sur les aquifères et la vie microbienne associée. En dehors de la vie microbienne et la faune et la flore des aquifères peu profonds, les ressources documentaires traitant des liens entre biodiversité et géothermie sont très peu nombreuses. Elles s'attachent généralement aux impacts d'emprise, lors de la construction, ainsi que de pollutions / altérations des masses d'eau en phase d'exploitation.

La majorité des documents analysés traite de la géothermie profonde, qui regroupe plusieurs types de centrales utilisées pour la production d'électricité (centrales flash⁹⁸, centrales binaires⁹⁹, etc.). La géothermie de faible profondeur (<400 m), principalement utilisée pour la production d'eau chaude ou d'eau froide, fait par ailleurs l'objet d'une attention importante en Europe (Allemagne notamment).

Dans le cadre de la recherche bibliographique menée dans le cadre de la présente mission, 45 documents traitant des liens entre biodiversité et géothermie ont été renseignés. Parmi ces documents, une vingtaine de publications a été analysée en détail.

8.1.1. Destruction / altération des habitats, modifications des milieux

Vis-à-vis de la biodiversité terrestre, les principaux effets liés aux installations géothermiques concernent la phase de construction.

La grande majorité des impacts sur l'environnement des installations géothermiques profondes aurait lieu lors de la phase d'installation (60 à 96 % des impacts environnementaux selon divers auteurs cités par Lavoie, et al. (2015)).

Les impacts en phase de construction sont principalement liés aux travaux de terrassement (défrichage, préparation des sols, construction des bâtiments) ainsi qu'aux opérations de forage de puits (bruit, utilisation de grandes quantités d'eau, risques de pollution) (Di Pippo, 2012)(Shortall, et al., 2015; MIT, 2006; Bayer, et al., 2013; Di Pippo, 2012). Les installations géothermiques sont généralement compactes, les centrales étant situées au plus près des puits afin de limiter les pertes énergétiques dans les transferts.

Les aménagements associés (route d'accès, raccordement électrique) engendrent également des impacts, non spécifiques, mais qui peuvent être sources d'impacts sur les milieux naturels. Les réseaux routiers, pipelines et lignes électriques sont associés à des phénomènes de fragmentation des milieux, plus marqués pour les réseaux routiers (les pipelines sont souvent hors sol) (Shortall, Davidsdóttir, & Axelsson, Geothermal energy for sustainable development: A review of sustainability impacts and assessment frameworks, 2015; Ostman, 2015; Di Pippo, 2012; Bayer, Rybach, Blum, & Brauchler, 2013).

Les installations géothermiques présentent des emprises très variables selon leur type et leurs caractéristiques, liée aux différentes infrastructures : centrale, tour de refroidissement, réseau de puits de forage, routes d'accès, pipelines et bassins (dans le cas de la géothermie profonde). L'aire de forage peut s'étendre sur une aire importante, généralement de plusieurs centaines d'hectares (Lavoie, Malo, & Raymond, 2015) mais les plus grandes installations s'étendent sur plusieurs dizaines de kilomètres carrés (Bayer, Rybach, Blum, & Brauchler, 2013; Quintero-Núñez, Cuaya-Simbro, & O.R. Garcia-Cueto, 2015; MIT, 2006). Les emprises surfaciques réellement artificialisées sont cependant nettement plus faibles, les puits de forage ne nécessitent généralement que des emprises réduites, de l'ordre de 200 à 2 500 m² (Kristmannsdóttir & Ármannsson, 2003).

⁹⁸ Les centrales de type flash exploitent des sites où le fluide géothermique se présente sous forme de liquide pressurisé ou de mélange liquide-vapeur. Ce fluide est directement utilisé pour faire fonctionner la centrale. L'électricité peut être produite par injection directe de vapeur dans une turbine haute pression (simple flash) ou haute et basse pression (double flash)

⁹⁹ Les centrales binaires font appel à un fluide thermodynamique secondaire, qui suit un cycle fermé, la chaudière étant constituée d'un échangeur de chaleur avec le fluide géothermique.

La littérature indique toutefois que les impacts en termes d'occupation des sols des installations géothermiques sont moyennes, avec des emprises au sol (tout compris) de l'ordre de 500 à 10 000 m²/MW, parfois davantage pour certains grands sites (Bayer, Rybach, Blum, & Brauchler, 2013). Des éléments complémentaires sont fournis en section 8.2.1 relative aux surfaces utilisées de sols.

Comme tout aménagement, les opérations de construction peuvent donc engendrer des impacts directs par destruction ou altération de milieux, destruction de stations d'espèces végétales, altération et fragmentation d'habitats pour la faune. Les niveaux d'impact peuvent être très variables selon les types d'installations géothermiques et les emprises nécessaires. Globalement, les impacts environnementaux des projets géothermiques sont très dépendants des conditions environnementales spécifiques à la zone d'implantation (Bayer, Rybach, Blum, & Brauchler, 2013). La littérature ne fournit pas d'impacts standards liés aux travaux de construction des installations géothermiques, de nombreux auteurs insistant au contraire sur les caractéristiques très spécifiques de chaque projet (Griebler, et al., 2016; Shortall, Davidsdottir, & Axelsson, Geothermal energy for sustainable development: A review of sustainability impacts and assessment frameworks, 2015; Hähnlein, Bayer, Ferguson, & Blum, 2013).

Les impacts d'emprises peuvent être importants dans des secteurs géographiques où les centrales géothermiques se développent dans des milieux à forte biodiversité, ce qui peut être le cas notamment dans les Caraïbes, en Asie ou en Afrique mais également dans d'autres secteurs d'exploitation comme la Nouvelle-Zélande ou l'Islande (Shortall, Davidsdottir, & Axelsson, Geothermal energy for sustainable development: A review of sustainability impacts and assessment frameworks, 2015; Gasparatos, Doll, Esteban, Ahmed, & Olang, 2017; Bayer, Rybach, Blum, & Brauchler, 2013; Mutia, 2010; Kagel, Bates, & Gawell, 2005). Les écosystèmes associés aux sites géothermiques abritent souvent des espèces floristiques et faunistiques particulières, adaptées aux conditions extrêmes de ces milieux (végétation et communauté bactérienne thermophile), avec parfois la présence d'espèces endémiques (Shortall, Davidsdottir, & Axelsson, Geothermal energy for sustainable development: A review of sustainability impacts and assessment frameworks, 2015; Hydro-Quebec, 2016). Les installations géothermiques profondes se retrouvent souvent dans des environnements particuliers, où les écosystèmes, peuplements de plantes et microorganismes sont souvent considérés comme fragiles et sensibles (Bayer, Rybach, Blum, & Brauchler, 2013).

L'un des avantages des centrales géothermiques par rapport à d'autres types de centrales est qu'il est possible de restaurer / reboiser une partie de la superficie du terrain après la réalisation des forages. Il est donc recommandé de prévoir des études de végétation et un plan de reboisement avant le début des travaux (Mutia et Simboyi, 2015 cités dans Lavoie et al. (Impacts environnementaux potentiels liés à la géothermie profonde, 2015)), afin de revenir à des milieux se rapprochant de l'environnement naturel du secteur, et ainsi de minimiser l'impact sur la faune et la flore locales. Dans certains cas, les projets de géothermie (notamment réseaux de chaleur) sont situés en contexte déjà urbanisé, limitant d'autant les impacts en termes de modification de milieux.

Bien que les impacts d'emprise, engendrant des destructions et altérations de milieux, soient souvent cités dans les publications analysées, aucune méthode générale ni indicateur spécifique à la géothermie n'ont été identifiés. Ceci est à rattacher au caractère non spécifique de ces impacts à la géothermie ainsi qu'à la grande variabilité des situations, types d'installations, milieux et espèces rencontrés. Le cadre réglementaire (évaluation environnementale, étude d'impact pour les projets qui y sont soumis) doit permettre une prise en considération adéquate de ces aspects.

8.1.2. Dérangement des individus et modification des activités

Bruit et vibrations

Pendant la réalisation de forage pour la géothermie profonde, des émissions sonores non négligeables sont engendrées, de l'ordre de 90 dB à 120 dB (Shortall, Davidsdottir, & Axelsson, Geothermal energy for sustainable development: A review of sustainability impacts and assessment frameworks, 2015; Kristmannsdóttir & Ármannsson, 2003). La littérature analysée dans le cadre de l'étude ne fournit cependant pas d'analyse des effets de ces bruits de travaux sur la biodiversité (l'angle d'analyse étant davantage la santé humaine). De tels niveaux de bruits peuvent engendrer des perturbations localisées de la faune à proximité des forages, lors de la réalisation de ceux-ci. Les autres activités de construction et le passage d'engins engendrent également des bruits, de plus faible intensité.

Outre le bruit, la réalisation de forages peut engendrer des vibrations localisées. Ce point n'est pas non plus développé dans la littérature vis-à-vis de ses effets sur la biodiversité.

Une installation géothermique de grande profondeur peut générer, en période d'exploitation, des bruits compris entre 71 et 83 dB au niveau des installations. En phase d'exploitation, les bruits peuvent provenir de différents composants (turbines, transformateurs, séparateurs, tours de refroidissement, etc.) (Shortall, Davidsdottir, & Axelsson, Geothermal energy for sustainable development: A review of sustainability impacts and assessment frameworks, 2015; Hunt, 2001).

Perturbations des comportements et des activités

Outre les bruits et vibrations engendrés lors des travaux de construction (forage notamment) la littérature ne met pas en évidence de gêne particulière de la présence (phase d'exploitation) des centrales géothermiques sur la faune.

Les perturbations de la faune, dues à la présence des installations ou au bruit, sont très faiblement documentées dans la littérature exploitée, spécifique à la géothermie. Aucun auteur ne relève d'enjeu particulier sur ces aspects. Des travaux complémentaires pourraient être menés pour améliorer la compréhension de ces impacts, en s'inspirant de méthodes développées dans d'autres secteurs (par exemple, trafic routier).

8.1.3. Blessures ou mortalité d'individus

En dehors des risques de blessures ou mortalité d'individus d'espèces de faune et de flore lors des travaux (comme toute construction), la littérature ne relève pas de risques spécifiques de blessure ou mortalité en lien avec l'exploitation de centrales géothermiques.

8.1.4. Modifications des paramètres environnementaux

Outre les emprises directes lors de la construction, les principaux impacts environnementaux des centrales géothermiques concernent l'émission de polluants ainsi que les possibles altérations des milieux aqueux dans les aquifères et réservoirs exploités (quantité, qualité, température).

Pollutions et modifications physico-chimiques

Les risques de pollution et d'émission de composants chimiques sont très variables selon les types d'installations géothermiques.

En cas de circuit fermé (centrale binaire pour la géothermie profonde, pompe à chaleur pour la géothermie basse température), c'est un fluide caloporteur en circuit fermé qui assure l'échange de chaleur. Dans ce cas, les seuls risques de pollution peuvent provenir d'une rupture accidentelle des circuits, susceptible de libérer ce fluide. La majorité des auteurs considère que ces technologies en circuits fermés présentent des risques de pollution minimales. Ce type de centrale permet en effet d'éviter les risques liés à l'entreposage, au traitement et au transport d'eaux géothermales (Lavoie, Malo, & Raymond, 2015). Toutes les centrales sont sujettes à une contamination de l'eau souterraine à travers un coffrage non-étanche, ou à un déversement dû à un bris d'équipement. Bien que le risque d'un tel événement soit bien réel, une **synthèse récente indique qu'aucune contamination due à un coffrage défectueux n'a été répertoriée** (Lavoie, Malo, & Raymond, 2015).

Des risques de pollution plus marqués sont liés aux installations de géothermie profonde de type flash ou *dry steam* (vapeur). 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, potentiellement, d'autres gaz (H₂, O₂, N₂) et des éléments (Rn, He, As, Hg, B) dont la composition et la teneur varient selon les sites géothermiques (Shortall, Davidsdottir, & Axelsson, Geothermal energy for sustainable development: A review of sustainability impacts and assessment frameworks, 2015; Gasparatos, Doll, Esteban, Ahmed, & Olang, 2017; Quintero-Núñez, Cuaya-Simbro, & O.R. Garcia-Cueto, 2015; Bravi & Basosi, 2014; Bayer, Rybach, Blum, & Brauchler, 2013; MIT, 2006).

Des risques de pollution de l'eau existent, dus à la contamination de l'eau par des minéraux dissous (arsenic, bore) qui peuvent contaminer les eaux de surface (écoulement de surface). Des pollutions atmosphériques localisées au sulfure d'hydrogène ont également été notées sur certains sites géothermiques (Gasparatos, Doll, Esteban, Ahmed, & Olang, 2017; Bayer, Rybach, Blum, & Brauchler, 2013). Le sulfure d'hydrogène, caractéristique des champs hydrothermaux, est toxique pour la faune aquatique à des concentrations de 20 ppm (Adaweh et Idleh, 2015 cité dans Lavoie, et al. (Impacts environnementaux potentiels liés à la géothermie profonde, 2015)). Ces risques sont cependant contrôlés par la mise en place de bassins de rétention et de gestion des fluides.

Les lagon d'évaporation peuvent engendrer des pollutions du sol et des aquifères superficiels proches, en raison de la salinité élevée des fluides géothermaux, et peuvent engendrer des pollutions importantes de ces systèmes aquatiques (Quintero-Núñez, Cuaya-Simbro, & O.R. Garcia-Cueto, 2015). Des éléments complémentaires, spécifiques aux impacts sur les sols, sont présentés en section 8.2.3.

La réinjection des fluides géothermiques semble limiter ces risques de pollution (Hastik, S., & Geitner C., 2015).

Au-delà d'un listing de pollutions et altérations de milieux possiblement engendrées par l'exploitation géothermique, les publications analysées ne fournissent pas de méthodes ni indicateurs spécifiques aux effets sur la biodiversité. La réalité des impacts environnementaux est extrêmement variable selon les sites, les techniques, la composition des fluides géothermiques. Les risques liés aux pollutions font l'objet d'une attention particulière et sont en pratique bien contrôlés.

Changement de température

Les conséquences des échanges de chaleur sur les écosystèmes se développant dans les aquifères et réservoirs exploités sont globalement peu traitées dans les publications analysées.

Quelques documents soulèvent cependant des risques d'altération des conditions de vie des communautés microbiennes se développant dans les aquifères peu profonds exploités en géothermie basse température (Griebler, et al., 2016; Hähnlein, Bayer, & Blum, International legal status of the use of shallow geothermal energy, 2010).

Une étude récente en Allemagne (Griebler, et al., 2016) a notamment mis en évidence qu'une augmentation modérée de la température des eaux souterraines sur des systèmes contaminés avec des nutriments, matières organiques ou métaux lourds, pouvait engendrer des modifications des processus biologiques, ralentir (voire stopper) le développement de certaines bactéries au détriment d'autres et provoquer des altérations des écosystèmes souterrains sur le long-terme. Hähnlein, et al. (International legal status of the use of shallow geothermal energy, 2010) indiquent cependant qu'il semble exister une marge supportable de variations de température par réchauffement ou refroidissement.

Les risques d'impacts sur la biodiversité des ressources thermales sont cependant globalement mal appréhendés en lien avec les connaissances réduites sur ces écosystèmes particuliers, complexes à étudier.

8.1.5. Méthodes d'évaluation des impacts, méthodes de suivi et incertitudes

Méthodes

Les documents traités dans le cadre de l'analyse bibliographique n'ont pas permis de mettre en évidence de guides ou recommandations méthodologiques concernant l'évaluation des impacts des installations géothermiques sur la biodiversité.

La majorité des documents traite des effets sur l'eau (quantité, qualité et température), des modifications de compositions physico-chimiques des milieux (notamment aquifères).

Des méthodes visant à aider à la planification / localisation optimale des centrales géothermiques sont développées selon une approche principalement éco-paysagère.

Une méthode, le *Spatial Landscape Impact Assessment* (SLIA) (Ostman, 2015), développée en Islande, utilise 6 critères, ayant trait principalement au paysage, à la configuration des installations et à la

biodiversité : fragmentation (nombre de patchs créés) ; aire totale du projet (incluant toutes les infrastructures) ; visibilité ; degré d'étalement du projet ; réduction d'habitats sauvages ; et conflits avec les aires protégées.

Concernant la géothermie de faible profondeur, généralement basée sur des installations de plus petites dimensions, mais plus nombreuses et largement réparties que les centrales géothermiques de production d'électricité, Haehnlein, et al. (International legal status of the use of shallow geothermal energy, 2010) indiquant qu'à leur avis, en l'état des connaissances, il semble impossible de définir une procédure généralisable pour la réalisation d'évaluation en impacts environnementaux de ces installations. En effet, ces auteurs précisent que la manière de réaliser des évaluations environnementales, et l'importance des moyens associés, dépendent de nombreux paramètres dont le type et les dimensions des installations.

Les services écosystémiques sont de plus en plus étudiés. Récemment, une approche de quantification et d'évaluation des impacts sur les services écosystémiques a été proposée (Cook, Davíðsdóttir, & Kristófersson, 2017).

Incertitudes

Bien que les effets envisageables soient bien catégorisés et que les processus en cause soient identifiés, de nombreuses incertitudes demeurent sur les impacts des installations géothermiques sur la biodiversité, notamment en raison des connaissances limitées sur la composition et la biodiversité des ressources thermales souterraines (Kochan & Grant, 2007). Les études dans ces écosystèmes profonds nécessitent des investissements financiers très importants.

Les exemples fournis par (Griebler, et al., 2016) sur la géothermie de faible profondeur soulèvent les incertitudes sur les évolutions et conséquences de modifications des aquifères (température) et la vie associée. Les impacts environnementaux sur le long-terme, notamment liés aux phénomènes de transport de chaleur dans les aquifères exploités sont également relevés comme incertains (Hähnlein, Bayer, & Blum, International legal status of the use of shallow geothermal energy, 2010).

Indicateurs

Les documents traités dans le cadre de l'analyse bibliographique n'ont pas permis de mettre en évidence des indicateurs utilisés de façon régulière pour l'évaluation des impacts sur la biodiversité des installations géothermiques.

Les emprises (emprises pour les puits et pour l'ensemble de l'installation) sont cependant souvent citées dans les documents analysés, de même que les volumes d'eau utilisés.

Il semble par ailleurs difficile d'envisager l'élaboration d'indicateurs généralisables, étant donné les impacts spécifiques à chaque installation, nécessitant une approche au cas par cas (Shortall, Davíðsdóttir, & Axelsson, Geothermal energy for sustainable development: A review of sustainability impacts and assessment frameworks, 2015). Ces auteurs appellent l'élaboration d'un ensemble d'indicateurs spécifiques à la géothermie (actuellement non existants).

Un rapport universitaire récent élaboré en Islande propose une méthode d'évaluation des impacts de la géothermie profonde, basé sur 6 indicateurs (voir précédemment méthode *Spatial Landscape Impact Assessment*) (Ostman, 2015). L'indicateur le plus généralisable proposé par cet auteur est l'étalement des projets géothermiques (*geothermal sprawl*) : quantité de terrain nécessaire (km²) pour la production d'un TeraWatt-heure par an. Un autre critère concerne la superficie de milieux naturels et des zones protégées, mais à une échelle d'analyse large (planification).

Les impacts sur la biodiversité des installations géothermiques ne ressortent pas directement comme un enjeu traité. L'essentiel des publications analysées s'intéressant aux impacts sur l'eau, les modifications de température dans les réservoirs et les risques de pollution, un lien indirect est cependant évident. La question des emprises et des destructions directes de milieux est globalement peu abordée dans la littérature analysée, qui s'intéresse davantage aux impacts en phase d'exploitation ; il s'agit cependant, comme pour tout aménagement, d'un enjeu important à considérer (qualité des milieux impactés, rareté, intérêts biologiques et fonctionnels). Quelques publications traitent, pour la géothermie basse température, des effets sur la biodiversité des réservoirs exploités. Pour autant, les éléments d'informations concernant

les impacts des installations géothermiques (quel que soit leur type) demeurent très peu développés, sinon non traités.

8.2. Impacts de la géothermie sur les sols

La majorité des publications analysées à l'issue de la revue de littérature traite des installations géothermiques profondes, et dans une moindre mesure des installations géothermiques de très basse température (technologies de surface). A noter qu'aucune des publications ne traite de thalassothermie ou de cloacothermie.

Ainsi que précisé en introduction de ce chapitre, les impacts traités dans la littérature concernent principalement des zones non urbanisées ou peu urbanisées, car les enjeux y sont *a priori* plus importants (intensité des impacts, potentiel de développement). Ces éléments doivent être pris en compte afin d'éviter toute extrapolation à des projets en milieu urbanisé (impacts marginaux par rapport aux infrastructures déjà en place).

La production d'énergie géothermique requiert des infrastructures distinctes selon le type de technologie mise en œuvre. Les impacts sur les sols diffèrent fortement en fonction du type d'installation, cependant le type de technologie n'est pas toujours mentionné dans les publications.

Les typologies de sols ne sont pas mentionnées dans les publications, sauf exception (par exemple, impacts de la géothermie volcanique sur un sol rocheux friable). Le type de sol peut seulement être déduit des informations fournies concernant les milieux étudiés.

8.2.1. Impacts en termes de surfaces de sols

Les impacts de la géothermie en termes de surfaces de sols utilisés sont traités dans la majorité des publications analysées, et sont principalement relatifs à la surface d'occupation des sols et, dans une moindre mesure, aux questions de changement d'affectation et de co-usage des sols.

La majorité des installations de production d'énergie géothermique sont installées en sous-sol. Sur le site d'exploitation, l'**occupation des sols** en surface se réduit au centre de contrôle, aux turbines et tours de refroidissement, avec parfois un bassin de récupération des eaux usées (pour les technologies de profondeur).

La phase de construction d'une centrale géothermique requiert une surface plus importante, du fait de la construction des infrastructures, chemins d'accès et puits de forage, mais celle-ci peut être réaménagée suite à la mise en activité de la centrale. Ainsi, Lavoie, et al. (Impacts environnementaux potentiels liés à la géothermie profonde, 2015) estiment que la centrale géothermique étudiée représente 2 % de la surface totale initialement occupée sur site pour la construction de l'installation (géothermie profonde), sans précision sur la méthode d'évaluation.

La plupart des publications analysées ne font pas état de recherches dédiées à la surface d'occupation des sols par une centrale géothermique, et réutilisent des valeurs déjà existantes dans la littérature. Certaines publications fournissent cependant des éléments quantifiés quant à l'impact sur l'occupation des sols, avec peu d'homogénéité dans les unités ou les valeurs (ramenées à une même unité). Ainsi, McDonald, et al. (Energy Sprawl or Energy Efficiency: Climate Policy Impacts on Natural Habitat for the United States of America, 2009) fournissent une indication de la surface totale sur site rapportée à la puissance annuelle fournie (1,0 à 13,9 km²/TWh/an) ; d'autres publications estiment la surface par unité d'énergie produite (Hadian, Madani, Gonzalez, Mokhtari, & Mirchi, 2014), par unité de puissance (Hong, Bradshaw, & Brook, 2013) ou une surface moyenne (par exemple, 5 à 10 km² pour la mise en place d'une installation géothermique profonde) (Bayer, Rybach, Blum, & Brauchler, 2013; Quintero-Núñez, Cuaya-Simbro, & O.R. Garcia-Cueto, 2015; MIT, 2006; Lavoie, Malo, & Raymond, 2015).

Dans l'ensemble, la surface de sols impactée par l'installation de la centrale varie selon le type de technologie et l'étape du projet. Pour la géothermie de surface horizontale, le système de récupération d'énergie (tubes horizontaux enterrés) requiert des surfaces plus importantes que pour la géothermie verticale, d'autant plus lorsqu'on ramène la surface occupée à puissance équivalente. Ces différences sont réduites lors de l'exploitation du site, puisque les sols en surface peuvent être dédiés à d'autres usages.

Le démantèlement d'une installation géothermique nécessite d'extraire le fluide caloporteur (dans le cas d'un circuit fermé, par exemple les sondes géothermiques verticales) et de boucher les puits de forage (dans le cadre d'installation en profondeur de basse, moyenne ou haute énergie). La surface alors requise est équivalente ou moindre à celle identifiée lors de l'installation. A noter que l'impact lors des phases d'extraction des matériaux ainsi que pour la fin de vie des structures n'est pas mentionné dans la littérature analysée.

Les impacts relatifs à la surface de sols sous emprise d'une centrale géothermique varient selon le type de technologie et l'étape du projet. Ainsi lors de la phase d'exploitation, la majorité des structures étant sous la surface, l'emprise prolongée sur les sols est négligeable en comparaison à d'autres EnR. Dans la littérature, le manque d'homogénéité dans les unités, le peu d'informations sur le type de technologie couverte et l'étape considérée limitent la comparabilité des résultats.

La question du **changement d'affectation** des sols peut se poser lors de la construction d'une installation géothermique, dans le cas où les surfaces dédiées à l'installation de la centrale le sont au dépend d'autres activités ou usages, ou alors ne sont pas valorisées au travers d'espaces naturels, par exemple forestier (Shortall, Davidsdottir, & Axelsson, Geothermal energy for sustainable development: A review of sustainability impacts and assessment frameworks, 2015). La publication évoquant ces impacts précise toutefois qu'ils sont moindres que dans le cas d'autres EnR et temporaires, en raison de la plus faible emprise au sol, lors de la phase d'exploitation : suite à la phase de construction des forages, le terrain peut être revégétalisé ou affecté à d'autres usages (co-usage).

Le changement d'affectation des sols est un enjeu négligeable lorsque les centrales sont implantées sur des sols n'étant jusque-là pas valorisés à travers un autre usage, par exemple des friches urbaines ou industrielles. Dans d'autres cas, des sols initialement peu propices à l'agriculture peuvent être utilisés pour installer des cultures sous serres (Arnórsson, Thórhallsson, & Stefánsson, 2015). Le changement d'affectation et l'artificialisation des sols ne sont pas un enjeu dans le cadre d'une installation géothermique se faisant en espace urbain (par exemple un réseau de chaleur pour une collectivité, impacts marginaux par rapport aux infrastructures déjà en place).

Dans le cas des installations géothermiques, du fait de leur relative faible densité d'éléments construits, le **co-usage** des sols (avec l'élevage ou les grandes cultures par exemple) est possible et apparaît comme un atout de cette énergie. La production d'énergie géothermique ne semble pas entrer en compétition avec les activités comme l'agriculture, qui peuvent être maintenues au-dessus des réservoirs (Hydro-Quebec, 2016). D'autres auteurs proposent de surélever les tuyaux de façon à laisser l'espace libre à d'autres activités d'agriculture ou de pâturage (Lavoie, Malo, & Raymond, 2015). Se pose cependant la question de la comptabilisation de la surface de sol en co-usage (hors localisation au sol des infrastructures électriques, des chemins d'accès, des stationnements et des zones de manœuvre).

Le changement d'affectation peut être observé de façon temporaire lors de l'installation d'une centrale géothermique de grande dimension. Bien qu'il ne fasse pas l'objet d'une évaluation dans la littérature, son impact est négligeable lors de la production d'énergie, notamment au vu des possibilités de co-usage des sols qui semblent faire consensus dans la littérature analysée.

A noter que ces impacts sont peu abordés dans la littérature, et qu'ils ne font pas l'objet d'une évaluation

8.2.2. Impacts physiques sur les sols

La plupart des impacts physiques mentionnés dans la littérature sont relatifs aux étapes d'installation et de production d'énergie géothermique. Les impacts physiques avérés, applicables à toute centrale géothermique, apparaissent négligeables. Toutefois, la littérature fait mention de risques d'impacts, pouvant survenir en cas d'accidents ou d'une mauvaise planification au préalable, donc non généralisables à tout système de production d'énergie géothermique. Par exemple, pour les projets de grande profondeur, le risque de fracturation hydraulique est d'autant plus important.

Afin d'évaluer les impacts sur les sols et ainsi les réduire au mieux en choisissant l'emplacement le plus approprié, différentes études sont réalisées avant la mise en place d'une centrale géothermique. Des **études thermiques** et de la **topographie du sous-sol** sont réalisées pour évaluer la faisabilité du

projet et choisir l'aquifère ou la sonde adaptée. Des études approfondies du sous-sol sont alors réalisées, en particulier sur le contexte géologique et les caractéristiques hydrologiques (dans le cas d'un aquifère), et des simulations effectuées sur ordinateur afin de prévoir l'impact du forage qui sera réalisé.

Plusieurs cas d'**affaissements** ou de **gonflements de terrain** sont mentionnés dans la littérature. Dans le cas des technologies verticales (sondes géothermiques ou forages sur nappes aquifères), la mise en communication d'aquifères avec des zones anhydrites peut entraîner un gonflement au contact de l'eau, qui se répercute en surface (Bezelgues-Courtade & Durst, 2009). Des gonflements peuvent aussi se produire lors de la réinjection de fluide géothermique dans le puits de forage, pour un système de géothermie profonde ou volcanique (Arnórsson, Thórhallsson, & Stefánsson, 2015). La réalité se confronte rarement à ce type de situations grâce aux cartographies des sols faites lors des études préliminaires. Dans certains cas, lorsque les contraintes dans le sous-sol étaient trop importantes, des ruptures de roches ont pu créer des petits tremblements de terres (Arnórsson, Thórhallsson, & Stefánsson, 2015). Ces impacts sont également observés lorsque les matériaux utilisés sont de mauvaise qualité ou non adaptés à l'environnement (Bezelgues-Courtade & Durst, 2009). Les affaissements en surface peuvent à l'inverse survenir lorsqu'une nappe aquifère est percée et entre en contact avec une zone salifère (riche en sels) : les sels vont alors se dissoudre et créer des cavités dans le sous-sol entraînant un affaissement. Un guide des bonnes pratiques sur les retours d'expérience des forages géothermiques profonds a ainsi été publié en 2016 par l'ADEME et le BRGM, ce qui permet de limiter les manipulations à risque et minimise de type d'accidents sur site.

Ces risques sont observés dans plusieurs cas d'étude, au travers d'enregistrements du niveau du sol pendant une période donnée. Ces cas n'en restent pas moins des incidents isolés, et derrière chacun des phénomènes recensés et/ou étudiés on observe divers accidents sur site. Une élévation du sol de 26 cm a été observée en région de Staufen-en-Brisgau (Allemagne), suite à un bouleversement des nappes d'eau souterraines qui a entraîné l'hydratation d'une zone anhydrite, créant ainsi du gypse et causant un gonflement de 61 % de volume en profondeur, de façon prolongée. Le sol de la région de Hilsprich (France) s'affaisse de 7,5 cm/an suite à une mauvaise cimentation du forage entraînant la dissolution de formations de sels (Bezelgues-Courtade & Durst, 2009). On peut citer au même titre le cas de Lochwiller, dont le sol urbain se soulève de plusieurs centimètres par an, suite à un mauvais colmatage au ciment d'un forage géothermique. D'autres cas d'affaissements sont mentionnés dans la littérature, par exemple lorsque le fluide de centrales géothermiques profondes est extrait plus vite qu'il n'est réinjecté dans les nappes, créant des variations de contraintes dans les réservoirs et des instabilités en surface. Là aussi, l'affaissement est mis en évidence par l'étude du niveau du sol : à Wairakei (Nouvelle Zélande), le sol s'est enfoncé localement de 15 m (0,4 mètres/an) (Kristmannsdóttir & Ármannsson, 2003).

Les risques d'affaissement et de gonflement de terrain sont avérés, bien que non généralisables à tous les sites géothermiques (fonction du type de sol et du sous-sol, de technologie, etc.). De plus, les études topographiques et les cartographies menées pendant la phase d'étude des projets permettent de limiter les risques associés.

La remontée de fluide caloporteur (depuis une zone à plus haute température, en profondeur ou près de la surface) peut entraîner un **réchauffement localisé du sol** en surface. Dans la majorité des cas, le réchauffement des terres autour des conduits de l'installation est considéré négligeable (augmentation inférieure à un degré sur les mètres de sols autour des conduits, même après plusieurs années d'exploitation) (Bezelgues-Courtade & Durst, 2009). Une publication met cependant en évidence, par modélisation à l'aide du logiciel FEFLOW, un réchauffement du sol pour un site de géothermie très basse température (champ de sondes géothermiques verticales). La surélévation de la température est de 1 °C dans un rayon de 10 mètres autour du champ de sondes (après 25 ans d'utilisation), s'atténuant avec la distance et selon la profondeur (Bezelgues-Courtade & Durst, 2009). Dans le cas de la géothermie profonde, il est fait mention d'un réchauffement localisé des sols en cas de rejet accidentel de fluide usagé en surface (Arnórsson, Thórhallsson, & Stefánsson, 2015).

Lorsqu'un réchauffement local du sol est effectivement constaté, la biologie et les services écosystémiques des sols à proximité peuvent s'en trouver en partie impactés (voir section 8.1.4). Il est possible de tirer parti de ce phénomène et d'utiliser l'augmentation locale de la température pour d'autres usages, comme l'agriculture sous serre (Hydro-Quebec, 2016).

Il existe peu d'informations sur le réchauffement du sol dans la littérature. Il ne semble pas y avoir de consensus concernant le caractère négligeable ou non de cet impact, et son intensité

semble varier selon le type de technologie considéré (a priori plus important pour la géothermie de profondeur, au vu des températures auxquelles sont échangés les fluides).

Enfin, et comme pour tous travaux d'aménagement, l'installation des structures et le déplacement régulier d'équipements lourds contribuent à une **compaction des sols**. Lors du chantier de mise en place d'une installation d'EnR, diverses aires temporaires sont indispensables (aires de stockage, etc.). De même sont nécessaires de façon permanente, des fondations pour certaines installations et des chemins d'accès. Généralement les sols y sont compactés (soit par le passage répété d'engins lourds, soit pour assurer la stabilité du terrain) (Bradley & Biol, 2010; Lovich & Ennen, Wildlife Conservation and Solar Energy Development in the Desert Southwest, United States, 2011; Lovich & Ennen, Assessing the state of knowledge of utility-scale wind energy development and operation on non-volant terrestrial and marine wildlife, 2013).

Le sol perd ainsi son aération et sa capacité de rétention d'eau (Shortall, Davidsdottir, & Axelsson, Geothermal energy for sustainable development: A review of sustainability impacts and assessment frameworks, 2015). Les opérations de mise à nue et la diminution de la capacité de rétention des sols lors de la construction sont des facteurs d'augmentation du **ruissellement de surface** et d'une **érosion des sols** (Lavoie, Malo, & Raymond, 2015). Si ces impacts sont souvent mentionnés comme conséquence de la construction d'une centrale, ils ne semblent pas faire l'objet d'une évaluation plus approfondie dans la littérature.

Parmi les accidents mentionnés dans la littérature, les risques de glissements de terrain ou d'inondations existent dans les cas peu fréquents où ils n'ont pas été identifiés au préalable par une cartographie des risques géologiques. Un glissement de terrain est favorisé par une érosion accélérée, par exemple dans le cas combinant roches ductiles, fortes pluies et terrain pentu (étude de cas pour la géothermie volcanique) (Arnórsson, Thórhallsson, & Stefánsson, 2015). Dans le cas d'un forage de puit se trouvant sur un aquifère artésien, pouvant fournir de l'eau jaillissant naturellement, il existe un risque d'inondation. Le risque d'inondations peut être périodique, pendant la phase d'utilisation de la centrale (par exemple dans le cas de fortes pluies ou de fonte de neige) (Bezelgues-Courtade & Durst, 2009). Ces cas peuvent être évités grâce aux études préliminaires de terrain.

Les impacts physiques avérés sur les sols sont négligeables, et peu étudiés dans la littérature. Les risques d'affaissement, de gonflement ou de compaction observés dans certains cas sont mentionnés, mais leur occurrence reste faible, particulièrement lorsque des études préliminaires de terrain sont effectuées.

8.2.3. Impacts chimiques sur les sols

En raison des substances utilisées pour la production d'énergie géothermique, leur fonctionnement peut être une source potentielle de **pollution chimique** des sols, bien que l'occurrence de tels cas reste faible. Ces risques d'impacts sont mis en évidence dans la littérature depuis une quarantaine d'années. Deux principales sources de contamination accidentelle peuvent intervenir : en provenance des fluides caloporteurs des installations de surface ou à cause des fluides (eau contenue dans les réservoirs) géothermiques chargés en sels et métaux lourds pour la géothermie en profondeur.

Dans le premier cas, les pompes à chaleur utilisent des fluides caloporteurs afin de transférer l'énergie thermique du sous-sol vers la surface (pour réchauffer ou climatiser l'intérieur d'une maison) ; ces fluides sont un mélange d'eau, d'antigel et d'adjuvants. Le risque de pollution de sols existe lorsque le circuit contenant le fluide fuit ou est rompu (suite à un affaissement du sol par exemple) (Bezelgues-Courtade & Durst, 2009). Toutefois, la norme française impose au liquide caloporteur de n'avoir aucune répercussion sur l'environnement en cas de fuite (biodégradabilité). De plus, les cas de fuites ne sont pas usuels, ils résultent d'accidents et non pas d'une exploitation standard.

Dans le cas de la géothermie en profondeur, il existe un risque de contamination via le possible rejet dans l'environnement de fluides géothermiques, chargés en sels (chlorure de calcium et de sodium principalement) et en métaux lourds (mercure, arsenic etc.). Ces éléments, présents dans les vapeurs résiduelles des centrales, sont émis à l'état gazeux depuis les réservoirs d'eaux usées et retombent dans l'environnement (Pastrana-Corral & Wakida F.T., 2016). Ils peuvent aussi être source de contamination lorsque le fluide géothermique n'est pas réinjecté dans le réservoir mais stocké en surface, avec un risque d'infiltration des cours d'eau et les terres agricoles environnantes (Mattigod & Page, 1983). Plusieurs études mettent en évidence une concentration anormalement élevée en

éléments toxiques dans les sols ou cours d'eau environnant des centrales géothermiques profondes, dans le cas de mauvaise gestion des déchets : teneur en mercure supérieure à la moyenne (observée dans des échantillons de sols dans un périmètre de 7,5 km autour de la centrale près de Cerro Prieto, Mexique) (Pastrana-Corral & Wakida F.T., 2016), concentration d'arsenic au-dessus de la moyenne (dans la rivière Waikato, Nouvelle Zélande à proximité d'une usine géothermique) (Gasparatos, Doll, Esteban, Ahmed, & Olang, 2017), présence de bore, phytotoxique, dans les terres agricoles proches d'une centrale géothermique (Mattigod & Page, 1983). Une revue de littérature relative à la pollution des sols en géothermie profonde établit que pour 1 MWh d'énergie produit par une centrale, il est émis en moyenne 0,1 kg de mercure, entre 0,3 et 1,0 kg d'acide sulfurique et entre 0,08 et 0,8 kg d'arsenic (Manzella, et al., 2018). Cependant, ces études n'en restent pas moins des cas isolés qui semblent résulter d'incidents sur site.

Les risques de pollution chimique des sols varient selon le type de technologie considéré. S'ils sont mentionnés dans la littérature, ils résultent en général d'incidents spécifiques ou d'une mauvaise gestion des déchets et rejets sur site, et ne sont pas applicables à l'ensemble des centrales géothermiques. De plus, les normes françaises limitent l'impact sur les sols lors de fuites (biodégradabilité du fluide caloporteur).

A noter que les impacts chimiques sur les sols générés lors des phases amont (extraction de matériaux) et aval (traitement des infrastructures en fin de vie) de la production d'énergie géothermique ne semblent pas étudiés dans la littérature.

8.2.4. Impacts biologiques sur les sols et services écosystémiques

Bien que plusieurs études s'intéressent à l'impact microbiologique de la géothermie au sein des aquifères, les impacts biologiques sur les sols et les services écosystémiques en surface sont très rarement mentionnés.

8.3. Impacts de la géothermie sur les paysages

Seules 7 publications traitent des impacts paysagers de la géothermie, dont 4 traitent spécifiquement du sujet. Les publications les plus précises étant localisées au Japon, en Islande et à Hawaï, les résultats apportés sont peu représentatifs pour la France, notamment du fait de la rareté en France de paysages très sauvages et peu anthropisés.

8.3.1. Impacts visuels et médiatisation

L'impact sur les paysages des centrales géothermiques peut être important dans le cas où ces dernières sont visibles à distance. Aussi, les tours, fumeroles s'en dégageant et pipelines impactent des paysages souvent sauvages et préservés, vecteurs de la représentation paysagère appelée « *wilderness* » (Shortall & Kharrazi, Cultural factors of sustainable energy development: A case study of geothermal energy in Iceland and Japan, 2017). Cependant ce type de production d'électricité nécessite des infrastructures qui sont plus adaptables à leur environnement que les autres formes de production d'énergie grâce à des mesures d'harmonisation (peinture, enfouissement des pipelines, etc.) plus facilement applicables (Lavoie, Malo, & Raymond, 2015).

Dans les trois publications généralistes des énergies renouvelables, la géothermie n'est que rarement mentionnée, le cas échéant, sous l'angle de l'acceptabilité. Ainsi le potentiel conflictuel de cette énergie est faible, relativement à l'éolien et au photovoltaïque (Brühne, Tempel, & Deshaies, 2015). Cependant, ces installations étant rares, la médiatisation peut être importante, diffusée largement et donc générer des phénomènes de conflit à plus large échelle. La vigueur des phénomènes de rejets pourrait être proportionnelle au caractère naturel et préservé des paysages concernés.

Deux facteurs peuvent expliquer le peu de données disponibles concernant la géothermie et le paysage. Premièrement cette énergie est pour l'instant peu développée en France (Brühne, Tempel, & Deshaies, 2015) et son développement restera surement très contraint. Deuxièmement cette énergie est moins visible dans le paysage que des énergies beaucoup plus prégnantes comme l'énergie éolienne, avec emprise au sol faible.

Les impacts de la géothermie sur le paysage sont comme pour l'ensemble des EnR, souvent abordés selon l'angle de la visibilité. Comme pour les autres formes d'EnR, c'est le lien avec le paysage qui va conditionner l'impact : les publications mettent ainsi l'accent sur l'incompatibilité potentielle entre des paysages sauvages et peu anthropisés (« wilderness ») et des centrales géothermiques (profondes ou volcaniques). Ce type de paysage étant quasi absent en France métropolitaine, les rapprochements sont peu pertinents. Si des similitudes visuelles existent avec les parcs photovoltaïques au sol, les rapprochements sont à nuancer en ce qui concerne la multifonctionnalité que peuvent dégager les projets : les installations géothermiques peuvent avoir moins d'emprise au sol (présence d'infrastructures en souterrain) et peuvent rentrer plus facilement dans des projets paysagers globaux, intégrant des co-usages de l'espace.

8.3.1. Méthodes d'évaluation et préconisations

Une méthode spécifique a été mise au point pour évaluer l'impact spécifique des centrales géothermiques sur le paysage. Cette méthode prend en compte 6 critères : la fragmentation des paysages (c'est-à-dire leur cohérence), l'étendue de la centrale, la visibilité de cette dernière, le nombre de centrales géothermiques sur le territoire proche, le caractère sauvage non anthropisé du paysage (« wilderness ») et les enjeux de conservation (aires protégées) (Ostman, 2015).

Enfin des préconisations peuvent être émises pour la création de centrales géothermiques. Premièrement, éviter les zones touristiques, patrimoniales, historiques, naturelles, ensuite, appliquer des principes architecturaux simples, intégrer les têtes de puits et préférer les zones boisées, enfin enterrer autant que possible les lignes électriques (Manzella, et al., 2018).

Les méthodes appliquées pour l'évaluation des impacts combinent des critères visuels, et des critères de reconnaissance sociale du paysage (tourisme, histoire, zones naturelles, etc.). Les préconisations d'intégration paysagère ont plus rapport au « camouflage » qu'à une véritable intégration au paysage existant.

8.4. Synthèse des impacts de la géothermie

La qualification des impacts de l'énergie géothermique sur la biodiversité, les sols et les paysages est synthétisée ici, ainsi que les méthodologies d'évaluation rencontrées et le niveau de différenciation des impacts entre technologies et étapes du cycle de vie des infrastructures. A noter que l'énergie géothermique est relativement peu étudiée comparée aux autres EnR.

En ce qui concerne la qualification des impacts sur la biodiversité ceux-ci sont globalement bien documentés, pour les impacts d'ordre physico-chimique (rejets gazeux ou aqueux), les impacts sur la qualité des eaux, les modifications sur les aquifères et la vie microbienne associée. Lors de la phase d'installation, les principaux impacts avérés sont un dérangement des individus du fait du bruit et des vibrations. Outre ces impacts, la littérature identifie également des risques de pollution et d'émission de composants chimiques, mais dans des cas qui restent très marginaux, avec des enjeux associés relativement faibles.

Dans le cas des sols, les impacts les plus traités et évalués sont l'utilisation des terres lors de l'installation, ainsi que le réchauffement localisé des sols. Les risques de modification de la morphologie des sols (affaissement, gonflements de terrain) et de pollution chimique sont également identifiés, mais ne peuvent être généralisés à toute installation géothermique et sont limités par les pré-études réalisées. Les impacts biologiques générés par la production d'énergie géothermique ne sont pas traités par les publications. A noter que les typologies de sols ne sont pas mentionnées dans les publications, sauf exception (par exemple la publication relative à la géothermie volcanique mentionne des impacts sur un sol rocheux friable). C'est pourtant un paramètre clé dans la détermination des enjeux potentiels de la géothermie.

En ce qui concerne les paysages, l'impact visuel est particulièrement traité du fait notamment de la présence de tours, fumeroles et pipelines, tandis que la notion d'acceptabilité est peu évoquée. Peu de publications s'intéressent à la géothermie, ce qui peut être dû à son faible développement sur le territoire

ainsi qu'à son impact visuel réduit par rapport à d'autres EnR. Si ces installations sont rares, leur médiatisation peut être importante et donc générer des phénomènes de conflit à plus large échelle.

En termes de méthodes d'évaluation des impacts sur la biodiversité, aucune méthode générale ni indicateur standard n'ont été identifiés, ce qui peut s'expliquer par une attention globalement plus faible que pour d'autres EnR (éolien notamment), l'intensité a priori moindre des impacts liés à la géothermie (hormis les impacts directs lors des travaux) ou par le fait que cette technologie est globalement peu développée et bénéficie de peu de retours d'expériences. Par ailleurs, il est à noter que les impacts environnementaux sont extrêmement variables selon les sites, les techniques et la composition des fluides géothermiques.

Concernant l'évaluation des sols, des mesures sont effectuées pour le suivi des impacts (exemple : du niveau du terrain pour évaluer l'affaissement ou gonflement des sols lors d'accidents), ainsi que des modélisations. Par ailleurs, le type de technologie utilisée n'est pas mentionné pour certains impacts, ce qui limite la comparabilité des résultats. Les valeurs peuvent être de plus très variables selon les publications, d'où la nécessité d'une lecture critique des résultats.

Concernant les impacts sur les paysages, une méthode spécifique prenant en compte différents critères (dont la fragmentation des paysages, l'étendue de la centrale ou encore la visibilité) a été mise au point pour évaluer l'impact spécifique des centrales géothermiques. D'une manière générale, les méthodes appliquées se basent également sur des critères de reconnaissance sociale du paysage (tourisme, zones naturelles). Cependant, les préconisations d'intégration paysagère ont plus rapport au « camouflage » qu'à une véritable intégration au paysage existant.

La comparaison entre les différentes technologies n'est pas traitée dans les publications utilisées, à l'exception de la distinction entre les centrales flash et binaires par Lavoie et al. (Impacts environnementaux potentiels liés à la géothermie profonde, 2015). Les installations géothermiques présentent des emprises très variables selon leur type et leurs caractéristiques relatives aux différentes infrastructures (centrale, tour de refroidissement, etc.). Les documents identifiés traitent principalement des installations géothermiques profondes et dans une moindre mesure des installations géothermiques de très basse température ou volcaniques. Par ailleurs, le type de technologie n'est pas toujours mentionné, bien que les impacts sur les sols semblent différer selon les technologies.

Enfin, en ce qui concerne les **impacts des différentes étapes du cycle de vie**, les phases d'installation et d'exploitation sont les plus étudiées, et semblent contribuer de façon plus importante que les autres étapes. Vis-à-vis de la biodiversité terrestre, les principaux effets liés aux installations géothermiques concernent la phase d'installation.

9. Impacts des systèmes de transport et stockage

Ce chapitre présente une synthèse des impacts des systèmes de transport et stockage sur la biodiversité, les sols et les paysages identifiés lors de l'analyse bibliographique. Une attention particulière a été portée à la prise en compte du contexte géographique, temporel et institutionnel. Les résultats qualitatifs et quantitatifs sont mis en avant autant que possible, et les points de divergence et de convergence entre publications sont identifiés.

Les dispositifs de transport électrique (par exemple pour la plupart des EMR) et de chaleur (par exemple dans le cas de la géothermie ou le solaire thermique), ainsi que les systèmes de stockage des EnR (limités au pompage-turbinage pour l'hydroélectricité et au stockage par hydrogène) sont couverts dans cette analyse. Le stockage Li-ion ne fait pas partie du périmètre de l'étude.

Les câbles électriques (câbles homologués CEI de moyenne et haute tension, câbles en fil d'acier, câbles flexibles, etc.) doivent permettre de transporter l'énergie électrique produite sur terre et en mer. Ils relient le réseau électrique et les systèmes d'énergie renouvelable. Pour les EMR et l'éolien en mer, différentes techniques existent pour ancrer et protéger les câbles électriques au niveau des fonds marins : l'enrochement, le matelas en béton ou l'ensouillage (voir Figure 10).



Figure 10 : Schémas des protections des câbles électriques sous-marins : l'enrochement (gauche), le matelas en béton (milieu) et l'ensouillage (droite) (RTE et BRLi, 2015).

L'énergie hydraulique est transportée via des canalisations pour l'énergie hydroélectrique. L'eau peut également servir de transporteur thermique pour les ENR thermiques (géothermie et solaire thermique). L'eau ou les fluides caloporteurs sont alors transportés dans des tuyauteries métalliques (cuivre, aluminium, PEHD (polyéthylène haute densité), etc.) possédant une faible conductivité thermique¹⁰⁰.

Les systèmes de stockage de l'énergie, par moyen hydraulique ou à partir d'une batterie de stockage à air comprimé, permettent une flexibilité des transferts et de l'approvisionnement d'énergie dans le temps. Le stockage par moyen hydraulique est basé sur le principe d'utilisation de l'électricité excédentaire produite pour pomper de l'eau vers une retenue en hauteur ; qui est ensuite relâchée par gravité vers un bassin inférieur en entraînant une turbine qui va alors produire à nouveau l'électricité au moment voulu (voir Figure 11).

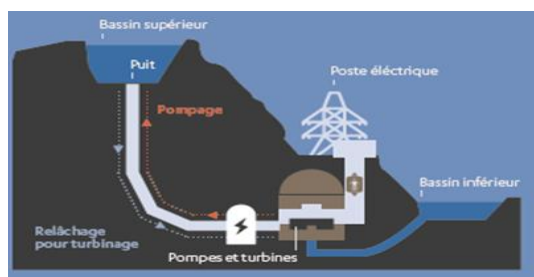


Figure 11 : Schéma du stockage par moyen hydraulique (EnerGeek, 2011)

Les types de réseaux suivants entrent dans le cadre de l'étude : électrique (dont *Smart Grids*), de chaleur ou de froid, et de gaz. A noter cependant que les impacts associés aux réseaux (ainsi qu'aux systèmes de stockage) ne sont pas toujours spécifiquement attribuables aux énergies renouvelables ; ils sont peu couverts dans la littérature analysée dans le cadre de cette étude. Les éléments d'analyse fournis dans ce chapitre présentent les impacts identifiés lors des recherches sur les énergies solaire, éolienne, marines, hydraulique et géothermique.

¹⁰⁰ <http://www.infoenergie.eu/riv+ener/energie-sans-riviere/transport-energie.htm>

9.1. Impacts des systèmes de transport et stockage sur la biodiversité

Le développement des infrastructures de production d'énergie renouvelables nécessite, au même titre que les énergies conventionnelles, la construction ou le renforcement des réseaux et systèmes de stockage électriques. Pour la majorité des installations d'EnR, le raccordement électrique est réalisé à proximité immédiate des installations de production *via* le poste de livraison qui relie l'installation le plus souvent à un poste source électrique.

Hormis les grands parcs éoliens en mer posés, dont les puissances peuvent être équivalentes à des tranches de production d'énergie conventionnelle (nucléaire, gaz, charbon), la spécificité des installations de production électrique d'origine renouvelable réside, d'une part, dans des apports de production électrique d'assez faible puissance et largement dispersés dans les territoires. Aussi, hormis les parcs de grande puissance (notamment parcs éoliens en mer raccordés en très haute tension), le développement d'un projet EnR ne nécessite pas la construction de réseaux électriques haute tension (réseau de transport). A contrario, la multiplication de petites unités de production réparties peut nécessiter un renforcement des réseaux existants de proximité (depuis l'unité de production jusqu'au poste source le plus proche).

Dans la majorité des cas, les installations EnR nécessitent des ajustements des réseaux en place et des raccordements de proximité, très rarement des modifications majeures. L'évolution des réseaux électriques n'est pas directement définie par le développement des EnR mais plus largement, via un passage de réseaux centralisés vers des réseaux décentralisés. C'est ainsi à l'échelle du développement global des installations d'énergie renouvelables et d'autres besoins (échelles régionale, SRCAE¹⁰¹, S3REnR¹⁰² et nationale, PPE¹⁰³) que se planifient les capacités de production et, donc, les besoins de nouveaux réseaux électriques d'ampleur. Ces développements de réseaux sont, par ailleurs, à rattacher aux évolutions des territoires : démographie, répartition territoriale des habitants, etc. Ces grands schémas intègrent des évaluations environnementales globales, qui restent très générales. Par ailleurs, les projets de raccordement électriques peuvent être, selon leur importance, soumis à évaluation environnementale et étude d'impact. Les impacts diffèrent fortement entre des liaisons souterraines et des liaisons aériennes. Les impacts possibles sont les suivants : destruction/altération de milieux sur le tracé ou au niveau des zones de travaux, risques de mortalité de la faune volante pour les lignes aériennes, champs électromagnétiques induits.

Un nombre assez faible de documents compilés dans le cadre de la présente étude traite des aspects liés aux raccordements électriques. Ils ne sont d'ailleurs pas mentionnés dans la plupart de la littérature collectée (voir notamment Schuster, et al. (Consolidating the State of Knowledge: A Synoptical Review of Wind Energy's Wildlife Effects, 2015)). Les effets environnementaux des raccordements sont relativement classiques :

- Les travaux de terrassement peuvent impliquer, selon les modalités de réalisation, des destructions ou altérations de milieux, ainsi que des mortalités ou perturbations d'individus ;
- La présence des câbles électriques et des pylônes peut engendrer des mortalités directes (collision ou électrocution en cas de lignes aériennes (Bernardino, Bispo, Costa, & Mascarenhas, 2013)) ou des perturbations localisées (champs électromagnétiques).

Les effets environnementaux possibles des câbles électriques sous-marins font l'objet d'une attention importante vis-à-vis des champs électromagnétiques, pour l'éolien en mer et certaines installations EMR (voir chapitres 5 et 6). Les effets sur la biodiversité marine de l'apport de nouveaux champs électromagnétiques demeurent globalement assez mal appréhendés bien qu'aucune preuve d'impact notable ne ressorte de la bibliographie. Par ailleurs, les modalités d'installation des câbles (ensouillage, enrochement) ont une influence sur les impacts qu'ils peuvent engendrer : emprises sur des substrats benthiques, effets récifs, altération des dynamiques hydro-sédimentaires. Ces aspects doivent être étudiés avec attention.

Concernant les raccordements terrestres, les impacts possibles sont très différents en fonction de la nature du câble. S'il est enterré, ce qui est systématiquement le cas en France, des impacts de destruction ou d'altération de milieux sont possibles en cas de tracé hors voirie. En phase d'exploitation, les effets possibles sont négligeables (y compris pour les aspects relatifs aux champs

¹⁰¹ Schéma Régional Air, Energie, Climat

¹⁰² Schéma Régional de Raccordement aux Réseaux des Energies Renouvelables

¹⁰³ Programmation Pluriannuelle de l'Energie

électromagnétiques). En cas de lignes aériennes, ce sont les effets en phase d'exploitation qui focalisent l'attention, notamment les risques de mortalité sur les oiseaux (Bernardino, Bispo, Costa, & Mascarenhas, 2013).

Bien que les installations EnR nécessitent des réseaux ou raccordements (électriques principalement mais également réseau de chaleur pour certaines), l'analyse bibliographique n'a pas permis d'identifier des publications traitant dans le détail des impacts associés à ces équipements.

9.2. Impacts des systèmes de transport et stockage sur les sols et les sédiments

La production d'énergie renouvelable nécessite, en plus des infrastructures dédiées, un système de raccordement au réseau, local ou général, thermique ou électrique. Il en est de même pour les systèmes de stockage d'énergie. Les enjeux relatifs aux impacts sur les sols des systèmes de transport et de stockage d'énergie renouvelable sont pour la plupart relatifs aux étapes d'installation et de démantèlement des structures.

Si la revue de littérature mentionne certains impacts sur les sols générés par les dispositifs de raccordement au réseau, il s'agit le plus souvent de compléments d'information par rapport à l'analyse effectuée pour un type d'EnR donné, et les impacts ne semblent pas faire l'objet d'une évaluation spécifique. En particulier, les éléments collectés à l'issue de l'analyse bibliographique portent dans l'ensemble sur les dispositifs de raccordements électriques ; une seule publication identifiée traite de l'impact des raccordements de chaleur.

Les travaux menés sur le stockage avec hydrogène s'attachent actuellement à faire progresser et faire gagner en maturité la technologie en vue d'un déploiement à grande échelle. Aucune publication analysée ne se focalise pour l'instant sur les impacts de cette filière hydrogène sur les sols, à l'exception des risques d'accidents de manipulation (fuites ou explosion de stockage à hydrogène). En prévision d'un potentiel développement de la filière hydrogène dans les prochaines années, il serait pertinent de s'attarder sur les impacts (encore non connus) de ce système de stockage sur les sols.

Enfin, la part des impacts des réseaux imputables aux EnR ne fait l'objet que de très peu de publications, leur utilisation n'étant pas uniquement dédiée aux EnR. Leurs impacts sur les sols ne sont généralement pas traités dans les publications.

9.2.1. Impacts en termes de surfaces de sols

Dans la plupart des publications analysées, il n'est pas fait mention d'impacts des systèmes de transport et de stockage d'EnR sur l'**occupation des sols**. Pour autant, le raccordement électrique de la production terrestre d'EnR aux postes de conversion électrique se fait via des câbles électriques enterrés (Günnewig, Sieben, Püschel, Bohl, & Mack, 2009; MEEM, 2016). Lors de la phase de démantèlement, les câbles sont extraits, principalement en raison de leur teneur élevée en cuivre (Günnewig, Sieben, Püschel, Bohl, & Mack, 2009). Les postes de conversion sont, dans la grande majorité des installations séparées de la centrale de production EnR, raccordés directement au réseau de distribution à proximité : l'impact en termes de surface de sols utilisés supplémentaire est donc négligeable. Les impacts associés dans le cas du réseau de chaleur sont *a priori* similaires concernant les surfaces des sols occupées.

Dans le cas des énergies marines, le raccordement au réseau électrique ou de chaleur (pour l'énergie thermique des mers) se fait par câble jusqu'au littoral (jonction d'atterrissage), afin de relier la production d'énergie aux postes électriques de raccordement au réseau de transport d'énergie. L'emprise associée reste négligeable au regard de l'ampleur des projets (d'autant plus lorsque les câbles sont posés sur les fonds plutôt qu'ensouillés). Cependant l'impact peut être important si l'atterrissage se fait sur un site présentant des enjeux de biodiversité importants (dunes, zones humides, etc.). Les ordres de grandeur disponibles sont autour de 10 à 15 m²/km pour les câbles posés et 2 000 m²/km de câbles pour ceux ensouillés (MEDDE, 2012). A noter que dans le cas d'énergies marines, l'ensouillage des câbles peut être préconisé comme moyen de ne pas créer de conflit avec les activités de pêche (dragage et chalutage), bien qu'il implique un remaniement plus important des fonds marins (Boye, et al., 2013; Péguin, Le Visage, Rolland, & Moncorps, 2014).

Pour les systèmes de raccordements terrestres, les câbles sont enterrés en profondeur, et un grillage ou filet avertisseur est placé vingt centimètres au moins au-dessus. Il y a généralement possibilité de **co-usage** sur les sols concernés. Dans le cas de terrains agricoles, l'obligation de remise en état des sols et terres arables suite à l'enterrement des câbles y contribue. A noter que pour le raccordement sur le réseau de chaleur de certains systèmes, géothermique notamment, les tuyaux contenant le fluide caloporteur peuvent être enterrés ou surélevés pour laisser l'espace libre à d'autres activités comme l'agriculture ou les pâturages (Lavoie, Malo, & Raymond, 2015). La mise en place du co-usage est souvent mentionnée mais ne fait pas l'objet de recherches spécifiques

Les technologies de stockage d'énergie requièrent elles aussi une emprise sur les sols. Dans le cas des STEP (Station de Transfert d'Énergie par Pompage), l'activité de stockage est située sur le site même de production d'énergie hydroélectrique. L'emprise additionnelle associée à l'installation en aval du barrage (pour le second bassin) est cependant négligeable en regard de l'emprise totale de la centrale hydroélectrique.

Les systèmes de raccordement et de stockage d'énergie renouvelables génèrent une emprise négligeable sur les sols en comparaison aux impacts induits par les infrastructures de production d'énergie.

9.2.2. Impacts physiques sur les sols et les sédiments

Le principal impact physique mentionné par les publications est l'éventuelle **augmentation locale de température** autour des câbles de raccordement, du fait de pertes énergétiques (Boye, et al., 2013; MEEM, 2017). Pour les énergies terrestres, la variation de température du sol générée par le raccordement reste négligeable, notamment par rapport aux variations générées par exemple par l'ombrage des panneaux, dans le cas du solaire.

Concernant les systèmes de transport de chaleur (applicables au solaire thermique et la géothermie principalement), les pertes thermiques vers le sol sont limitées par l'isolation thermique de la gaine d'acier, à l'aide de mousse isolante ou autre calorifuge. La revue de littérature mentionne de possibles élévations locales de température des sols pour la géothermie, sans qu'un consensus existe à ce sujet.

Le phénomène semble mieux étudié pour les énergies marines. Dans le cas de câbles électriques (éolien en mer flottant ou posé, majorité des EMR), ces variations sont négligeables à proximité de la surface des fonds marins (MEDDE, 2012). Dans le cas de câbles ensouillés, la variation locale de température est de moins de 1 °C, selon les différentes publications (OSPAR Commission, 2008; Péguin, Moncorps, Fourcade, & Denis, 2013). Ces variations de températures sont négligeables mais pourraient tout de même avoir un impact plus important en fonction de la densité du maillage des câbles, par effet cumulé.

L'augmentation locale de la température des sols terrestres comme des sédiments marins générée par les systèmes de transport d'énergie semble négligeable.

Comme pour tous travaux d'aménagement, la mise à nu de sols terrestres est nécessaire lors de l'installation des systèmes de raccordement, en particulier sous-terrain, et peut être source d'**érosion**, dont l'intensité reste négligeable au vu des impacts générés par les structures de production d'énergie. Cela concerne notamment les centrales hydroélectriques, installées dans des terrains montagneux forestiers qui, avec les fortes pentes, accélèrent l'érosion de la couche arable.

A noter que dans le cas d'un stockage d'énergie de type STEP, on retrouve certains des impacts physiques commun à l'énergie hydroélectrique, en particulier concernant les perturbations hydro-sédimentaires et les changements morphologiques des sols terrestres. Cependant ces impacts ne sont pas mentionnés dans la littérature analysée.

La **remise en suspension des sédiments** lors de l'étape d'ensouillage des câbles (non systématique) est un impact souvent mis en avant dans la littérature des énergies marines ou des éoliennes en mer (OSPAR Commission, 2006; Boye, et al., 2013). L'ensouillage implique qu'une tranchée soit creusée pour enterrer le câble, d'une profondeur pouvant varier de 0,6 à 3 m. Comme pour tous travaux sur les fonds marins, il s'ensuit une augmentation locale de la turbidité de l'eau et une baisse locale de la luminosité (Boye, et al., 2013), dont l'impact se limite à la durée des travaux. Son intensité reste faible comparée à la modification des régimes hydro-sédimentaires liée à d'autres pratiques et activités marines telles que l'extraction de granulats marins.

9.2.3. Impacts chimiques sur les sols

Les systèmes de raccordement de chaleur, essentiellement pour les énergies géothermiques, peuvent être source de **contamination et pollution** chimique des sols, tant par le fluide caloporteur des installations de surface que par le fluide géothermique des installations profondes. Cet impact est traité plus en détail dans la partie dédiée à l'impact de la géothermie sur les sols (voir section 8.2.3). Il résulte en général d'incidents spécifiques, et n'est pas applicable à l'ensemble des centrales géothermiques. De plus, les normes françaises limitent l'impact sur les sols lors de fuites (biodégradabilité du fluide caloporteur).

Les peintures anticorrosion au plomb (minium) utilisées pour protéger les pylônes électriques de haute tension (en Allemagne, ce sont 200 000 pylônes qui ont ainsi été peints), s'altèrent avec le temps et contaminent les sols situés sous les pylônes et à proximité des pylônes avec des éléments-traces métalliques - ETM (plomb et zinc). Cette contamination est observée en Allemagne, en Suisse, au Canada et en Italie. Les plantes cultivées sur ces sols accumulent les ETM, et les teneurs en plomb peuvent dépasser les seuils définis par la réglementation pour le fourrage (bétail) ou les légumes (humains). Les teneurs en ETM dans les sols peuvent aussi être phytotoxiques (Brokbartold, Wischermann, & Marschner, 2012). De même la corrosion des pylônes électriques galvanisés contamine (en zinc) les sols et les plantes sous les pylônes ou proches des pylônes, et ce d'autant plus que les pylônes sont âgés (observé au Canada, aux Etats-Unis et au Royaume-Uni). Ces contaminations peuvent entraîner sous les pylônes (sans que cela soit systématique, car sous la dépendance du pH des sols) une phytotoxicité (végétation clairsemée, structures de communauté végétale modifiées) et la sélection de populations de plantes résistantes au zinc, voire la colonisation par des lichens rares (Jones & Burgess, Zinc and cadmium in soils and plants near electrical transmission (hydro), 1984; Jones, Prohaska, & Burgess, Zinc and cadmium in corn plants growing near electrical transmission towers, 1988; Al-Hiyaly, McNeilly, & Bradshaw, 1988; Al-Hiyaly, McNeilly, Bradshaw, & Mortimer, 1993; Smolders, et al., 2003; Coulaud & McNeilly, 1992; Buck, et al., 1999). A noter que le transport aérien de l'électricité via les pylônes n'est pas spécifique aux EnR et que les impacts générés sont communs avec les énergies conventionnelles utilisant ce type d'infrastructure.

Enfin, peu d'informations sont disponibles sur l'impact du câblage sur le **potentiel d'acidification** des sols. Les publications faisant le lien entre cette catégorie d'impact et les systèmes de raccordement sont des analyses de cycle de vie : les modélisations prennent en considération les impacts générés lors de l'ensemble des étapes du cycle de vie d'une installation de production d'énergie renouvelable, comprenant le système de raccordement au réseau. Cet indicateur d'impact n'est pas évalué dans le cas des sols uniquement, mais agrège les résultats de l'impact potentiel sur les milieux aquatiques, aérien et les sols, ce qui limite les observations vis-à-vis des impacts sur les sols uniquement. Le câblage est estimé contribuer à hauteur de 12 % environ aux impacts sur l'acidification de l'ensemble du cycle de vie d'un panneau photovoltaïque en silicium multicristallin au sol (Desideri, Proietti, Zepparelli, Sdringola, & Bini, 2012) ou encore à 7 % aux impacts de panneaux sur toiture (Gerbinet, Belboom, & Léonard).

Dans le cas de la production d'énergie éolienne terrestre, l'impact du câblage entre l'éolienne et le transformateur principal du parc sur le potentiel d'acidification est jugé négligeable (moins de 2 %) (Cycleco, 2015).

Le potentiel d'acidification apparaît faible par rapport aux infrastructures de production d'énergie renouvelable, et donc indirectement au mix énergétique moyen dans le cas français.

9.3. Impacts des systèmes de transport et stockage sur les paysages

Une seule publication aborde la question des impacts des systèmes de transport et stockage sur le paysage, bien que de manière indirecte, car en lien avec des considérations générales sur les paysages de l'énergie.

Les impacts des systèmes de transport et stockage spécialement dédiés aux EnR ne semblent pas faire partie des considérations paysagères. Ces aspects sont d'ailleurs peu abordés dans les guides des études d'impact.

Des études et guides existent sur les lignes électriques mais ne sont pas spécifiques aux énergies renouvelables ; ils n'ont donc pas fait l'objet de recherches dédiées dans le cadre de cette étude. Il convient cependant de noter que les traitements des impacts pour les systèmes de transport et stockage sont semblables à ceux des autres EnR, avec *a priori* une importance accordée aux aspects visuels. Les enjeux visuels des pylônes électriques sont par exemple sensiblement les mêmes que pour les éoliennes (du fait de la similitude de forme et de taille de l'objet) : les variations d'impact se font sur le design des aménagements, sur la distance aux habitations mais aussi, en matière d'acceptation, sur des aspects socio-économiques, etc. Il est clair que, comme pour les autres formes d'EnR, c'est avant tout l'obtention d'une acceptation sociale, dans le cadre d'une planification concertée ou non, qui va conditionner en amont l'impact de l'aménagement de transport et de stockage. D'ailleurs, les aspects liés au paysage entrent également fortement dans les concertations pour construction de nouvelles lignes de transport d'électricité, qui peuvent aussi parfois accélérer le développement EnR.

9.4. Synthèse des impacts des systèmes de transport et stockage

La qualification des impacts des systèmes de transport et stockage d'EnR sur la biodiversité, les sols, les sédiments et les paysages est synthétisée ici, ainsi que les méthodologies d'évaluation rencontrées et le niveau de différenciation des impacts entre technologies et étapes du cycle de vie des infrastructures. Les impacts sont mentionnés, de façon limitée en comparaison aux systèmes de production des énergies renouvelables. A noter que certains systèmes ne sont pas évoqués, notamment les réseaux de froid, de gaz, ou les *smart grids*, car la revue de littérature réalisée dans le cadre de l'étude n'a pas permis d'identifier d'impacts sur la biodiversité, les sols et les paysages qui soient relatifs à ces systèmes.

En ce qui concerne la qualification des impacts sur la biodiversité, ils sont liés à des destructions ou altérations des milieux, ainsi que des mortalités ou perturbations d'individus lors de la phase de construction. Par ailleurs, la présence de câbles électriques peut engendrer des mortalités directes (collision ou électrocution) ou des perturbations localisées (champs électromagnétiques pour les câbles sous-marins) : ces câbles électriques sont systématiquement enterrés en France pour les EnR terrestres, ce qui supprime les risques associés. Les techniques de fixation des câbles aux fonds marins (par exemple, ensouillage, enrochement dans le cas de l'éolien en mer ou des EMR) ont une influence et peuvent engendrer une emprise sur des substrats benthiques, des effets récifs, une altération des dynamiques hydro-sédimentaires. Concernant les raccordements terrestres, les impacts possibles diffèrent selon la nature du câble (aérien ou souterrain, type de gaine autour du câble, etc.).

En ce qui concerne les impacts sur les sols et les sédiments, il ressort de la revue de littérature que les surfaces des sols occupées et le changement de température locale du sol (pour des raccordements électriques ou thermiques), ainsi que la pollution des sols par les pylônes électriques sont les typologies d'impact les mieux étudiées. Dans l'ensemble, leur intensité reste négligeable en comparaison aux systèmes de production d'EnR eux-mêmes.

Les impacts sur les paysages des systèmes de transport et stockage dédiés aux EnR ne sont pas couverts par la littérature. Des études et guides existent sur les lignes électriques mais ne sont pas spécifiques aux énergies renouvelables ; ils n'ont donc pas fait l'objet de recherches dédiées dans le cadre de cette étude. Il convient cependant de noter que les traitements des impacts pour les systèmes de transport et stockage sont semblables à ceux des éoliennes, avec une importance accordée aux aspects visuels.

En termes de méthodes d'évaluation des impacts, les impacts sur les sols générés par les dispositifs de raccordement au réseau ne sont en général pas évalués mais sont évoqués en complément d'information à l'analyse effectuée pour un type d'EnR donné. Seul le changement de température induit par la présence de câbles fait l'objet d'une évaluation dans une publication ainsi que les impacts potentiels liés à l'acidification du milieu (*via* notamment une analyse ACV pour le solaire au sol).

Les méthodes d'évaluation relative aux impacts sur la biodiversité sont présentées en sections 5.1.5 et 6.1.5, respectivement relatives à l'éolien en mer et aux EMR. Aucune méthode d'évaluation concernant les impacts sur les paysages n'a été identifiée.

10. Analyse comparée

Le présent chapitre présente une analyse comparée des impacts sur la biodiversité, les sols, les sédiments et les paysages entre les différentes EnR, ainsi qu'une comparaison succincte avec les autres activités humaines (peu de données ayant été trouvées à ce sujet). Le chapitre comprend également un bilan des impacts et une synthèse des manques de connaissances et besoins de recherche identifiés suite à l'analyse bibliographique. Ces éléments pourront être utilisés comme base de discussion avec l'ADEME et les experts pour la suite du projet ; notamment lors de l'élaboration de la feuille de route pour l'ADEME (axe 4 du projet).

Certains éléments sont à garder à l'esprit à la lecture de ce chapitre. Les impacts des EnR sur la biodiversité, les sols, les sédiments et les paysages ne sont pas mentionnés ni caractérisés de façon équivalente dans la littérature (voir le livrable « Rapport d'analyse bibliométrique » pour plus de détail à ce sujet) : du côté des impacts, ce sont ceux sur la biodiversité qui sont les mieux couverts ; concernant les EnR, la littérature est la plus importante pour les impacts générés par les systèmes de production d'énergie éolienne, quel que soit le type d'impact étudié.

La revue bibliographique montre que les effets les plus étudiés sont ceux générés lors des étapes d'installation, de fonctionnement et de démantèlement sur site. Il existe peu d'informations sur les impacts générés lors des étapes de fabrication des installations ou de leur gestion en fin de vie (recyclage etc.), à quelques exceptions près, par exemple quelques cas d'étude de l'impact de la fabrication des panneaux photovoltaïques sur les sols. Les impacts générés lors de l'extraction des matériaux, utilisés ensuite pour les installations, ne sont pas couverts dans la littérature sur les EnR. Les impacts générés par le démantèlement et le traitement en fin de vie de certaines installations sont par ailleurs mal connus, les infrastructures étant toujours utilisées (par exemple, énergie hydraulique).

Enfin, pour une même énergie renouvelable, l'étude des impacts et de leurs méthodes de caractérisation varie selon les technologies et, surtout, selon les enjeux environnementaux présents sur le site d'implantation.

Ces éléments sont rappelés dès que nécessaire dans la suite de ce chapitre.

10.1. Mise en perspective des différents impacts des EnR entre elles

Une analyse de la couverture bibliographique des impacts des énergies renouvelables sur les sols, la biodiversité et les paysages est synthétisée dans le Tableau 5 pour les étapes d'installation, d'exploitation et de démantèlement sur site.

Les résultats sont présentés par type de technologie d'énergie renouvelable. Il en ressort que la quantité et la qualité de l'information disponible dans la littérature diffèrent entre les différentes technologies. Ces différences sont à mettre en perspective des niveaux d'enjeux associés au développement de chaque technologie. On note ainsi que les technologies ayant des objectifs de développement plus élevés sont mieux étudiées dans la littérature.

Le tableau représente la pertinence de l'information disponible (quantité d'information à disposition dans la littérature, information faisant consensus dans la littérature étudiée) par impact et par technologie de production d'énergie renouvelable.

Tableau 5 : Analyse de la couverture bibliographique des impacts des EnR lors des phases d'installation, d'exploitation et de démantèlement sur site

		Solaire au sol (PV et thermique)	Solaire sur bâti existant (PV et thermique)	Eolien terrestre	Eolien marin posé	Eolien marin flottant	Hydroléon	Houlomoteur	Marémoteur	Hydroélectricité avec retenue	Hydroélectricité au fil de l'eau	Géothermie	Raccordements et réseaux
Impacts biodiversité	Destruction / Altération de milieux												
	Perturbation / Gêne des individus												
	Mortalité / Blessure d'individus												
	Modification des paramètres environnementaux												
Impacts sols	Occupation du sol												
	Impact physique												
	Impact chimique												
	Impact biologique												
Impacts paysages	Impacts liés aux aménagements												
	Impacts liés aux usagers												

	Impact très bien documenté (nombreuses études dont les résultats sont pertinents dans le cas français et font consensus)
	Impact bien documenté (plusieurs études dont les résultats semblent fiables, applicables dans le cas français et font consensus)
	Impact connu (peu d'études, ou non nécessairement transposable au cas français, ou sources peu fiables / divergentes)
	Impact mal connu (pas d'étude ou sources non fiables)

10.1.1. Synthèse des enjeux sur la biodiversité, les sols, les sédiments et les paysages

Dans l'ensemble, très peu de publications analysées fournissent des éléments de comparaison entre EnR des impacts sur la biodiversité, les sols, les sédiments et les paysages. Les rares publications identifiées fournissent des comparaisons basées sur des analyses de cycles de vie (par exemple (Roldán, Martínez, & Peña, 2014; Lavoie, Malo, & Raymond, 2015)), entre autres avec un accent sur les émissions de gaz à effet de serre. La comparaison des impacts sur la biodiversité, les sols, les sédiments et les paysages entre les différents dispositifs EnR nécessiterait des travaux complémentaires conséquents. En l'état des connaissances, il s'agit d'un exercice particulièrement délicat. L'une des principales difficultés réside dans la complexité de comparer des technologies aux caractéristiques souvent très différentes et dont les impacts intrinsèques sont parfois mal appréhendés. De plus, les impacts dépendent de la manière dont ces technologies sont développées (en fonction des contraintes réglementaires, de la façon dont la séquence « éviter, réduire et compenser » est mise en œuvre par le développeur, etc.). Deux parcs éoliens aux caractéristiques exactement similaires pourront, par exemple, avoir des impacts sur les oiseaux très différents suivant qu'ils sont développés dans une plaine agricole dénuée d'enjeux avifaunistiques ou dans une zone accueillant des grands rapaces en reproduction.

De plus, les impacts potentiels identifiés à l'issue de la revue de littérature sont principalement relatifs à l'installation, l'exploitation et le démantèlement des structures de production d'EnR. La question des impacts générés lors de l'extraction et le traitement de matériaux utilisés dans la fabrication de ces structures, ainsi que leur gestion en fin de vie, n'est que peu étudiée. La nature et l'intensité de ces impacts sur la biodiversité, les sols, les sédiments et les paysages varient selon les matériaux et leur quantité nécessaire à la construction des infrastructures considérées. Dans le cas de l'éolien par exemple, l'acier et le cuivre sont les métaux majoritairement utilisés ; pour l'hydroélectricité avec retenue ou les énergies marémotrices, les besoins en granulats sont importants, mais l'impact de leur production sur la biodiversité, les sols, les sédiments et les paysages peut être moindre. Si de tels éléments sont identifiés dans la littérature (principalement littérature grise), ils ne sont cependant pas évalués spécifiquement pour les énergies renouvelables, qui ne représentent qu'une part faible de leurs secteurs d'utilisation. Il faudrait, pour évaluer les impacts associés, pouvoir quantifier les impacts pouvant être alloués aux EnR, ce qui serait l'objet d'une étude à part entière.

De la même façon que pour les étapes d'extraction de matériaux et fabrication de composants, peu ou pas d'informations sont disponibles dans la littérature concernant l'impact de la **fin de vie** des structures EnR, et l'estimation des impacts associés n'entre pas dans le cadre du rapport.

Analyse selon les étapes du cycle de vie

En **phase de construction**, les emprises nécessaires sont généralement faibles pour chaque unité EnR, à l'exception des barrages et retenues hydroélectriques ainsi que certains grands complexes géothermiques (en particulier la géothermie de surface horizontale ou les grandes installations géothermiques nécessitant de nombreux forages). Pour les parcs éoliens, les centrales solaires et les EMR, les emprises réelles sont très variables selon la taille des sites. Il n'a pas été identifié, dans le cadre de l'analyse bibliographique, de publications fournissant des ordres de grandeur faisant consensus concernant les emprises nécessaires pour plusieurs types d'EnR. De plus, il serait nécessaire de comparer cette occupation des sols à production d'énergie équivalente.

Pour toutes les EnR, et pour tout aménagement en général, la phase de construction peut générer des perturbations temporaires, en particulier sur la biodiversité. Les bruits des travaux de construction des parcs éoliens en mer posés et, plus secondairement, de certaines EMR, constituent un cas à part : les capacités de propagation des sons sous l'eau et la sensibilité auditive de certaines espèces de faune marine conduisent à identifier ces effets comme prioritaires alors qu'ils sont nettement moins traités en contexte terrestre. De plus, comme pour tout chantier, cette phase génère aussi de l'érosion des sols et du tassement des sols.

En **phase d'exploitation**, les caractéristiques parfois très différentes des EnR engendrent des variabilités fortes en termes d'impacts possibles sur la biodiversité et les sols. Les unités de production mobiles peuvent engendrer des mortalités ou blessures d'animaux : cet aspect constitue un enjeu très fort pour l'éolien terrestre et l'éolien en mer, mais qui peut également être significatif pour l'hydroélectricité (selon la nature des installations et les turbines utilisées) ou certaines EMR (notamment hydrolennes et installations marémotrices). Aucune publication fournissant des ordres de

grandeur jugés suffisamment fiables des mortalités induites par différentes EnR n'a été identifiée ; et aucune étude de ce type n'a, d'après les recherches réalisées, été menée en France. Il est important de préciser que ce type de données n'existe pas non plus pour les énergies conventionnelles, qui sont pourtant beaucoup plus anciennes.

L'occupation des sols, l'artificialisation des sols et l'imperméabilisation des sols varient d'une source d'énergie à l'autre. Pour une même source, elle varie aussi en fonction des technologies utilisées, ainsi que des conditions climatologiques (pour le solaire et l'éolien par exemple), topographiques et hydrologiques (pour l'hydroélectrique), voire hydrogéologiques ou géologiques (pour la géothermie). Ainsi, selon le degré d'ensoleillement du site, la surface occupée par quantité d'énergie produite pour le solaire sera plus ou moins élevée. Tout comme pour le solaire, l'occupation des sols par quantité d'énergie produite pour l'éolien terrestre sera plus ou moins élevée selon les conditions de vents. Dans le cas de l'hydroélectricité, l'occupation des sols par quantité d'énergie produite dépend de la technologie (installation au fil de l'eau versus centrale avec réservoir), mais aussi de la topographie (les retenues d'eau situées dans des zones relativement plates sont plus longues et larges et mobilisent donc plus de surfaces que celles situées en montagne, qui sont plus profondes et plus courtes).

Les impacts sur la physique ou la chimie des sols et des sédiments restent localisés, et sont généralement fonction de l'emprise requise pour un type d'EnR. Dans le cas de l'hydroélectricité avec retenue, les modifications hydro-sédimentaires sont cependant observées sur de plus grandes distances, au niveau des cours d'eau amont et aval. En milieu maritime, les dispositifs de protection des structures (éolien en mer, EMR) contre la corrosion et le *biofouling* sont identifiés comme de potentielles sources de pollution ; dont l'impact sur les fonds marins n'est cependant que peu évalué, à proximité comme à plus grande distance des structures. De plus, les normes réglementent l'utilisation des produits les plus nocifs, et des bonnes pratiques semblent être mises en œuvre dans les projets en cours de développement en France pour en limiter davantage l'utilisation.

Les installations EnR peuvent par ailleurs, comme pour toute construction humaine, engendrer des gênes et perturbations comportementales : ces aspects sont particulièrement décrits pour l'éolien terrestre et l'éolien en mer (notamment sur les oiseaux), mais peuvent constituer un enjeu également pour d'autres EnR (EMR, solaire). Aucun élément de comparaison de ces impacts, par ailleurs très variables pour un même type d'EnR n'a été identifié dans la bibliographie. L'hydroélectricité et les installations marémotrices en mer présentent une situation à part puisque ces technologies engendrent des perturbations du fonctionnement des écosystèmes (fluviaux ou estuariens). Ces perturbations peuvent varier de négligeables à fortes (notamment pour les grandes installations avec retenues, barrages et éclusées).

Enfin, pour tous les types d'EnR, des réseaux (électriques ou de chaleur) sont nécessaires. Les câbles électriques sont généralement de faibles dimensions et enterrés. Leurs impacts en phase d'exploitation ne constituent pas un enjeu particulier, d'autant qu'ils sont souvent similaires pour certaines énergies conventionnelles (hors lignes THT sortant des centrales nucléaires). En contexte maritime (éolien en mer et EMR), une problématique spécifique existe pour les raccordements électriques concernant les champs électromagnétiques et la possible altération des fonds marins (en cas d'ensouillage, peu fréquent). Dans le cas de réseau de chaleur, la question des variations de température du sol est un enjeu identifié comme potentiel bien qu'*a priori* négligeable selon la littérature.

Vis-à-vis des impacts associés à la **phase de démantèlement**, aucune information comparative n'a été identifiée dans la bibliographie sur les impacts sur la biodiversité et les sols.

Analyse selon les énergies renouvelables considérées

Au regard de l'analyse réalisée, les enjeux sur la production d'**énergie solaire au sol** (photovoltaïque et thermique) portent principalement sur la question de l'emprise sur les sols et l'impact visuel des champs de panneaux, durant la durée de fonctionnement de la centrale solaire. Toutefois, la visibilité est moins marquée que pour l'éolien et les possibilités de modulation de l'agencement des structures offrent des opportunités d'intégration plus importantes. L'emprise des sols impacte la température et l'ensoleillement au sol, et peut impacter la biodiversité présente. La possibilité de co-usage est relativement étudiée dans la littérature, bien qu'elle s'applique à des projets peu incités dans le cas français (sols valorisables pour d'autres usages, par exemple agriculture). En effet, les appels à projet sur le solaire favorisent les parcs mis en place sur des surfaces peu valorisables à d'autres usages, comme les friches industrielles.

Par comparaison, les enjeux relatifs à la production d'**énergie solaire sur bâti existant** semblent négligeables. Cette technologie utilise des infrastructures préalablement installées pour d'autres activités (toits de bâtiments, etc.) et n'a donc pas d'impacts attribuables. Ce constat explique notamment le peu de littérature identifiée sur les impacts de ce type de technologie sur la biodiversité, les sols et les paysages.

L'**éolien terrestre** reste l'EnR pour laquelle le plus de littérature est trouvée sur les impacts (guides, méthodologies, etc.). Cette EnR induit la construction d'installations de grande taille avec des éléments mobiles (pales). Ces caractéristiques expliquent les principaux enjeux concernant la biodiversité (gêne comportementale pour les animaux au sol ou en vol, risques de blessures ou mortalité) et les paysages. Les enjeux sur les sols restent faibles au niveau de chaque parc éolien terrestre (artificialisation, imperméabilisation) car les sites sont relativement petits en France, cependant en termes d'occupation des sols ramené à l'unité d'énergie installée, l'impact n'est pas négligeable. La question paysagère est un enjeu majeur dans le cas de l'éolien terrestre (voir focus sur les paysages ci-dessous).

Concernant l'**éolien en mer** (posé et flottant), le fonctionnement des éoliennes engendre des risques similaires à l'éolien terrestre pour la faune volante (blessure / mortalité), bien que les espèces concernées puissent être différentes de celles rencontrées à terre. Une particularité forte de l'éolien en mer posé (et, plus secondairement, de l'éolien en mer flottant et de certaines EMR) concerne la phase de construction et l'installation de fondations (bruits de travaux, altération potentielle des fonds). Il ressort de l'analyse que les enjeux liés au paysage de ces infrastructures sont très semblables en termes d'impacts à l'éolien terrestre, en dehors d'une distance plus importante aux impacts (et à l'absence d'impacts proches). A l'inverse, la pollution chimique générée par certains systèmes (anticorrosifs notamment) ressort comme une thématique dont les impacts sur les fonds marins gagneraient à être mieux étudiés au vu du développement prochain de ces filières. Leurs impacts sur les sédiments et la biodiversité marine restent peu évalués dans la littérature, notamment concernant l'emprise spatiale potentielle.

Les enjeux relatifs aux **énergies marines (EMR)** sont très variables, en fonction des structures de production d'énergie. Les impacts restent peu connus, au vu de la moindre maturité de cette filière (et par conséquent des retours d'expérience moins nombreux). Les questions relatives aux impacts sur les sédiments sont similaires à l'éolien marin, bien que leur intensité puisse être moindre, notamment vis-à-vis des choix d'installation (lestage des hydroliennes moins impactant que forage pour certaines fondations éoliennes en mer posé). Plus particulièrement sur les impacts sur la biodiversité, des similitudes existent entre certains types d'EMR (hydroliennes, installations houlomotrices) et l'éolien en mer (notamment flottant) tandis que des similitudes peuvent être relevées entre les installations marémotrices et l'hydroélectricité fluviale (à retenue). Concernant les impacts de la production d'énergie marine sur les paysages, aucune spécificité notable n'existe par rapport aux aspects généraux développés dans le focus sur les paysages ci-dessous, si ce n'est que la visibilité est fortement atténuée (hors éolien en mer).

D'après la revue de littérature, les principaux enjeux pour les sols liés à la **géothermie** sont relatifs aux travaux d'aménagement et de démantèlement ; en particulier pour la géothermie de surface horizontale, qui nécessite une plus grande emprise (bien que les cas de co-usage soient fréquents durant l'exploitation). La présence de nombreux forages est également responsable d'un impact important en termes d'occupation des sols. A noter que la littérature fait mention de certains risques sur la physique ou la chimie des sols, dont l'incidence reste faible mais qui soulèvent l'importance des travaux préparatoires et du choix du terrain. Concernant la biodiversité, la majorité des informations concernent la géothermie profonde et la géothermie basse température. Il s'agit du type d'EnR pour lequel les aspects biodiversité sont les moins développés dans la littérature. Quant aux enjeux sur les paysages, cette forme de production reste assez proche de la production solaire sol pour les questions de visibilité ; les possibilités de modulation d'agencement offertes (et d'intégration paysagère) par le PV au sol sont par contre plus faibles pour la géothermie.

Dans le cas de la production d'**hydroélectricité avec retenue**, les principaux impacts sur la biodiversité et les sols sont liés à une grande occupation des sols, des changements d'affectation des sols, à la destruction de surfaces importantes d'habitats terrestres et à des modifications profondes du fonctionnement des écosystèmes (cours d'eau), notamment pour les barrages à retenue ; ce qui en fait une EnR à part. La modification des régimes sédimentaires, en amont et en aval de la retenue, constitue un enjeu non négligeable pouvant affecter les sols et les paysages sur des surfaces très étendues. L'historique de développement de l'hydroélectricité et la maturité de la filière conduisent toutefois à une compréhension fine des mécanismes d'impact environnementaux. Sur la question des paysages, les projets sont aujourd'hui abordés sous l'angle de projet de démantèlement, avec la mise en évidence

d'une forte appropriation des aménagements liée à leur multifonctionnalité. Ces projets de démantèlement peuvent être riches en enseignement sur la conduite de tels projets.

Enfin, les enjeux relatifs à l'**hydroélectricité au fil de l'eau** semblent limités en regard des impacts d'autres EnR sur la biodiversité, les sols et les paysages (perturbations faibles d'individus, emprise réduite sur les sols, bonne intégration au paysage). Sur le plan des impacts sur la biodiversité, des différences importantes existent entre les dispositifs de production d'hydroélectricité au fil de l'eau. Par ailleurs, c'est à l'échelle des bassins versants, et non uniquement à l'échelle d'une installation, que doivent être appréhendés ces impacts. Ils ne sont que peu mentionnés dans la littérature.

Focus sur les impacts sur les paysages

Concernant spécifiquement les **impacts sur les paysages**, la bibliographie montre deux aspects communs aux différentes EnR, qu'il convient de faire ressortir ci-après.

Une forte priorité est accordée à la visibilité dans l'étude des impacts. Les impacts sont le plus souvent résumés à la question « Que voit-on de l'aménagement ? ». Cela transparaît dans les méthodes d'évaluation (actuelles et en développement potentiel) et les méthodologies mises en place dans les guides. Cette étude de la visibilité est partielle puisqu'elle ne prend en compte qu'une partie du concept de visibilité (vue de l'installation), en laissant de côté les aspects relatifs au lien avec le territoire d'accueil (cohérence, perturbation, passé historique, échelles, imaginaire, complexité, naturalité, éphémère). Par conséquent, elle ne permet pas de rendre compte précisément des impacts, ni de favoriser une réelle intégration paysagère, ou même de minimiser les impacts paysagers. Cette étude de visibilité est plus ou moins importante suivant le type d'EnR (très marquée pour l'éolien, terrestre ou en mer, marquée pour le solaire, existante pour les autres EnR) ; certaines EnR ne sont que peu concernées du fait de leur faible visibilité (les EMR).

L'autre point commun aux différentes EnR est le fait que les impacts soient peu étudiés sous l'angle de l'acceptation sociale, pourtant facteur essentiel d'intégration. Des méthodes existent mais sont difficiles à mettre en œuvre et finalement peu efficaces pour des projets précis. Elles seraient par contre intéressantes dans le cadre de la planification et de la prévision des impacts en amont des projets, notamment en croisement avec d'autres informations sur les impacts des installations prévues. Par ailleurs, des points communs forts existent entre l'éolien (en général), le solaire, les EMR et la géothermie en matière d'acceptation sociale à construire (projets à l'acceptation en question, au moins au début du projet). L'hydraulique est la forme d'énergie la plus mature et montre qu'après une contestation des projets d'installation (comme pour les autres EnR), les barrages sont souvent bien intégrés au territoire, notamment du fait de leur multifonctionnalité, avec le développement, suite à l'installation, d'activités, touristiques notamment, en lien avec le barrage (pêche, activités nautiques, développement de l'hébergement, etc.).

Ces deux points communs montrent bien qu'au-delà des stricts impacts paysagers de ces EnR, l'enjeu est, pour toutes les EnR, de changer de regard et de manière d'appréhender les projets. C'est un des aspects qui ressort le plus communément de la bibliographie sur l'ensemble des EnR étudiées.

Dépasant le cadre des énergies renouvelables, certaines publications abordent largement la question des paysages de l'après-pétrole, avec des principes d'actions : contextualisation des projets, renforcement des approches intégrées et multifonctionnelles, implication des populations sans oublier les considérations esthétiques, oser parler de la beauté de ces paysages qui doivent joindre l'utile (production d'énergie) et à l'agréable (dégager une esthétique).

10.1.2. Typologie finale des impacts identifiés

La revue de littérature a été menée sur les différentes technologies EnR couvertes dans le cadre de l'étude, concernant leurs impacts sur la biodiversité, les sols et les paysages. La typologie des impacts a été déterminée en amont des recherches (voir section 2.1.1) et a été complétée au fur et à mesure des travaux menés ; elle peut être trouvée dans le Tableau 2. Ainsi, pour les impacts sur les paysages, les informations relatives aux aménagements et aux usagers ont été regroupées.

A l'issue de la revue, il apparaît que les impacts sur la biodiversité, les sols, les sédiments et les paysages sont dans l'ensemble relatifs à ceux identifiés au préalable. Dans le cas des impacts sur les sols et les sédiments, la liste a pu être complétée, principalement pour préciser certaines catégories d'impacts initialement identifiées comme « autres ». Concernant les impacts physiques sur les sols et

les sédiments, il s'agit principalement du changement de la morphologie du sol ou de la perturbation du régime hydro sédimentaire. L'altération du service de régulation des flux d'eau rendu par les sols à l'échelle du bassin versant est également ajoutée. La typologie finale peut être trouvée dans la fiche d'introduction aux impacts sur les sols et les sédiments. A noter que la salinisation du sol est conservée dans la liste des impacts sur les sols ; toutefois, il n'est pas fait mention de relation entre les EnR et la salinisation du sol (pouvant être générée par une mauvaise gestion de l'irrigation ou l'apport de produits riches en sel).

C'est à partir de la liste complète d'impacts sur la biodiversité, les sols, les sédiments et les paysages qu'est défini le contenu des fiches d'impact. Les fiches d'impact ont pour objectif de fournir une vision synthétique de l'avancée des connaissances concernant les impacts sur les sols, les sédiments de la production d'énergies renouvelables. Chaque fiche couvre les impacts identifiés dans les publications scientifiques qui mentionnent explicitement cette EnR et les impacts relatifs à la biodiversité, aux sols, aux sédiments ou aux paysages. Les éléments identifiés visent à contribuer à l'identification de moyens pour réduire encore ces impacts.

Ces travaux font également ressortir l'intérêt de penser la définition et mise en application de certains indicateurs qui seraient applicables à l'ensemble des EnR, afin d'en permettre la comparaison (notamment pour conduire à des stratégies énergétiques territoriales). Ces points sont développés dans un rapport spécifique aux indicateurs sur la biodiversité, les sols, les sédiments et les paysages.

10.2. Analyse comparée des impacts des EnR par rapport aux autres activités humaines

Ainsi que présenté en introduction dans le chapitre 0, les énergies renouvelables représentent fin 2016 16 % du mix énergétique français ; derrière l'énergie nucléaire et les énergies fossiles (produits dérivés du pétrole et gaz principalement). Le développement des EnR est pourtant un enjeu primordial pour la France. Elles font à ce titre l'objet d'une attention toute particulière ; tout comme les impacts environnementaux qui y sont associés, notamment sur la biodiversité, les sols, les sédiments et les paysages. Les chapitres 3 à 9 présentent, pour chacune des énergies étudiées, l'analyse des impacts sur la biodiversité, les sols, les sédiments et les paysages.

Ces impacts ne peuvent cependant être étudiés sans être mis en regard des impacts d'autres activités humaines (énergies conventionnelles, bioénergies, transport, bâtiment, agriculture, industries), qui peuvent par ailleurs utiliser des énergies renouvelables sous forme d'électricité ou de chaleur. La mise en perspective des impacts des EnR est pertinente en comparaison aux énergies conventionnelles, auxquelles elles peuvent se substituer dans le mix énergétique français. Les impacts sur la biodiversité, les sols, les sédiments et les paysages des énergies conventionnelles, des bioénergies, et des autres activités humaines n'entrent pas dans le périmètre d'étude de cet état de l'art (voir section 2.1.4), et n'ont pas fait l'objet d'une recherche bibliographique dédiée. Des éléments de comparaison ont cependant été identifiés dans un nombre limité de publications, et les principaux enseignements sont retranscrits dans la présente section.

Peu de publications traitées dans la présente étude abordent de façon spécifique une analyse comparative des impacts des énergies renouvelables, des bioénergies et des énergies conventionnelles. La majorité de ces publications concerne des analyses de cycles de vie, abordant cette analyse comparative sous un prisme « émissions de gaz à effet de serre » (Siddiqui & Dincer, 2017), besoins énergétiques, effets sur la santé et risques d'accident (McCombie & Jefferson, 2016; Burgherr, Eckle, & Hirschberg, 2012) ou encore « empreinte carbone, consommation d'eau, consommations de terre et coûts » (Hadian, Madani, Gonzalez, Mokhtari, & Mirchi, 2014).

Sur la base d'indicateurs de durabilité globale (efficacité technique, consommations de terres, émissions de gaz, coûts d'investissement et d'entretien, acceptation sociale, qualité de l'air, etc.), (Cartelle Barros, Coira, Pilar de la Cruz López, & del Caño Gochi, 2015) proposent une analyse détaillée de qualité environnementale de plusieurs systèmes de production d'énergie dans une optique de développement durable (dont quatre considérés dans la présente étude : l'éolien, le solaire photovoltaïque, le solaire thermique et la petite hydroélectricité). Selon l'analyse très complète de ces auteurs, les trois premières sources d'énergie ayant l'indice de durabilité globale les plus forts sont le solaire thermique, l'éolien, le solaire photovoltaïque suivi de la petite hydroélectricité. Les notes de ces quatre sources de production

d'énergie, selon (Cartelle Barros, Coira, Pilar de la Cruz López, & del Caño Gochi, 2015), sont beaucoup plus élevées sur le plan environnemental que les énergies conventionnelles.

La volumétrie de littérature sur les impacts environnementaux des modes de production d'énergie est très hétérogène selon les sources de production d'énergie (Jones & Pejchar, 2015), avec une quantité beaucoup plus importante de publications sur les éoliennes que sur le pétrole et le gaz naturel, en ce qui concerne les oiseaux et les chauves-souris.

La production d'énergie, en France comme dans le monde, nécessite des infrastructures dont le fonctionnement, ainsi que l'installation et le démantèlement, génèrent des impacts directs et indirects sur la biodiversité, les sols et les paysages. Dans le cas des énergies conventionnelles, les procédés de génération d'énergie requièrent la consommation de combustible fossile (gaz, pétrole) ou fissile, ce qui n'est pas le cas des énergies renouvelables (utilisation de l'énergie solaire, force du vent, des marées etc.). Au travers des émissions générées par ces procédés conventionnels (pollution de l'air et retombées atmosphériques, impacts des émissions de carbone fossile sur les dérèglements climatiques sur la faune et la flore) mais également par la seule présence de certaines infrastructures, la biodiversité, les sols et les paysages peuvent s'en trouver impactés.

Une analyse comparée des énergies doit également considérer l'extraction des combustibles et des matériaux primaires (cuivre, zinc, etc.) utilisés dans les structures, généralement extraits et transformés hors du territoire français, avant d'y être transportés. De façon similaire, la gestion des déchets issus de la production d'énergie (infrastructures, déchets nucléaires) peut s'avérer non négligeable en termes d'impacts sur les sols, la biodiversité et les paysages. Ainsi l'extraction de pétrole peut générer une pollution des sols, par exemple lorsque les boues et effluents toxiques sont déversés dans des espaces dédiés (observé notamment au Pérou) ; ou les solvants utilisés pour les procédés de raffinage (observé au Canada). Ces substances peuvent ensuite contaminer les sols et les nappes phréatiques à proximité. A ces impacts directs sur les sols s'ajoutent les impacts indirects de l'extraction de ressources fossiles comme le pétrole ou le gaz, notamment au travers de la déforestation des surfaces nécessaires à l'installation de sites d'extraction, dont les impacts sur les sols sont avérés (érosion des sols, altération des services écosystémiques etc.). Enfin, bien que d'occurrence faible, les risques d'accidents liés aux activités de production d'énergie conventionnelle ne sont pas négligeables. En effet, leur intensité est potentiellement importante pour l'énergie nucléaire, les gros barrages hydroélectriques, et le transport du pétrole et du gaz notamment. En comparaison, ces risques sont quasiment inexistantes pour les éoliennes, le PV et d'autres EnR.

Sous réserve de considérer la production d'énergie sur l'ensemble du cycle de vie, et de le ramener à des unités comparables (par exemple, production d'un kWh), il est intéressant de comparer les impacts relatifs à chaque mode de production. La littérature fournit un certain nombre d'informations comparées, principalement sur la contribution de ces énergies au changement climatique ; mais assez peu concernant directement la biodiversité, les sols ou les paysages.

Parmi les quelques publications analysées qui fournissent une comparaison des impacts des EnR avec ceux induits par les installations de production d'énergie conventionnelle, la majorité fait état de comparaisons basées sur des analyses de cycles de vie (Roldán, Martínez, & Peña, 2014; Lavoie, Malo, & Raymond, 2015), entre autres avec un accent sur les émissions de gaz à effet de serre. Les impacts sur la biodiversité ou les sols sont donc indirectement et partiellement traités. Quelques publications générales fournissent des estimations d'emprises de terre nécessaires par unité de puissance installée.

La comparaison des impacts sur la biodiversité, les sols et les paysages des EnR et des énergies conventionnelles nécessiterait des travaux complémentaires conséquents. En l'état des connaissances, il s'agit d'un exercice particulièrement délicat, d'autant plus en l'absence de recherche dédiée de synthèse des impacts réels (observés, suivis) des installations de production d'énergie conventionnelle. L'une des principales difficultés réside dans la complexité de comparer des technologies aux caractéristiques très différentes et dont les impacts intrinsèques sont parfois mal appréhendés (y compris pour les installations d'énergie conventionnelle). Outre le manque de données sur les impacts directs des énergies conventionnelles, à court terme, on peut souligner une difficulté supplémentaire résidant dans les échelles temporelles en jeu, au regard des impacts qu'a le changement climatique à plus long terme (ou le stockage de déchets radioactifs, par exemple), alors que les impacts des EnR sont souvent étudiés à court terme dans le cadre des publications analysées. Les éléments fournis ci-dessous constituent donc des éléments de réflexion mais aucunement une comparaison chiffrée.

10.2.1. Focus sur les impacts sur la biodiversité

Concernant les impacts sur la biodiversité, les emprises nécessaires en **phase de construction** sont généralement faibles pour chaque unité EnR, à l'exception des barrages et retenues hydroélectriques ainsi que certains grands complexes géothermiques. *A contrario*, les emprises pour les installations de production conventionnelle sont importantes. Pour toutes les installations de production d'énergie, des perturbations en phase de construction et altération des milieux sont associés aux engins de travaux, accès, bruits, lumières. L'ampleur des infrastructures des installations de production d'énergie conventionnelle engendre *a priori* des perturbations plus fortes, moins diffuses. De plus, les centrales thermiques doivent être construites à proximité de "réserves" d'eau pour assurer leur refroidissement. Elles sont donc construites en bord de fleuves ou sur le littoral, territoires qui présentent souvent des enjeux environnementaux importants. Par ailleurs, les altérations des milieux connexes (hors emprises) peuvent être importantes pour les installations d'énergie conventionnelle (annexes hydrauliques, ou pompage et rejets dans les cours d'eau pour refroidissement par exemple).

En **phase d'exploitation *in situ***, les caractéristiques très différentes des EnR et des installations de production d'énergie conventionnelle engendrent des variabilités fortes en termes d'impacts possibles, qui rendent les comparaisons très délicates. Les éoliennes en particulier peuvent engendrer des mortalités ou blessures d'animaux volants ; ces aspects sont *a priori* moins prégnants pour les installations d'énergie conventionnelle, bien qu'il soit très difficile d'en estimer l'importance. Les installations EnR et les centrales de production d'énergie conventionnelle peuvent par ailleurs, comme toute construction humaine, engendrer des gênes et perturbations comportementales. Le fonctionnement des centrales d'énergie conventionnelle engendre des perturbations du fonctionnement des écosystèmes (fluviaux ou estuariens) où elles sont implantées, notamment pour le refroidissement (impacts de modification de température principalement). L'hydroélectricité et les installations marémotrices en mer engendrent également des modifications du fonctionnement de ces écosystèmes (par barrière ou altération de débits).

Concernant les bioénergies, les impacts sur la biodiversité sont très variables, selon les technologies, les écosystèmes concernés, les matières premières biosourcées utilisées et les pratiques. Les cultures telles que le maïs ou le soja pour la production de biocarburants nécessitent une utilisation souvent importante de produits agrochimiques (engrais, pesticides) qui sont susceptibles de polluer les écosystèmes aquatiques (Gasparatos, Doll, Esteban, Ahmed, & Olang, 2017). Les politiques ambitieuses de développement des bioénergies utilisant des cultures énergétiques provoquent des CAS (directs et indirects), qui peuvent être l'une des principales causes des impacts sur la biodiversité quand ils s'accompagnent d'une perte et d'un changement d'habitat. Ces impacts, positifs ou négatifs, seront plus ou moins grands selon les écosystèmes remplacés, la conversion directe d'écosystèmes naturels (prairies, forêts) étant plus susceptible d'entraîner des niveaux élevés de perte de biodiversité que la conversion de terres déjà cultivées ou de jachères. Par ex. la culture de palmier à huile pour le biodiésel (CASd), notamment en remplacement de forêts tropicales primaires ou secondaires en Asie du Sud-Est, a un impact important sur la biodiversité (Savilaakso, et al., 2014). Le fort développement de la méthanisation en Allemagne, dû à l'incitation à produire des bioénergies, a provoqué la transformation (CASd) de terres à haute valeur écologique (prairies permanentes, habitats ripariens, et sites au sein d'aires protégées Habitat 2000) en culture de maïs (Ammermann, 2008). La culture d'espèces de graminées pérennes (switchgrass par ex.) ou d'espèces ligneuses (TCR de saule ou de peuplier) pour les biocarburants avancés, notamment sur des terres agricoles marginales ou lorsque la culture remplace une monoculture de céréales, permet à l'inverse (mais pas systématiquement), de diversifier les habitats et avoir des effets bénéfiques sur la biodiversité (Kline, et al., 2015; Eggers, et al., 2009). Les CASi (que l'on estime par modélisation) ont également un impact sur la biodiversité. Ainsi plusieurs études (Searchinger, et al., 2008; Lapola, et al., 2010) suggèrent qu'une augmentation de la production de biocarburant au Brésil, pourrait contribuer (en conjonction avec d'autres causes) à convertir au Brésil des parcours herbagers en terres arables, parcours qui se reconstituent ailleurs aux dépens de la forêt amazonienne. A l'inverse, l'utilisation de résidus de culture, de sous-produits ou de déchets de l'industrie du bois ou de produits bois en fin de vie pour la production de bioénergie ne provoque pas de CAS et n'engendre donc pas de perte ou de changement d'habitat (Kline, et al., 2015). Certaines pratiques de récolte de bois à des fins énergétiques modifient la quantité et la diversité des types de bois mort. Ces évolutions impactent l'habitat d'une partie importante de la biodiversité forestière : espèces saproxyliques (plus de 25 % des espèces présentes en forêt) et ascomycètes qui dépendent du bois mort pour tout ou partie de leur cycle de vie ; amphibiens, reptiles et petits mammifères, pour qui les menus bois constituent des abris ; mycorhizes dont la colonisation est favorisée ; mousses qui bénéficient des conditions microclimatiques entretenues par le bois mort ; etc. Les quelques études disponibles en forêt tempérée montrent que par comparaison avec une récolte conventionnelle, l'export

de menus bois diminue à court terme la diversité des communautés d'insectes saproxyliques à l'échelle de la parcelle et impacte les communautés d'oiseaux. La flore est également affectée: à court terme le nombre d'espèces augmente via la mise en lumière, et à plus long terme la composition peut se modifier en réponse aux modifications de fertilité du sol. De plus, la récolte de menus bois et de souches peut augmenter les risques d'érosion et donc de dégradation des milieux aquatiques (zones humides, ripisylve) (Landmann & Nivet, Projet RESOBIO - Gestion des rémanents forestiers : préservation des sols et de la biodiversité - Synthèse, 2014; Landmann, Recommandations pour une récolte durable de biomasse forestière pour l'énergie - Focus sur les compartiments menus bois et souches (projet GERBOISE), 2018). La récolte du bois-énergie, en entraînant une augmentation de la fréquence des interventions, provoque du tassement et une réduction de la porosité du sol, ce qui affecte la croissance des plantes et peut limiter la régénération de certaines espèces (Monmousseau, Ducouso, Teillac-Deschamps, & Moncorps, 2015). Les études ACV sur les bioénergies (chauffage au bois domestique, collectif et industriel ; biocarburants) comparent leurs impacts environnementaux (acidification, eutrophisation, écotoxicité terrestre et aquatique, toxicité humaine, etc.) à ceux des combustibles ou carburants traditionnels (gaz naturel, fioul, électricité ou essence et diesel), mais pas aux autres EnR (ADEME; BIO Intelligence Service, 2005a; ADEME; BIO Intelligence Service, 2005b; ADEME, MEEDDM, MAAP, AgriMer, & Service, 2010; Querini, 2012). Il serait intéressant de comparer l'ensemble des énergies entre elles.

En **phase d'exploitation ex situ**, les installations EnR présentent généralement peu voire pas d'impacts à distance des installations (même si les effets peuvent être ressentis à une certaine distance des installations, par exemple pour l'hydroélectricité). *A contrario*, les centrales de production d'énergie conventionnelle présentent des besoins importants en combustible (fossile ou fissile). L'extraction de ces éléments (principalement hors de France) ainsi que leur transport engendrent potentiellement des impacts environnementaux importants (destruction de milieux, pollution, etc.), mais variables suivant la réglementation locale, le type d'écosystème affecté, le type de ressource et son mode d'extraction et/ou de traitement.

Pour toutes les installations de production d'énergie, des réseaux (électriques ou de chaleur) sont nécessaires. A l'exception de certains parcs éoliens en mer posés, les centrales de production d'énergie EnR forment des unités de production de relativement faible puissance mais qui sont largement réparties dans les territoires. Elles peuvent s'appuyer sur des réseaux de distribution moins puissants (câbles électriques souvent enterrés) et faciliter une utilisation plus locale de l'énergie. *A contrario*, les centrales conventionnelles (gaz, nucléaire, charbon) forment des unités de très haut niveau de production, nécessitant des réseaux de distribution électrique d'importance (lignes aériennes THT). Les impacts associés sur les réseaux et raccordement sont donc très différents et difficilement comparables aux dispositifs d'énergie conventionnelle. La principale difficulté réside dans l'estimation des effets cumulés des installations rattachées aux EnR pour une puissance équivalente à celle d'une centrale de production conventionnelle ; mais aussi à la prise en compte des renforcements et enjeux associés à l'intégration d'EnR (possibilité de transit d'énergie dans les deux sens, adaptation des réseaux nécessaires, la question de la gestion inertielle des réseaux, gestion de la fréquence, etc.).

Vis-à-vis des impacts sur la biodiversité associée à la **phase de démantèlement**, aucune information comparative n'a été identifiée dans la bibliographie. Pour autant, il est connu que le démantèlement de centrales de production d'énergie conventionnelle constitue une opération longue, techniquement complexe et très coûteuse (en particulier pour le nucléaire). *A contrario*, le démantèlement des installations EnR nécessite le recours à des outils et techniques classiquement mis en œuvre, sur des durées restreintes.

Enfin, les effets sur la biodiversité lors des **phases de pré-construction** puis de **fin de vie** des structures sont faiblement documentés. Les matériaux nécessaires à la construction des installations de production d'énergie sont très variables. Les impacts induits diffèrent significativement, par leur nature (contextes géographiques et naturels concernés) et par leur ampleur sont associés à la phase de pré-construction. En termes de fin de vie, la gestion des déchets constitue un enjeu majeur, notamment pour la filière nucléaire.

A noter que pour les EMR, des analyses comparatives des pressions induites par les EMR et d'autres activités humaines (y compris énergies conventionnelles) ont été réalisées (Hammar, Perry, & Gullström, Introducing ocean energy industries to a busy marine environment, 2017). Une étude récente (Papathanasopoulou, Queirós, Beaumont, Hooper, & Nunes, 2016) fournit une carte systématique des impacts des EMR, du pétrole, du gaz et du nucléaire sur les écosystèmes marins et les services écosystémiques. La majorité des publications intégrées dans cette carte systématique concerne les phases d'installation / construction puis d'exploitation.

10.2.2. Focus sur les impacts sur les sols

Certains enjeux relatifs aux impacts sur les sols sont similaires dans le cas des énergies conventionnelles et renouvelables. Ainsi les impacts liés au transport d'énergie électrique ou de chaleur, parce qu'ils utilisent des infrastructures similaires entre le renouvelable et le conventionnel, peuvent être considérés analogues. Les raccordements d'EnR au réseau électrique se font généralement par des lignes enterrées dont la technologie et les techniques d'installation sont identiques aux réseaux existants de distribution d'électricité. Les gestionnaires de réseaux s'attachent d'ailleurs à accroître cette pratique en délaissant progressivement l'usage de lignes aériennes sur pylônes, considérées comme plus exposées aux aléas climatiques et autres incidents, qui de plus posent des problèmes de pollution des sols en éléments-traces métalliques (voir section 9.2.3). Il en va de même pour les réseaux de chaleurs : par exemple, l'injection de chaleur géothermique (dans une zone urbaine par exemple) se fait sur le même type de réseau que pour les installations traditionnelles ; elle est ensuite reliée au même type de réseau primaire.

Les énergies fossiles, tout comme les énergies renouvelables, contribuent au changement d'affectation des sols : les mines à ciel ouvert, l'exploitation à terre du pétrole et du gaz, ainsi que celle des schistes bitumineux peuvent provoquer des déforestations ou d'autres changements d'affectation des sols directs (CASd) pour les routes d'accès, les plateformes de forage et les oléoducs ; ces accès plus faciles au cœur des forêts provoquant à leur tour l'intensification de l'exploitation forestière, l'accroissement de la déforestation et l'installation de nouvelles communautés humaines, et donc des changements d'affectation indirects (CASi) des sols. Dans la forêt amazonienne, l'exploration et l'exploitation de gaz et de pétrole ont des impacts indirects (généralement involontaires) importants, car elles nécessitent la construction de routes, ces dernières ouvrant la voie à la colonisation des territoires vierges et à la déforestation, notamment pour des usages agricoles (culture et élevage), comme on a pu le constater massivement dans la partie méridionale et orientale de l'Amazonie et plus timidement dans sa partie occidentale (Southgate, Wasserstrom, & Reider, 2009; Finer M., Jenkins, Pimm, Keane, & Ross, 2008). Ainsi, dans l'une des concessions pétrolières de la région Oriente en Equateur, 681 ha sont occupés par les plateformes et autres infrastructures de production et 3 734 ha par les routes d'accès, la surface totale représentant 1 % de la surface de la concession (CASd), tandis que l'installation récente de l'agriculture aux dépens de la forêt au sein de la concession représente 54,4 % de sa surface (CASi) (Southgate, Wasserstrom, & Reider, 2009).

Lors des travaux d'installation, les impacts potentiels rencontrés, par exemple de compaction des sols ou de modification de la morphologie du terrain, sont applicables à toute structure de production d'énergie, renouvelable ou conventionnelle, tandis que les possibilités de co-usage sont réduites voire inexistantes en phase d'exploitation pour les énergies conventionnelles. Concernant la phase de démantèlement, certains aspects du démantèlement des éoliennes en mer ou de certaines EMR pourraient s'avérer similaires à celui d'autres structures offshore telles que les plateformes gazières ou pétrolières (OSPAR Commission, 2006), lorsqu'elles ne peuvent être soulevées directement par des grues en raison de leur poids, et nécessitent d'être découpées sur place. D'autres enjeux diffèrent dans cette comparaison : le démantèlement d'une éolienne en mer ou d'une structure EMR reste plus simple et moins enclin aux accidents (pollution) que dans le cas d'une plateforme pétrolière.

A l'inverse, la production d'hydroélectricité avec réservoir requiert la mise en eau d'une surface importante de sols, et induit donc leur destruction (en tant que sol), réduisant les services écosystémiques qu'ils rendaient. L'impact sur les sols de la combustion de gaz ou de charbon est indirect, via l'émission de polluants dans l'air. Avec les précipitations atmosphériques, les polluants émis retombent au sol et peuvent impacter la qualité, sur plusieurs kilomètres. En plus de la combustion du carburant, son raffinage (par exemple du pétrole brut) entraîne le rejet de polluants atmosphériques. Si les EnR ne nécessitent pas de carburant fossile, leur exploitation peut générer des pollutions, par exemple lors des cas (non systématiques) d'utilisation de protection cathodique par anode sacrificielle, pour l'éolien en mer ou les EMR (et dont les enjeux restent moindres que pour les énergies conventionnelles).

Les installations de préparation et de production des bioénergies (préparation des granulés, chaudières, méthaniseurs, bioraffineries, etc.), ainsi que les voies d'accès pour la récolte et l'acheminement des matières premières et de l'énergie, occupent du sol et sont à l'origine d'artificialisation et

d'imperméabilisation des sols, de la même façon que pour les énergies fossiles. Aucune étude française indiquant les surfaces artificialisées par énergie produite ne semble exister pour les bioénergies. La phase qui occupe le plus d'espace et susceptible de provoquer des CAS est la phase de production des matières premières, lorsque des cultures sont spécifiquement dédiées (cultures énergétiques). Dans ce cas l'occupation des sols rapportée à l'énergie produite est plus importante que pour les autres EnR (PV au sol, éolien terrestre, géothermie, etc.) et des estimations faites pour la France sont : 85 212 ha/(TWh/an) pour du miscanthus ou du TCR (peuplier, eucalyptus ou saule) – électricité, 20 533 ha/(TWh/an) pour du miscanthus ou du TCR – chaleur, 20 741 ha/(TWh/an) pour de la betterave - bioéthanol, 58 617 ha/(TWh/an) pour le blé – bioéthanol, 42 131 ha/(TWh/an) pour le maïs – bioéthanol, 71 679 ha/(TWh/an) pour le colza – biodiésel, 96 766 ha/(TWh/an) pour le tournesol – biodiésel, 205 886 ha/(TWh/an) pour le soja – biodiésel (importations), 21 503 ha/(TWh/an) pour l'huile de palme – biodiésel (importations). Par contre, les cultures énergétiques ne provoquent pas ou peu (uniquement si nouveaux chemins d'accès aux parcelles) d'artificialisation ou d'imperméabilisation des sols, l'affectation des sols est réversible et des co-usages avec des productions alimentaires sont tout à fait possibles (par ex. un champ de colza à destination biodiésel peut l'année suivante produire du blé alimentaire, agroforesterie (pour le bois), coproduction en interculture de cultures alimentaires et de CIVE (cultures intermédiaires à vocation énergétique, pour la méthanisation)) (Feix, 2018). En revanche, l'utilisation de sous-produits et déchets ligneux des industries de transformation du bois, de produits bois en fin de vie, de déchets ménagers ou industriels ou d'effluents d'élevage pour produire des bioénergies, n'occupe pas de sol et ne provoque pas de CAS. De même que l'utilisation de résidus de cultures (pailles, rafles, etc.) et de rémanents forestiers (branches fines, feuillage, écorce, etc.) (Feix, 2018). La mise en culture d'une matière première sur une terre pour produire des biocarburants modifie l'usage de cette terre (par ex. une forêt ou une terre agricole initialement destinée à une production alimentaire) et provoque donc un changement d'affectation des sols direct (CASd). L'impact sur les sols sera plus ou moins grand selon le type de terre remplacée. Par exemple, l'impact d'une production de biocarburants sur des sols de tourbières riches en matière organique, sera fortement négatif. Au niveau mondial, la surface de sol nécessaire pour les biocarburants est de 41,3 Mha en 2013, soit 4 % des terres arables (Rulli, Bellomi, Cazzoli, De Carolis, & D'Odorico, 2016). En Allemagne, le plus gros producteur de biogaz de l'Union Européenne, 5 % de la SAU (ou 7 % des terres arables) sont réservés aux cultures énergétiques pour alimenter les méthaniseurs (Herrmann, 2013). Le retournement de prairie pour produire du maïs, provoque une baisse de matière organique des sols (Meyer-Aurich, et al., 2012). En France, la consommation et la production de biocarburant augmente fortement à partir de 2006. Les superficies mobilisées pour les biocarburants sur le territoire sont de 0,862 Mha (IN NUMERI, 2012) et les CAS s'y sont traduits entre autres par une conversion de prairies en terres arables (Chakir & Vermont, 2013). L'accroissement de la consommation française observé entre 2004 et 2009 a provoqué un CAS de 0,52 Mha en France et à l'étranger (Forslund, Levert, Gohin, & Le Mouél, 2013). Les cultures énergétiques peuvent être responsables de baisses de la matière organique et de la biodiversité des sols et favoriser l'érosion des sols dans certains cas (sols sensibles, faible couverture des sols, certains types de climat). La culture de maïs grain aux Etats-Unis cause plus d'érosion et utilise plus de pesticides que la plupart des autres cultures (Pimentel, Ethanol fuels: energy balance, economics, and environmental impacts are negative, 2003). Au Brésil, la culture de canne pour la production de bioéthanol est responsable d'une érosion et d'une compaction importantes des sols (Sparovek & Schnug, 2001; Martinelli & Filoso, 2008). La mise en culture d'écosystèmes naturels pour produire de la canne à sucre-éthanol provoque une diminution importante de la matière organique du sol les premières années, suivie par une augmentation progressive, aboutissant à une teneur dans le sol, légèrement supérieure à celle de l'écosystème initial au bout d'un siècle (Anderson-Teixeira, Davis, Masters, & Delucia, 2009). Des prélèvements de rémanents forestiers et de résidus de culture trop importants ou trop fréquents pour la production de bioénergies, peuvent provoquer des exportations importantes de nutriments, l'appauvrissement de la fertilité des sols et une plus forte érosion des sols, notamment pour des sols sensibles, peu fertiles ou pentus. Les sols sont plus sensibles à l'érosion éolienne et la diminution de leurs teneurs en matières organiques entraîne une dégradation de leur structure et de leur capacité d'échange cationique, une baisse de leur capacité d'infiltration et de rétention d'eau et de leur productivité (baisse des rendements agricoles), un recours accru aux engrais, une plus grande sensibilité au tassement, une baisse de l'activité microbienne et de leur biodiversité (Lal R. , 2005; Wilhelm, Johnson, Karlen, & Lightle, 2007; Andrews, 2006; Blanco-Canqui, Energy crops and their implications on soil and environment, 2010; Blanco-Canqui & Lal, Corn stover removal for expanded uses reduces soil fertility and structural stability, 2009; Liska, et al., 2014). L'ampleur de ces impacts, toutefois, varie beaucoup en fonction de nombreux paramètres (texture et teneur en matière organique des sols, cultures, température et précipitations, modes de travail du sol, rendements, taux de prélèvement des résidus et pente) (Blanco-Canqui, Energy crops and their implications on soil and

environnement, 2010). Afin de produire des biocarburants, des cultures énergétiques à fort rendement et peu exigeantes, tels que des graminées pérennes (switchgrass ou miscanthus) ou des taillis à courtes rotations (saule ou peupliers) peuvent être utilisées. Comparées aux autres cultures, elles améliorent la qualité des sols, les rendent moins sensibles à la compaction et aux différentes formes d'érosion et en augmentent les teneurs en matière organique, ces bénéfices nécessitant toutefois plusieurs années pour s'exprimer et certaines pratiques devant être évitées (Blanco-Canqui, Energy crops and their implications on soil and environment, 2010; Rowe, Street, & Taylor, 2009; Tolbert, et al., 2000; Tolbert, et al., 2002; Anderson-Teixeira, Davis, Masters, & Delucia, 2009). Les avantages environnementaux des cultures énergétiques pérennes ne sont pas systématiques : les taux d'érosion pour des cultures de miscanthus et de switchgrass sont estimés à 3 fois moins que des cultures annuelles, mais 3 fois plus que des prairies naturelles et plus de 10 fois plus que des forêts et dans tous les cas bien supérieurs aux limites acceptables (Smeets, Lewandowski, & Faaij, 2009).

L'intensification de la sylviculture pour le bois à des fins énergétiques, peut provoquer une dégradation de la qualité des sols. Certaines pratiques de récolte de bois modifient la quantité et la diversité des types de bois mort. Ces évolutions impactent les sols car : le bois mort au sol est un habitat essentiel pour de nombreux microorganismes, notamment fongiques et bactériens ; sa répartition influence la mésofaune et la macrofaune du sol impliquée dans le recyclage de la matière organique et donc la fertilité des sols. De plus, la récolte de menus bois et de souches peut augmenter les risques d'érosion des sols par la mise à nu des sols notamment dans les zones de pente ou dans les parcelles riveraines de cours d'eau (Landmann & Nivet, Projet RESOBIO - Gestion des rémanents forestiers : préservation des sols et de la biodiversité - Synthèse, 2014; Landmann, Recommandations pour une récolte durable de biomasse forestière pour l'énergie - Focus sur les compartiments menus bois et souches (projet GERBOISE), 2018). La récolte du bois-énergie entraîne une augmentation de la mécanisation, du travail du sol et de la fréquence des interventions (pour le travail du sol, l'amendement, la récolte des rémanents et des souches, etc.). Un passage plus fréquent d'engins peut, en fonction du type de sol et de son état hydrique au moment du passage des engins, accroître le tassement du sol, ce qui réduit sa porosité, limitant ainsi l'aération des sols, réduit l'infiltration de l'eau et donc la réserve utile, limite l'activité biologique des sols (notamment des communautés fongiques du sol saprophytes et symbiotiques). Le tassement du sol est d'autant plus fort que le bois mort (assurant une protection physique du sol) est récolté. Le travail du sol nuit fortement aux espèces de faune du sol impliquées dans la décomposition de la matière organique (Monmousseau, Ducouso, Teillac-Deschamps, & Moncorps, 2015; ONF, 2005; Roger-Estrade, et al., 2011).

Les éléments de comparaison – entre énergies renouvelables et conventionnelles – évoqués sur les sols dans les publications suivent une approche par cycle de vie. Deux types d'impacts sur les sols sont étudiés : l'occupation des sols ; et l'impact potentiel en termes d'acidification des sols (bien que cet impact soit traité au travers d'un indicateur agrégeant les compartiments aquatique, aérien et sol).

La revue de quatre publications met en évidence la divergence des résultats et des approches méthodologiques concernant **l'emprise et la transformation des sols**. Hong et al. (Evaluating options for the future energy mix of Japan after the Fukushima nuclear crisis, 2013) conclut lors d'une revue de littérature que l'occupation des sols est plus importante pour les EnR que pour les énergies conventionnelles, tandis que des résultats plus contrastés sont mis en avant par d'autres auteurs, notamment pour refléter les différentes technologies observées (Brown & Whitney, 2011). Dans l'ensemble, la production d'énergie nucléaire ressort comme requérant la plus faible occupation des sols (Hong, Bradshaw, & Brook, 2013; Brown & Whitney, 2011) par unité de puissance et énergie annuelle produite¹⁰⁴ ; et dans une moindre mesure, la production d'énergie à partir de gaz naturel ou de pétrole. Les données sont cependant variables, d'autant plus dans le cas des types de technologies de production d'énergie renouvelable. Selon les publications, l'intensité de l'utilisation de terres liées à la géothermie de surface et le solaire thermique est du même ordre de grandeur que l'utilisation de gaz naturel ou de pétrole (Brown & Whitney, 2011), tandis que Klugmann-Radziemska (Environmental Impacts of Renewable Energy Technologies, 2014) présente l'éolien terrestre comme le système de conversion d'énergie à la plus faible surface par kWh d'électricité générée. Pour Fthenakis et al. (Land use and electricity generation: A life-cycle analysis, 2009) la surface allouée à la production d'électricité par hydroélectricité au fil de l'eau apparaît moindre que dans le cas des centrales à charbon ou nucléaire (3 m²/GWh et de 6 à 33 m²/GWh et 45 m²/GWh respectivement), tandis que le solaire thermique requiert des surfaces similaires au charbon. Le manque d'information dans les publications sur les sous-technologies couvertes ne permet cependant pas de comprendre les divergences dans les résultats

¹⁰⁴ La publication ne mentionne pas si les enjeux de stockage des déchets sont pris en compte

(par exemple, géothermie de surface verticale ou horizontale, solaire thermique *a priori* sur bâti ; etc.), et la grande majorité des projets considérés sont des projets américains.

Concernant les impacts relatifs au **potentiel d'acidification des milieux**, Siddiqui, et al. (Comparative assessment of the environmental impacts of nuclear, wind and hydro-electric power plants in Ontario: A life cycle assessment, 2017) indiquent que la production d'hydroélectricité (avec retenue) a un moindre impact que l'énergie nucléaire ou éolienne terrestre (respectivement 0,01, 0,03 et 0,06 SO₂e/kWh). Cet impact n'est donc pas évalué dans le cas des sols uniquement, mais agrège les résultats de l'impact potentiel sur les milieux aquatiques, aérien et les sols. Les sources d'impact varient selon le type d'énergie produite : ainsi les impacts de la production d'énergie éolienne terrestre sont dus à la construction des infrastructures et dans le cas du nucléaire à la production des carburants et la gestion des déchets nucléaires. D'autres publications mentionnent le potentiel d'acidification de la production d'énergies renouvelables, mais souvent sans l'évaluer ni apporter d'éléments comparatifs avec la production d'énergies conventionnelles (par exemple, le pétrole génère des impacts potentiels sur les sols liés aux oléoducs : pollution des sols en cas de détérioration des oléoducs, dégradation des sols lors de la pause des oléoducs (causés par le mélange, le compactage, l'orniérage ou la détérioration des matières organiques), pollutions des sols dans les champs d'exploitation du pétrole, etc.). La combustion de biomasse est une source de pollution atmosphérique significative ou importante en France (As, Cr, Pb, Se, Zn, PCDD-F, HAP, PCB, HCB) (Vernois & Deglise, 2015) et de dépôts atmosphériques de polluants sur les sols. Les HAP se forment dans des proportions relativement importantes lors de la combustion de bois, lorsqu'elle est incomplète (par ex. foyers domestiques ouverts où la combustion s'effectue dans des conditions moins bien maîtrisées) (Guibaud, 2010). La production de cultures énergétiques peut aussi, selon les itinéraires techniques, être source de pollution des sols par des ETM (comme le Cd avec les engrais minéraux phosphatés) ou par des pesticides.

Peu de données sont donc disponibles et, lorsque c'est le cas, il ne semble pas exister de consensus dans la littérature, notamment sur le vocabulaire et les méthodes de mesure (pour ce qui concerne les impacts en termes de surfaces). Une raison potentielle est que, lorsque l'impact d'une énergie renouvelable est ramené à la production d'un kWh, le résultat pouvant fortement varier dans le cas de certaines technologies (rendement de la technologie, durée de vie de l'installation, dans le cas du solaire, ensoleillement, etc.).

Concernant les impacts sur le sol des autres activités humaines, aucune information n'a été trouvée dans la littérature avec nos critères de recherche. Cependant ces activités requièrent tout autant des matériaux (pour les bâtiments, véhicules de transport, électronique, ou comme intrants dans l'agriculture) et leur utilisation peut nécessiter de l'énergie, ou émettre des polluants.

10.2.3. Focus sur les impacts sur les paysages

Comme pour les autres thématiques, certains **impacts sur les paysages** sont similaires dans le cas des énergies conventionnelles et renouvelables. Les infrastructures conventionnelles génèrent le même type d'impacts visuels (voire plus si l'on considère les panaches de fumée des centrales thermiques comme des impacts) : les constructions hautes (tours, par exemple) sont dans tous les cas peu intégrables, avec les mêmes stratégies ou tentatives d'intégration, parfois peu pertinentes *a posteriori* (la fresque du Verseau sur une des tours de refroidissement de la centrale nucléaire de Cruas).

La principale différence est liée au caractère de production décentralisée des EnR. Ces dernières produisant moins d'énergie, il faut en installer plus, avec par MW une emprise globale des EnR plus grande. Les impacts liés à la densité (encerclement, saturation) existants pour les EnR, et notamment les éoliennes, sont inexistantes pour les énergies conventionnelles sauf sur certains secteurs très localisés, denses en centrales (centrales nucléaires de la vallée du Rhône ou mines et terrils dans le nord par exemple). Le foisonnement nécessaire aux EnR fait également qu'elles sont plus nombreuses sur l'ensemble du territoire (sous réserve de gisement). Ces aspects, qui peuvent être considérés comme des inconvénients, peuvent également être considérés comme des atouts puisqu'en augmentant la visibilité des structures de production d'énergie, elles peuvent augmenter la prise de conscience des impacts et des enjeux de la production d'énergie, aspects que l'on a tendance à oublier (sauf dans certains secteurs) avec les énergies conventionnelles, et notamment leurs déchets.

En termes de fonctionnement des espaces, en dehors des barrages à retenue, qui bouleversent le fonctionnement (axes de circulation notamment) d'une vallée, les EnR génèrent *a priori* moins d'impact

puisque les abords des installations ne nécessitent pas de restrictions particulières, à l'inverse des installations, nucléaires par exemple, qui exigent des restrictions fortes (interdictions de circulation, impossibilité de photographier, de lever des plans, etc.).

Concernant l'acceptation sociale des installations, il est difficile de comparer des installations conventionnelles à maturité, voire vieillissantes et des EnR jeunes, en plein essor. Les centrales nucléaires et les barrages hydroélectriques ont souvent permis aux communes d'accueil de bénéficier de financements (liés aux taxes, d'aménagement ou professionnelle) permettant un accroissement des ressources par rapport aux communes n'accueillant pas de tels aménagements. Les modes d'accompagnement des projets EnR liés à l'intensité des impacts pourraient *a priori* être les mêmes.

Concernant les autres étapes du cycle de vie, les impacts sur le paysage sont *a priori* très similaires puisque les EnR ou le conventionnel nécessitent une extraction de matériaux, nécessitant de mettre en place des carrières ou des mines, dont les impacts varient selon la nature des matériaux utilisés et de l'intensité matière des technologies par MWh produit. Il en est de même pour la fin de vie, avec un recyclage passant par des infrastructures qui ne font pas la différence entre les deux.

Concernant le démantèlement, par contre, les structures conventionnelles sont *a priori* plus impactantes avec des espaces qui ne pourront retourner à leur état initial (pollution, insalubrité, etc. comme à l'ancienne centrale nucléaire de Brennilis, en démantèlement depuis les années 80) alors que les espaces concernés par des EnR sont plutôt réversibles en termes d'usages, notamment s'ils ont déjà fait l'objet de co-usages pendant leur fonctionnement (barrages, sites solaires). Concernant les EnR, des sites éoliens ont à l'inverse été démantelés rapidement pour un retour à leur usage initial. C'est d'ailleurs un des principaux atouts des EnR : ne pas empêcher les possibilités futures d'usage des sols du fait d'une activité temporaire.

En conclusion, peu d'éléments de comparaison existent dans la littérature entre les impacts sur la biodiversité, les sols, les sédiments ou les paysages des énergies renouvelables et conventionnelles. Aucune comparaison avec les autres activités humaines n'a été identifiée dans le cadre de la revue de la littérature. Cependant un certain nombre de publications s'intéressent aux impacts de matériaux primaires et combustibles (quel que soit le secteur d'utilisation), notamment lors des étapes d'extraction et de fabrication ; mais aussi concernant les procédés de fin de vie, en particulier dans le cadre d'un recyclage. Dans le cas d'impacts quantifiables, une analyse comparée par secteur ou par type d'énergie serait envisageable à condition notamment d'allouer à chaque type d'énergie produite les impacts associés à l'étape d'extraction, par exemple concernant les impacts chimiques sur les sols, ou la mortalité de certains individus. Dans le cas d'impacts difficilement voire non quantifiables (par exemple la question des paysages de l'énergie ou de l'acceptation sociale), d'autres approches pourraient être envisagées.

10.3. Manques de connaissance et besoins de recherche identifiés

La revue bibliographique et l'analyse synthétique menées dans le cadre de ce rapport ont permis de mettre en évidence différents manques de connaissance et besoins de recherche. Ils sont brièvement présentés ci-dessous, et sont une introduction aux différentes thématiques abordées dans le cadre de la feuille de route à l'ADEME à ce sujet.

Ainsi, il n'existe que peu de recherches sur les impacts des EnR sur les différentes étapes de leur cycle de vie, qui portent principalement sur des indicateurs ACV. La quasi-totalité de la littérature relative aux impacts des EnR se limite aux activités d'installation et de fonctionnement, voire de démantèlement. La question des impacts générés lors de l'extraction et le traitement de matériaux utilisés dans la fabrication de ces structures, ainsi que leur gestion en fin de vie, n'est que peu étudiée, bien que les impacts associés puissent être non négligeables.

De même, peu d'études comparatives entre les impacts des installations EnR et ceux des bioénergies et énergies conventionnelles ont été identifiées lors de la revue de littérature. La quantité et la qualité de l'information disponible dans la littérature diffèrent entre différentes technologies EnR. Cependant, et notamment dans un objectif d'accompagner la transition énergétique, des travaux comparatifs entre les impacts des EnR et des énergies conventionnelles pourraient être réalisés.

Les débats autour des projets d'EnR et leurs conséquences sur d'autres activités montrent souvent une connaissance partielle des questions énergétiques, notamment du fait du manque de données vérifiables et transparentes. Des études générales de connaissance des liens (positifs ou négatifs) entre EnR et tourisme, immobilier, ou agriculture permettraient de désamorcer certains débats.

Du fait de leur maturité technologique (certaines EnR comme les EMR sont pour la plupart encore au stade de projets) ou de leur positionnement sur le marché français, les impacts des EnR considérés dans l'étude sont inégalement représentés, dont certains ne sont pas ou peu connus. Le niveau de connaissance varie fortement en fonction du type d'impact et d'EnR (depuis « mal connu » jusque « très bien documenté », ainsi que présenté dans le Tableau 5).

Spécifiquement sur l'énergie solaire, aucune comparaison n'a été identifiée concernant les différentes manières de poser ou structurer un parc solaire (en termes de distances entre les rangs, impact de l'ombrage selon la latitude, degré de modification des biotopes, etc.). De plus, il existe peu d'informations concernant les impacts du solaire thermique. Ceux-ci pourraient faire l'objet de recherche afin d'améliorer la compréhension de ces impacts, et les comparer au solaire photovoltaïque (au niveau des panneaux utilisés) et à la géothermie (au niveau des systèmes de raccordements thermiques).

Des conclusions applicables aux autres EnR seront développées dans le cadre de la feuille de route à l'ADEME.

Concernant les impacts sur les sols et les sédiments, il existe par exemple un manque d'information concernant les impacts sur les communautés benthiques des fonds marins, et plus généralement sur les impacts chimiques (évolution des teneurs en matières organiques par exemple) et biologiques sur les sols et la dégradation de certains services écosystémiques rendus par les sols.

Lors de leur mise en place, les infrastructures EnR peuvent avoir un impact non négligeable sur les habitats benthiques (destruction, contamination, etc.).

D'autres impacts sur les sols, comme ceux liés à la compaction et l'érosion des sols, et la réversibilité de ces impacts, lors des phases de chantiers, restent peu étudiés.

Concernant les impacts en termes de surface de sol (occupation, artificialisation, co-usage, changement d'affectation des sols, imperméabilisation), force est de constater que ni le vocabulaire, ni les concepts, ni les méthodes de mesure ne sont homogènes entre les différents documents de la littérature, ce qui empêche de comparer les énergies entre elles ou avec les autres activités humaines, ou de se faire une idée de la réalité des impacts. Ces métriques sont pourtant indispensables, non seulement pour évaluer des impacts sur le sol, mais également pour évaluer les impacts sur la biodiversité (notamment en termes de perte ou de modification des habitats et de fragmentation des paysages). Elles sont également indispensables pour décider des mix énergétiques futurs ou de planification du territoire, pour lesquels on a également besoin de ramener des surfaces à l'unité d'énergie (produite ou installée). De plus, une bonne partie de la littérature concerne des installations d'EnR à l'étranger (Etats-Unis, Chine...) qui sont assez différentes des installations françaises. Il est donc indispensable de standardiser le vocabulaire et les méthodes de mesures et de mener une étude centrée sur la France.

Concernant les impacts sur le paysage, si certains outils ou méthodes sont aujourd'hui bien établis (cartes de visibilité, photomontages), ils ont peu évolué depuis leur développement. Des méthodologies existent mais restent encore aujourd'hui contestées (des contre-expertises de photomontages, pour les projets éoliens en mer, étaient encore demandées en 2015) ; des certifications pourraient aider à la non-contestation des méthodes.

De plus, les outils de calcul de visibilité pourraient être précisés (en prenant en compte la distance ou en croisant les résultats avec d'autres facteurs). Il en est de même pour les simulations ou les photomontages, encore trop contestées (en fonction du support utilisé, de la méthode, etc.).

Plus généralement, les recherches effectuées ont permis de mettre en évidence un manque d'études au niveau français ou européen. De nombreuses études aux Etats-Unis, en Chine ou en Amazonie n'ont pu être transposées au cas de la France du fait de la grandeur des installations (notamment, hydroélectricité avec retenue).

A noter que l'évaluation des impacts cumulés semble limitée, à la fois à l'échelle d'un parc ou d'une installation, ou au niveau d'un territoire.

Enfin, peu d'études réalisent un suivi des indicateurs dans la durée (périodique été/hiver, au fil des ans, etc.). Cela limite la compréhension des impacts au cours du temps.

Des informations plus détaillées, et spécifiques à chaque EnR et à chaque catégorie d'impact, sont présentées tout au long de ce rapport, dans les paragraphes récapitulatifs (identifiés en gras italique en fin d'une section), et dans les sections de synthèse de chaque EnR.

11. Conclusions

Le livrable fournit une analyse synthétique des impacts des énergies renouvelables sur la biodiversité, les sols, les sédiments et les paysages, et des moyens de les caractériser. L'objectif n'était pas de viser une revue systématique de la littérature scientifique, mais bien de réaliser cette analyse synthétique afin de faire le point sur les connaissances actuelles et celles manquantes, dans le but d'élaborer une feuille de route et fixer les priorités pour l'ADEME afin d'améliorer ces connaissances. Ces éléments ont été identifiés à l'issue de recherches de littérature scientifique et de littérature grise, complétées par les retours de l'ADEME et d'experts des différents sujets abordés. Des recherches complémentaires ont été effectuées sur les impacts ou les énergies peu couvertes dans la littérature, afin d'assurer l'exhaustivité des impacts étudiés. L'exhaustivité a été cherchée dans la liste des impacts abordés dans la littérature (à travers l'analyse de diverses revues scientifiques et articles spécifiques) et non dans l'étude de la totalité des publications sur le sujet. Cette manière d'aborder le sujet vise à faire ressortir les principaux impacts identifiés et avérés et manquements en termes de connaissance concernant les impacts des EnR sur la biodiversité, les sols, les sédiments et les paysages. Ces points d'attention, ainsi que la méthodologie mise en œuvre pour la recherche et la sélection des références les plus pertinentes, est présentée dans le chapitre 2 afin de d'assurer la transparence et la réplicabilité du travail.

Les impacts des EnR sur la biodiversité, les sols, les sédiments et les paysages ne sont pas mentionnés ni caractérisés de façon équivalente. Ainsi qu'identifié dans le livrable « Rapport d'analyse bibliométrique », il existe un nombre très important de publications relatives aux impacts des EnR sur la biodiversité et les méthodes d'évaluation de ces impacts, rendant complexe l'identification des éléments les plus pertinents et la synthèse critique des informations sur le sujet. De façon similaire, les impacts générés par les systèmes de production d'énergie éolienne applicables au cas français sont les plus couverts dans la littérature, quel que soit le type d'impact étudié.

L'identification des impacts sur la biodiversité, les sols, les sédiments et les paysages montre que les effets les plus étudiés sont ceux générés lors des étapes d'installation, de fonctionnement et de démantèlement sur site. Il existe peu d'informations sur les impacts générés lors des étapes de fabrication des installations ou de leur gestion en fin de vie (recyclage etc.), à quelques exceptions près, par exemple quelques cas d'étude de l'impact de la fabrication des panneaux photovoltaïques sur les sols.

Une attention particulière a été portée à l'identification et l'analyse des points de convergence ou de divergence entre les études, ainsi que les éventuels manques dans la littérature existante. C'est le cas des impacts générés lors de l'extraction des matériaux, utilisés ensuite pour les installations, et qui ne sont pas couverts dans la littérature sur les EnR. En effet, si les matériaux présents dans les différentes EnR sont bien identifiés, aucun travail n'a été fait pour allouer une partie des impacts sur la biodiversité, les sols et les paysages des activités d'extraction, de transport et mise en forme de ces matériaux aux différentes EnR concernées, qui ne sont pas seules utilisatrices de ces matériaux. Les impacts générés par le démantèlement et le traitement en fin de vie de certaines installations EMR sont mal connus, les infrastructures étant récentes ou toujours utilisées (par exemple, énergie hydraulique). Concernant les énergies marines, l'effort de recherche sur la caractérisation des impacts potentiels est important, mais peu de résultats sont pour le moment disponibles en particulier sur les énergies houlomotrices et les énergies des courants, au vu de la faible maturité de cette technologie (peu de projets).

Différents types d'impacts ont également été identifiés à l'issue de la revue de littérature. Un certain nombre de publications font mention d'impacts avérés, issus d'observations ou de mesures, par exemple pour rendre compte des impacts en termes de blessures et mortalité sur la biodiversité. Dans d'autres documents, les impacts potentiels sont étudiés, par exemple via la modélisation des impacts potentiels sur l'acidification des sols (approche analyse cycle de vie) ou du « consentement à payer » pour évaluer l'acceptation sociale d'un projet. A noter que certains des impacts mentionnés, qu'ils soient avérés ou modélisés, ne sont pas forcément généralisables, mais représentent un risque à limiter (par exemple dans le cas de contamination des sols en cas de fuites).

Les éléments fournis dans ce livrable ont servi de base à la réalisation de fiches de synthèse d'impact pour chaque technologie identifiée d'intérêt parmi les EnR traitées. Ces fiches comprennent la définition, les enjeux et mécanismes liés aux impacts identifiés comme clés, ainsi que les moyens de les évaluer

et les recommandations d'études et de recherche à engager. Les éléments identifiés visent à contribuer à l'identification de moyens pour réduire encore ces impacts.

C'est également à partir de ce livrable qu'a été proposé un premier corpus d'indicateurs permettant d'évaluer les impacts d'une installation de production d'énergie renouvelable sur la biodiversité, les sols et les paysages. Un autre corpus a été proposé en réponse à l'intérêt d'avoir des indicateurs applicables à l'ensemble des EnR, afin d'en permettre la comparaison (notamment pour conduire à des stratégies énergétiques territoriales). Ces points sont développés dans un rapport spécifique aux indicateurs sur la biodiversité, les sols et les paysages. Les retours d'experts viendront compléter les éléments issus de la littérature analysés par l'équipe projet.

Références bibliographiques

- Abanades, J., Greaves, D., & Iglesias, G. (2015). Wave farm impact on beach modal state.
- Adams, J., Kelsey, E., & Felis, J. P. (2016). *Collision and displacement vulnerability among marine birds of the California Current System associated with offshore wind energy infrastructure*. U.S. Geological Survey.
- ADEME. (2015). *Analyse du Cycle de Vie de la production d'électricité d'origine éolienne en France*.
- ADEME. (2018). *Aménager avec la nature en ville - Des idées préconçues à la caractérisation des effets environnementaux, sanitaires et économiques*.
- ADEME et BRGM. (2012). *Principes de fonctionnement et usages de la géothermie*. SER.
- ADEME, Artelys, ARMINES-PERSEE, & Demain, E. (2015). *Un mix électrique 100% renouvelable ? Analyses et optimisations. Rapport final*.
- ADEME, I Care & Consult, BLEZAT Consulting, CERFrance, & Céréopa. (2017). *Agriculture et énergies renouvelables : état de l'art et opportunités pour les exploitations agricoles*. ADEME.
- ADEME, MEEDDM, MAAP, AgriMer, & Service, B. I. (2010). *Analyses de Cycle de Vie appliquées aux biocarburants de première génération consommés en France - Rapport final*.
- ADEME; BIO Intelligence Service. (2005a). *Bilan environnemental du chauffage domestique au bois - Rapport final après revue critique*.
- ADEME; BIO Intelligence Service. (2005b). *Bilan environnemental du chauffage collectif (avec réseau de chaleur) et industriel au bois - Rapport final après revue critique*.
- Aelbrecht, D., Deroo, L., Le Visage, C., & Rabain, A. (2017). *Quel avenir pour le marémoteur en France? Vers un nouveau modèle de développement territorial. Travaux du GT national «nouveau marémoteur» de la SHF*. La Houille Blanche.
- Akella, A. S. (2009). Social, economical and environmental impacts of renewable energy systems.
- Al-Hiyaly, S., McNeilly, T., & Bradshaw, A. (1988). The effects of zinc contamination from electricity pylons—evolution in a replicated situation. *110*(4).
- Al-Hiyaly, S., McNeilly, T., B. A., & Mortimer, A. (1993). The effect of zinc contamination from electricity pylons. Genetic constraints on selection for zinc tolerance. *70*(1).
- Ammermann, K. (2008). Energetische Nutzung nachwachsender Rohstoffe. Auswirkungen auf die Biodiversität und Kulturlandschaft. *83*(3).
- Anderson, D. M. (2015). The impacts of "run-of-river" hydropower on the physical and ecological condition of rivers. *29*.
- Anderson-Teixeira, K., Davis, S., Masters, M., & Delucia, E. (2009). Changes in soil organic carbon under biofuel crops. *1*(1).
- Andrews, S. (2006). *Crop residue removal for biomass energy production: Effects on soils and recommendations*. US Department of Agriculture - Natural Resource Conservation Service.
- Armstrong, A., Ostle, N., & Whitaker, J. (2016). Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling. *11*(7).
- Armstrong, A., Waldron, S., Whitaker, J., & Ostle, N. (2014). Wind farm and solar park effects on plant-soil carbon cycling: Uncertain impacts of changes in ground-level microclimate. *Global Change Biology*, *20*(6).
- Arnórsson, S., Thórhallsson, S., & Stefánsson, A. (2015). Utilization of Geothermal Resources. *71*.
- Aschwanden, J., Stark, H., Peter, D., Steuri, T., Schmid, B., & Liechti, F. (2018). Bird collisions at wind turbines in a mountainous area related to bird movement intensities measured by radar. *220*.
- Ashley, M. C., Mangi, S. C., & Rodwell, L. D. (2014). The potential of offshore windfarms to act as marine protected areas—a systematic review of current evidence. *45*.
- AWATEA. (2008). *Environmental Impacts of Marine Energy Converters*.
- Aydin, N., Kentel, E., & Duzgun, S. (2010). GIS-based environmental assessment of wind energy systems for spatial planning: A case study from Western Turkey.
- Azzellino, A., Conley, D., Vicinanza, D., & Kofoed, J. (2013). Marine renewable energies: Perspectives and implications for marine ecosystems.
- Bailey, H., Brookes, K., & Thompson, P. (2014). Assessing environmental impacts of offshore wind farms: lessons learned and recommendations for the future. *10*.
- Bakken, T., Aase, A., Hagen, D., Sundt, H., Barton, D., & Lujala, P. (2014). Demonstrating a new framework for the comparison of environmental impacts from small- and large-scale hydropower and wind power projects. *140*.
- Bakken, T., Sundt, H., Ruud, A., & Harby, A. (2012). Development of Small Versus Large Hydropower in Norway— Comparison of Environmental Impacts. *20*.

- Baltas, A. E., & Dervos, A. N. (2012). Special framework for the spatial planning & the sustainable development of renewable energy sources. 48.
- Baran, P., & Courret, D. (2013). *Ichtyocompatibilité de turbines hydroélectriques : définition des attentes et des protocoles de tests nécessaires*. ONEMA - IRSTEA.
- Baran, P., Basilico, L., Larinier, M., Rigaud, C., & Travade, F. (2012). *Plan de sauvegarde de l'anguille. Quelles solutions pour optimiser la conception et la gestion des ouvrages?*
- Baril, D. (2000). *Milieu aquatique - état initial et prévision d'impact dans les documents d'incidences*. Conseil supérieur de la pêche.
- Barré, K. (2017). *Mesurer et compenser l'impact de l'éolien sur la biodiversité en milieu agricole - Measure and offset wind energy impacts on biodiversity in farming areas*.
- Bastos, R., Pinhancos, A., Santos, M., Fernandez, R., Vicente, J., Morinha, F., . . . Cabral, J. (2016). Evaluating the regional cumulative impact of wind farms on birds: how can spatially explicit dynamic modelling improve impact assessments and monitoring?
- Bayer, P., Rybach, L., Blum, P., & Brauchler, R. (2013). Review on life cycle environmental effects of geothermal power generation.
- Benchimol, M., & Peres, C. A. (2015). Widespread Forest Vertebrate Extinctions Induced by a Mega Hydroelectric Dam in Lowland Amazonia. 14.
- Bender, A., Francisco, F., & Sundberg, J. (2017). A Review of Methods and Models for Environmental Monitoring of Marine Renewable Energy. *12th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC)*.
- Berchin, I., Garcia, J., Heerdt, M., de Quevedo Moreira, A., Medeiros da Silveira, A., & de Andrade Guerra, J. (2015). Energy production and sustainability: A study of Belo Monte hydroelectric power plant. *Natural Resources Forum*, 39(3-4).
- Bergmann, A., Hanley, N., & Wright, R. (2006). Valuing the attributes of renewable energy investments. 34(9).
- Bergström, L., Kautsky, L., Malm, T., Rosenberg, R., Wahlberg, M., Astrand-Capetillo, N., & Wilhelmsson, D. (2014). Effects of offshore wind farms on marine wildlife - A generalized impact assessment. 9.
- Berkun, M. (2010). Hydroelectric potential and environmental effects of multidam hydropower projects in Turkey. *Energy for sustainable development*, 14(4).
- Bernardino, J., Bispo, R., Costa, H., & Mascarenhas, M. (2013). Estimating bird and bat fatality at wind farms: a practical overview of estimators, their assumptions and limitations.
- Besioa, G., & Losada, M. (2008). Sediment transport patterns at Trafalgar offshore windfarm.
- Betakova, V., Vojar, J., & Sklenicka, P. (2015). Wind turbines location: How many and how far?
- Bezelgues-Courtade, S., & Durst, P. (2009). *Impacts potentiels de la géothermie très basse énergie sur le sol, le sous-sol et les eaux souterraines – Synthèse bibliographique*. ADEME.
- Biotope. (2017).
- Bishop, I., & Miller, D. (2005). Visual assessment of off-shore wind turbines: The influence of distance, contrast, movement and social variables.
- Blanco-Canqui, H. (2010). Energy crops and their implications on soil and environment. 102(2)(403-419).
- Blanco-Canqui, H., & Lal, R. (2009). Corn stover removal for expanded uses reduces soil fertility and structural stability. 73(2)(418-426).
- Boehlert, G., & Gill, A. (2010). Environmental and ecological effects of ocean renewable energy development: a current synthesis.
- Bonar, P., Bryden, I., & Borthwick, A. (2015). Social and ecological impacts of marine energy development.
- Bonneaud, F., & Morinière, T. (2007). *Eoliennes et risques de saturation visuelle : Conclusions de trois études de cas en Beauce*. DREAL Centre.
- Botelho, A., Ferreira, P., Lima, F., Pinto, L., & Sousa, S. (2017). Assessment of the environmental impacts associated with hydropower. 70.
- Boye, H., Caquot, E., Clement, P., La Cochetiere, L., Nataf, J., & Sergent, P. (2013). Rapport de la mission d'étude sur les énergies marines renouvelables.
- Brabant, R., Laurent, Y., Vigin, L., Lafontaine, R., & Degraer, S. (2016). Bats in the Belgian part of the North Sea and possible impacts of offshore wind farms. In S. e. Degraer, *Environmental impacts of offshore wind farms in the Belgian part of the North Sea: Environmental impact monitoring*.
- Brabant, R., Vanermen, N., Stienen, E., & Degraer, S. (2015). Towards a cumulative collision risk assessment of local and migrating birds in North Sea offshore wind farms. 756.

- Bradbury, G., Trinder, M., Furness, B., Banks, A., Caldow, R., & Hume, D. (2014). Mapping Seabird Sensitivity to Offshore Wind Farms. 9.
- Bradley, C., & Biol, P. (2010). Minimizing Surface Disturbance of Alberta's Native Prairie Background to Development of Guidelines for the Wind Energy Industry.
- Bravi, M., & Basosi, R. (2014). Environmental impact of electricity from selected geothermal power plants in Italy. 66.
- Bray, L., Reizopoulou, S., Voukouvalas, E., Soukissian, T., Alomar, C., Vázquez-Luis, M., . . . Hall-Spencer, J. (2016). Expected Effects of Offshore Wind Farms on Mediterranean Marine Life.
- Briffaud, S. (2014). *Ressources paysagères et ressources énergétiques dans les montagnes sud-européennes. Histoire, comparaison, expérimentation (2012-2014)*.
- Bright, J., Langston, R., Bullman, R., Evans, R., Gardner, S., & Pearce-Higgins, J. (2008). Map of bird sensitivities to wind farms in Scotland: A tool to aid planning and conservation.
- Broekel, T., & Alfken, C. (2015). Gone with the wind? The impact of wind turbines on tourism demand. 86.
- Brokbartold, M., Wischermann, M., & Marschner, B. (2012). Plant availability and uptake of lead, zinc, and cadmium in soils contaminated with anti-corrosion paint from pylons in comparison to heavy metal contaminated urban soils. 223(1).
- Brown, P., & Whitney, G. (2011). *U.S. Renewable Electricity Generation: Resources and Challenges*. Congressional Research Service.
- Brühne, T., Tempel, M., & Deshaies, M. (2015). Les paysages postmodernes de l'énergie en Rhénanie-Palatinat.
- BSG Ecology. (2014). *Potential ecological impacts of ground-mounted photovoltaic solar panels in the UK An introduction and literature review*.
- Bubíková, K., & Hrivnák, R. (2018). Artificial ponds in Central Europe do not fall behind the natural ponds in terms of macrophyte diversity. 419.
- Buck, W., Harris, R., Shaw, A., Piercey-Normore, M., Tabaei, A., Antonovics, J., & Crone, E. (1999). Unusual lichens under electricity pylons on zinc-enriched soil. 130-132.
- Burgherr, P., Eckle, P., & Hirschberg, S. (2012). Hazards and accident risks of fossil, nuclear and renewable energy technologies. *Advances in Safety, Reliability and Risk Management - Proceedings of the European Safety and Reliability Conference, ESREL 2011*.
- Busch, M., & Garthe, S. (2016). Approaching population thresholds in presence of uncertainty: Assessing displacement of seabirds from offshore wind farms. 56.
- Busch, M., Buisson, R., Barrett, Z., Davies, S., & Rehfish, M. (2015). *Developing a Habitat Loss Method for Assessing Displacement Impacts from Offshore Wind Farm*. Joint Nature Conservation Committee.
- Busch, M., Kannen, A., Garthe, S., & Jessopp, M. (2013). Consequences of a cumulative perspective on marine environmental impacts: offshore wind farming and seabirds at North Sea scale in context of the EU Marine Strategy Framework Directive. 71.
- Bush, D., & Hoagland, P. (2016). Public opinion and the environmental, economic and aesthetic impacts of offshore wind. 120.
- Cada, G., Ahlgrimm, J., Bahleda, M., Bigford, T., Stavrakas, S., Hall, D., . . . Sale, M. (2007). Potential impacts of hydrokinetic and wave energy conversion technologies on aquatic environments.
- Callaway, R., Bertelli, C., Lock, G., Carter, T., Friis-Madsen, E., Unsworth, R., . . . Neumann, F. (2017). Wave and Tidal Range Energy Devices Offer Environmental Opportunities as Artificial Reefs. *12th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC)*.
- Caporale, D., & De Lucia, C. (2015). Social acceptance of on-shore wind energy in Apulia Region (Southern Italy). 52.
- Cartelle Barros, J., Coira, M., Pilar de la Cruz López, M., & del Caño Gochi, A. (2015). Assessing the global sustainability of different electricity generation systems. 89.
- Carullo, L., Russo, P., Riguccio, L., & Tomaselli, G. (2013). Evaluating the landscape capacity of protected rural areas to host photovoltaic parks in Sicily. 4.
- Cass, N., & Walker, G. (2009). Emotion and rationality: The characterisation and evaluation of opposition to renewable energy projects. 2(1).
- CGDD. (2015). *Paysages, territoires, transitions : Retour sur une démarche de préfiguration*.
- Chakir, R., & Vermont, B. (2013). *Étude complémentaire à l'analyse rétrospective des interactions du développement des biocarburants en France avec l'évolution des marchés français et mondiaux et les changements d'affectation des sols*. ADEME, INRA.
- Chataignier, S., & Jobert, A. (2003). Des éoliennes dans le terroir. Enquête sur « l'inacceptabilité » de projets de centrales éoliennes en Languedoc-Roussillon. 54.

- Chen, A., Wu, M., Chen, K., Sun, Z., Shen, C., & Wang, P. (2016). Main issues in research and practice of environmental protection for water conservancy and hydropower projects in China. 9.
- Chen, S., Chen, B., & Fath, B. (2015). Assessing the cumulative environmental impact of hydropower construction on river systems based on energy network model. 42.
- Chester, E., & Robson, B. (2013). Anthropogenic refuges for freshwater biodiversity: Their ecological characteristics and management. 166.
- Chiabrando, R., Fabrizio, E., & Garnero, G. (2009). The territorial and landscape impacts of photovoltaic systems: Definition of impacts and assessment of the glare risk. 13(9).
- Chiabrando, R., Fabrizio, E., & Garnero, G. (2011). On the applicability of the visual impact assessment OASPP tool to photovoltaic plants. 15(1).
- Chias, P., & Abad, T. (2014). Impact assessment of the renewable energies in the cultural heritage: The case of the way of St. James in Spain.
- Chipindula, J., Botlaguduru, V., Du, H., R., K., & Huque, Z. (2018). Life Cycle Environmental Impacts of Onshore and Offshore Wind Farms in Texas. 10.
- Christel, I., Certain, G., Cama, A., Vieites, D., & Ferrer, X. (2013). Seabird aggregative patterns: A new tool for offshore wind energy risk assessment.
- Cialdea, D., & Mastronardi, L. (2014a). New Land Use in Rural Marginal Areas. Renewable Energy vs Landscape Preservation.
- Cialdea, D., & Quercio, N. (2014b). An overview on the Molise (Italy) renewable energy law: the conflict between the landscape protection and the territory management. International Conference on Renewable Energies and Power Quality.
- Coates, D., Deschutter, Y., Vincx, M., & Vanaverbeke, J. (2014). Enrichment and shifts in macrobenthic assemblages in an offshore wind farm area in the Belgian part of the North Sea. 95.
- Cook, A., & Collier, M. (2015). Understanding avian collision rate modelling and application at the population level.
- Cook, A., Humphreys, E., Masden, E., & Burton, N. (2014). *The avoidance rates of collision between birds and offshore turbines*. BTO.
- Cook, D., Davíðsdóttir, B., & Kristófersson, D. (2017). An ecosystem services perspective for classifying and valuing the environmental impacts of geothermal power projects.
- Copping, A. (2018). The state of knowledge for environmental effects: driving consenting/permitting for the marine renewable energy industry.
- Copping, A., Battey, H., Brown-Saracino, J., Massaua, M., & Smith, C. (2014). An international assessment of the environmental effects of marine energy development.
- Copping, A., Grear, M., Jepsen, R., Chartrand, C., & Gorton, A. (2017). Understanding the potential risk to marine mammals from collision with tidal turbines.
- Copping, A., Hanna, L., Whiting, J., Geerlofs, S., Grear, M., Blake, K., . . . Battey, H. (2013b). *Environmental Effects of Marine Energy Development Around the World. Annex IV Final Report*.
- Copping, A., Sather, N., Hanna, L., Whiting, J., Zydlewski, G., Staines, G., . . . Masden, E. (2016). *Annex IV 2016 State of the Science Report: Environmental Effects of Marine Renewable Energy Development Around the World*.
- Copping, A., Smith, C., Hanna, L., Battey, H., Whiting, J., Reed, M., . . . Massaua, M. (2013a). Tethys: Developing a commons for understanding environmental effects of ocean renewable energy.
- Coulaud, J., & McNeilly, T. (1992). Zinc tolerance in populations of *Deschampsia cespitosa* (Gramineae) beneath electricity pylons. 179(3-4).
- Couret, D. (2014). *Problématique des impacts de la gestion par éclusées des aménagements hydroélectriques sur les populations de poissons : caractérisation des régimes d'éclusées et du niveau de perturbation hydrologique*. Institut National Polytechnique de Toulouse.
- Cox, S., Witt, M., Embling, C., Godley, B., Hosegood, P., Miller, P., . . . Ingram, S. (2017). Temporal Patterns in Habitat Use by Small Cetaceans at an Oceanographically Dynamic Marine Renewable Energy Test Site in the Celtic Sea.
- Cryan, P., Gorresen, P., Hein, C., Schirmacher, M., Diehl, R., Huso, M., . . . Dalton, D. (2014). Behavior of bats at wind turbines.
- Cycleco. (2015). *Analyse du Cycle de Vie de la production d'électricité d'origine éolienne en France*.
- Dähne, M., Tougaard, J., Carstensen, J., Rose, A., & Nabe-Nielsen, J. (2017). Bubble curtains attenuate noise from offshore wind farm construction and reduce temporary habitat loss for harbour porpoises. 580.

- DDEA11. (2009). *Guide méthodologique sur le photovoltaïque au sol dans l'Aude*. Direction départementale équipement agriculture de l'Aude.
- DDT19. (2010). *Guide à l'usage des parties prenantes des projets d'installation de panneaux photovoltaïques en Corrèze*. Direction départementale des territoires de la Corrèze.
- DDTM34. (2010). *Guide méthodologique sur le photovoltaïque dans l'Hérault à l'usage des élus*. Direction départementale des territoires et de la mer de l'Hérault.
- De Lucas, M., Janss, G., Whitfield, D., & Ferrer, M. (2008). Collision fatality of raptors in wind farms does not depend on raptor abundance. 45.
- Delicado, A., Figueiredo, E., & Silva, L. (2016). Community perceptions of renewable energies in Portugal: Impacts on environment, landscape and local development.
- Denholm, P., Hand, M., Jackson, M., & Ong, S. (2009). Land-Use Requirements of Modern Wind Power Plants in the United States.
- Depellegrin, D., Blažauskas, N., & Egarter-Vigl, L. (2014). An integrated visual impact assessment model for offshore windfarm development. 98.
- Deshais, M. (2015). Energies renouvelables et territoires : les défis de la transition énergétique en Allemagne.
- Desideri, U., Proietti, S., Zepparelli, F., Sdringola, P., & Bini, S. (2012). Life Cycle Assessment of a ground-mounted 1778 kWp photovoltaic plant and comparison with traditional energy production systems.
- Devault, D., & Péné-Annette, A. (2017). Analysis of the environmental issues concerning the deployment of an OTEC power plant in Martinique.
- Devereux, C., Denny, M., & Whittingham, M. (2008). Minimal effects of wind turbines on the distribution of wintering farmland birds.
- Di Pippo, R. (2012). *Geothermal Power Plants: Principles, Applications, Case Studies and Environmental Impact*.
- Dierschke, V., Furness, R., & Garthe, S. (2016). Seabirds and offshore wind farms in European waters: Avoidance and attraction. 202.
- Dierschke, V., Furness, R., Gray, C., Petersen, I., Schmutz, J., Zydels, R., & Daunt, F. (2017). *Possible Behavioural, Energetic and Demographic Effects of Displacement of Red-throated Divers*. JNCC Report No: 605.
- Dinesh, H., & Pearce, J. (2016). The Potential of Agrivoltaic Systems. *Renewable and sustainable energy reviews*, 54.
- Dodemaide, D., Matthews, T., Iervasi, D., & Lester, R. (2018). Anthropogenic water bodies as drought refuge for aquatic macroinvertebrates and macrophytes.
- Dubois, C., Droeven, E., Kummert, M., Doguet, A., & Feltz, C. (2006). La patrimonialisation : outil ou écueil de la gestion des paysages.
- Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., & Ferard, Y. (2011a). Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable energy*, 36.
- Dupraz, C., Talbot, G., Marrou, H., Wery, J., Roux, S., Liagre, F., . . . Nogier, A. (2011b). To mix or not to mix: evidences for the unexpected high productivity of new complex agrivoltaic and agroforestry systems.
- Edmonds, N., Firmin, C., Goldsmith, D., Faulkner, R., & Wood, D. (2016). A review of crustacean sensitivity to high amplitude underwater noise : Data needs for effective risks assessment in relation to UK commercial species.
- Eggers, J., Tröltzsch, K., Falcucci, A., Maiorano, L., Verburg, P., & Framstad, E. (2009). Is biofuel policy harming biodiversity in Europe? . 1(1).
- El-Geziry, T. M., Bryden, I. G., & Couch, S. J. (2009). Environmental impact assessment for tidal energy schemes: an exemplar case study of the Strait of Messina. 8(1).
- Environnement Canada. (2012). *Evaluation de la performance environnementale des technologies solaires photovoltaïques*. Environnement Canada.
- Espinosa, N., Zimmermann, Y., dos Reis Benatto, G., Lenz, M., & Krebs, F. (2016). Outdoor fate and environmental impact of polymer solar cells through leaching and emission to rainwater and soil. 9.
- Fahrner, G. (2011). *Typologie des impacts potentiels des ouvrages hydroélectriques sur les populations de truite situées en aval*.
- FAO. (2011). The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW) - Managing systems at risk.
- Farfán, M. A., Duarte, J., Real, R., Muñoz, A. R., Fa, J. E., & Vargas, J. M. (2017). Differential recovery of habitat use by birds after wind farm installation: A multi-year comparison.

- Fearnside, P. (2016). Environmental and Social Impacts of Hydroelectric Dams in Brazilian Amazonia: Implications for the Aluminum Industry. 77.
- Feix, I. (2018). Chapitre 8 - Sols et énergie. In J. Berthelin, C. Valentin, & J. Munch, *Les sols au cœur de la zone critique 1: Fonctions et services* (Vol. 1). ISTE Editions.
- Félix-Faure, J., Chanudet, V., Walter, C., Dorioz, J., Baudoin, J., Gaillard, J., . . . Dambrine, E. (2017). Evolution des sols ennoyés sous les retenues de barrage : Influence sur l'écologie des plans d'eau et la dynamique des gaz à effet de serre. 24 (1).
- FEM. (2013). *Guide d'évaluation des impacts environnementaux pour les technologies hydroliennes en mer : GHYDRO*.
- Ferrario, V., & Castiglioni, B. (2017). Visibility/invisibility in the 'making' of energy landscape. Strategies and policies in the hydropower development of the Piave river (Italian Eastern Alps). 108.
- Finer, M., & Jenkins, C. N. (2012). Proliferation of Hydroelectric Dams in the Andean Amazon and Implications for Andes-Amazon Connectivity. 7(4).
- Finer, M., Jenkins, C., Pimm, S., Keane, B., & Ross, C. (2008). Oil and gas projects in the western Amazon: threats to wilderness, biodiversity, and indigenous peoples.
- Floeter, J., van Beusekom, J., Auch, D., Callies, U., Carpenter, J., Dudeck, T., . . . North, R. (2017). Pelagic effects of offshore wind farm foundations in the stratified North Sea. 156(154-173).
- Foo, C., Bennett, V., Hale, A., Korstian, J., Schildt, A., & Williams, D. (2017). Increasing evidence that bats actively forage at wind turbines.
- Forslund, A., Levert, F., Gohin, A., & Le Mouél, C. (2013). *Étude complémentaire à l'analyse rétrospective des interactions du développement des biocarburants en France avec l'évolution des marchés français et mondiaux et les changements d'affectation des sols, Une analyse à l'aide du modèle MATSIM-LUCA, Synthèse*. ADEME, INRA.
- Fortin, M., & Brisson, G. (2015). Acceptabilité sociale, énergies, ressources naturelles : une perspective territoriale.
- Fortin, M., Dormaels, M., & Handfield, M. (2017). Impact des paysages éoliens sur l'expérience touristique : Enquête dans la péninsule gaspésienne (Québec, Canada). 36(2).
- Fox, C., Benjamins, S., Masden, E., & Miller, R. (2017). Challenges and opportunities in monitoring the impacts of tidal-stream energy devices on marine vertebrates.
- Frantál, B., & Kunc, J. (2011). Wind turbines in tourism landscapes: Czech Experience. 38(2).
- Fraser, S. (2017). *Acoustic investigation of the hydrodynamics and ecology of a tidal channel and the impacts of a marine renewable energy installation*.
- Fraser, S., Williamson, B., Nikora, V., & Scott, B. (2018). Fish distributions in a tidal channel indicate the behavioural impact of a marine renewable energy installation.
- Frick, W. F., Baerwald, E. F., Pollock, J. F., Barclay, R. M., Szymanski, J. A., Weller, T. J., . . . McGuire, L. P. (2017). Fatalities at wind turbines may threaten population viability of a migratory bat. 209.
- Frid, C., Andonegi, E., Depestele, J., Judd, A., Rihan, D., Rogers, S., & Kenchington, E. (2012). The environmental interactions of tidal and wave energy generation devices.
- Fthenakis, V., & Kim, H. (2009). Land use and electricity generation: A life-cycle analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13.
- Furness, R., Wade, H., & Masden, E. (2013). Assessing vulnerability of marine bird populations to offshore wind farms. 119.
- Furness, R., Wade, H., Robbins, A., & Masden, E. (2012). Assessing the sensitivity of seabird populations to adverse effects from tidal stream turbines and wave energy devices.
- Garthe, S., Markones, N., & Corman, A. (2017). Possible Impacts of Offshore Wind Farms on Seabirds: A Pilot Study in Northern Gannets in the Southern North Sea. 158.
- Gartman, V., Bulling, L., & Dahmen, M. (2016). Mitigation Measures for Wildlife in Wind Energy Development, Consolidating the State of Knowledge — Part 1: Planning and Siting, Construction.
- Gasparatos, A., Doll, C., Esteban, M., Ahmed, A., & Olang, T. (2017). Énergie renouvelable et biodiversité : les implications pour parvenir à une économie verte. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70.
- Gerbinet, S., Belboom, S., & Léonard, A. (n.d.). Évaluation de l'impact environnemental lié à la production d'électricité d'origine photovoltaïque par analyse du cycle de vie.
- Ghenai, C. (2012). *Life Cycle Analysis of Wind Turbine*. Sustainable Development - Energy, Engineering and Technologies - manufacturing and Environment.
- Gibbons, S. (2014). Gone with the wind: Valuing the visual impacts of wind turbines through house prices.

- Gibson, L., Wilman, E., & Laurance, W. (2017). How Green is 'Green' Energy?
- Gill, A., Bartlett, M., & Thomsen, F. (2012). Potential interactions between diadromous fishes of U.K. conservation importance and the electromagnetic fields and subsea noise from marine renewable energy developments. 81.
- Giraud, M. (2016). *Évaluation de l'impact potentiel d'un upwelling artificiel lié au fonctionnement d'une centrale à énergie thermique des mers sur le phytoplancton*. LEMAR.
- Gomes, P., & Larinier, M. (2008). *Dommages subis par les anguilles lors de leur passage au travers des turbines Kaplan. Établissement de formules prédictives*. ONEMA.
- Gove, B., Langston, R., McCluskie, A., Pullan, J., & Scrase, I. (2013). *Wind farms and birds ; an updated analysis of the effects of wind farms on birds, and best practice guidance on integrated planning and impact assessment. Final*. Strasbourg: Council of Europe - Convention on the Conservation of European Wildlife and Natural Habitats.
- Gove, B., Williams, L., Beresford, A., Roddis, P., Campbell, C., Teuten, E., . . . Bradbury, R. (2016). Reconciling biodiversity conservation and widespread deployment of renewable energy technologies in the UK.
- Gracey, E., & Verones, F. (2016). Impacts from hydropower production on biodiversity in an LCA framework a €"review and recommendations. 21.
- Grassi, S., & Klein, T. (2016). 3D augmented reality for improving social acceptance and public participation in wind farms planning.
- Greaves, D., Conley, D., Magagna, D., Aires, E., Chambel Leitão, J., Witt, M., . . . O'Callaghan, J. (2016). Environmental Impact Assessment: Gathering experiences from wave energy test centres in Europe.
- Griebler, C., Briemann, H., Haberer, C., Kaschuba, S., Kellermann, C., Stumpp, C., . . . Lueders, T. (2016). Potential impacts of geothermal energy use and storage of heat on groundwater quality, biodiversity, and ecosystem processes.
- Griffin, R., Chaumont, N., Denu, D., Guerry, A., Kim, C., & Ruckelshaus, M. (2015). Incorporating the visibility of coastal energy infrastructure into multi-criteria siting decisions. 62.
- Grill, G., Lehner, B., Lumsdon, A., MacDonald, G., Zarfl, C., & Liermann, C. (2015). An index-based framework for assessing patterns and trends in river fragmentation and flow regulation by global dams at multiple scales.
- Grippio, M., Hayse, J., & O'Connor, B. (2014). Solar Energy Development and Aquatic Ecosystems in the Southwestern United States: Potential Impacts, Mitigation, and Research Needs.
- Grünkorn, T., Blew, J., Coppack, T. K., Nehls, G., Potiek, A., M., R., . . . Weitekamp, S. (2016). *Prognosis and assessment of bird collision risks at wind turbines in northern Germany (PROGRESS)*. Final report commissioned by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy in the framework of the 6. Energy research programme of the federal government.
- Grunkorn, T., Blew, J., Kruger, O., Potiek, A., Reichenbach, M., von Ronn, J., . . . Nehls, G. (2017). A Large-Scale, Multispecies Assessment of Avian Mortality Rates at Land-Based Wind Turbines in Northern Germany. *Wind Energy and Wildlife Interactions. Proceedings of the CWW2015 Conference, Chapter 3*.
- Gueorguieva-Faye, D. (2006). Le problème de l'acceptation des éoliennes dans les campagnes françaises : deux exemples de la proximité géographique. 7.
- Guerber, F., & Roche, P.-A. (2017). Hydroélectricité de forte puissance, autres usages de l'eau et reconquête de la biodiversité : une réflexion prospective sur les politiques publiques. Synthèse du séminaire du 4 novembre 2016. 3.
- Guérin, F. (2006). *Emission de gaz à effet de serre (CO2, CH4) par une retenue de barrage hydroélectrique en zone tropicale (Petit-Saut, Guyane française) : expérimentation et modélisation*.
- Guerin, T. (2017). A case study identifying and mitigating the environmental and community impacts from construction of a utility-scale solar photovoltaic power plant in eastern Australia. *Solar Energy*, 146.
- Guibaud, B. (2010). Le chauffage au bois et la qualité de l'air. 31(2).
- Günnewig, D., Sieben, A., Püschel, M., Bohl, J., & Mack, M. (2009). *Guide sur la prise en compte de l'environnement dans les installations photovoltaïques au sol - l'exemple allemand*. DGEC.
- Haapala, K., & Prempreeda, P. (2014). Comparative life cycle assessment of 2.0 MW wind turbines. 3(2).
- Hadian, S., Madani, K., Gonzalez, J., Mokhtari, S., & Mirchi, A. (2014). Sustainable Energy Planning with Respect to Resource Use Efficiency: Insights for the United States. *Conférence scientifique*.

- Hähnlein, S., Bayer, P., & Blum, P. (2010). International legal status of the use of shallow geothermal energy.
- Hähnlein, S., Bayer, P., Ferguson, G., & Blum, P. (2013). Sustainability and policy for the thermal use of shallow geothermal energy. 59.
- Hammar, L., Eggertsen, L., Andersson, S., Ehnberg, J., Arvidsson, R., Gullström, M., & Molander, S. (2015). A probabilistic model for hydrokinetic turbine collision risks: exploring impacts on fish. 10(3).
- Hammar, L., Perry, D., & Gullström, M. (2016). Offshore Wind Power for Marine Conservation.
- Hammar, L., Perry, D., & Gullström, M. (2017). Introducing ocean energy industries to a busy marine environment.
- Hanger, S., Komendantova, N., Schinke, B., Zejli, D., Ihlal, A., & Patt, A. (2016). Community acceptance of large-scale solar energy installations in developing countries: Evidence from Morocco. 14.
- Hanssen, F., May, R., Van Dijk, J., Stokke, B., & De Stefano, M. (2018). *Spatial Multi-Criteria Decision Analysis (SMCDA) toolbox for Consensus-based Siting of Powerlines and Wind-power plants (ConSite)*. Norwegian Institute for Nature Research (NINA).
- Harwood, J., King, S., Schick, R., Donovan, C., & Booth, C. (2014). *A draft protocol for implementing the interim population consequences of disturbance (PCOD) approach: assessing the effects of UK offshore renewable energy developments on marine mammal populations*. . Marine Scotland science.
- Hastie, G., Russell, D., Lepper, P., Elliot, J., Wilson, B., Benjamins, S., & Thompson, D. (2018). Harbour Seals Avoid Tidal Turbine Noise: Implications for Collision Risk.
- Hastik, R., S., B., & Geitner C., H. C. (2015). Renewable energies and ecosystem service impacts.
- Hawkins, A., & Popper, A. (2017). A Sound Approach to Assessing the Impact of Underwater Noise on Marine Fishes and Invertebrates.
- Heinis, F., de Jong, C., & Group, R. U. (2015). *Framework for assessing ecological and cumulative effects of offshore wind farms - Cumulative effects of impulsive underwater sound on marine mammals*. Rijkswaterstaat Zee en Delta.
- Hernandez, R., Easter, S., Murphy-Mariscal, M., Maestre, F., Tavassoli, M., Allen, E., . . . Allen, M. (2014). Environmental impacts of utility-scale solar energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20.
- Herrmann, A. (2013). Biogas production from maize: current state, challenges and prospects. 2. Agronomic and environmental aspects, *Bioenergy research*, . 6(1).
- Hill, M., Hassall, C., Oertli, B., Fahrig, L., Robson, B., Biggs, J., . . . Wood, P. (2018). New policy directions for global pond conservation.
- Hitchman, S., Mather, M., Smith, J., & Fencl, J. (2018). Habitat mosaics and path analysis can improve biological conservation of aquatic biodiversity in ecosystems with low-head dams.
- Hong, S., Bradshaw, C., & Brook, B. (2013). Evaluating options for the future energy mix of Japan after the Fukushima nuclear crisis. *Energy Policy*, 56.
- Hooper, T., & Austen, M. (2013). Tidal barrages in the UK: Ecological and social impacts, potential mitigation, and tools to support barrage planning.
- Horn, J., Arnett, E., & Kunz, T. (2008). Behavioral Responses of Bats to Operating Wind Turbines. 72.
- Horváth, G., Blahó, M., Egri, Á., Kriska, G., Seres, I., & Robertson, B. (2010). Reducing the Maladaptive Attractiveness of Solar Panels to Polarotactic Insects.
- Hötter, H., Krone, O., & Nehls, G. (2017). *Birds of Prey and Wind Farms - Analysis of Problems and Possible Solutions*. Springer.
- Hötter, H., Thomsen, K., & Köster, H. (2006). Impacts on biodiversity of exploitation of renewable energy sources: the example of birds and bats.
- Humphreys, E., Cook, A., & Burton, N. (2015). *Collision, displacement and barrier effect concept note*. BTO Research Report 669.
- Hunt, T. (2001). Five lectures on environmental effects of geothermal utilization.
- Hutchison, I., & Copping, A. (2016). *A Coordinated Action Plan for Addressing Collision Risk for Marine Mammals and Tidal Turbines*. Aquatera Ltd, Pacific Northwest National Laboratory (PNNL).
- Hutchison, Z., Sigray, P., He, H., Gill, A., King, J., & Gibson, C. (2018). *Electromagnetic Field (EMF) Impacts on Elasmobranch (shark, rays, and skates) and American Lobster Movement and Migration from Direct Current Cables*. Bureau of Ocean Energy Management.
- Hydro-Quebec. (2016). *A renewable energy option: Deep geothermal energy*.

- IN NUMERI. (2012). *Analyse rétrospective des interactions du développement des biocarburants en France avec l'évolution des marchés français et mondiaux (productions agricoles, produits transformés et coproduits) et les changements d'affectation des sols*. ADEME.
- Inger, R., Attrill, M., Bearhop, S., Broderick, A., Grecian, J., Hodgson, D., . . . Witt, M. (2009). Marine renewable energy: potential benefits to biodiversity? An urgent call for research.
- Itty, C., & Duriez, O. (2017). Le suivi par GPS, une méthode efficace pour évaluer l'impact des parcs éoliens sur des espèces à forts enjeux de conservation : l'exemple de l'Aigle royal (*Aquila chrysaetos*) dans le sud du massif central. *Actes du séminaire Eolien et Biodiversité - 21 et 22 novembre 2017*. Artigues-près-Bordeaux.
- Jameson, J., & Willis, C. (2014). Activity of tree bats at anthropogenic tall structures: implications for mortality of bats at wind turbines. 97.
- Joalland, O., & Rambonilaza, T. (2017). Assessing the impact of renewable energy infrastructure on the "tourist value" in rural landscapes: a spatial hedonic approach.
- Johnston, A., Cook, A., Wright, L., Humphreys, E., Burton, N., & Frederiksen, M. (2014). Modelling flight heights of marine birds to more accurately assess collision risk with offshore wind turbines. 51.
- Jolivet, E., & Heiskanen, E. (2010). Blowing against the wind - An exploratory application of actor network theory to the analysis of local controversies and participation processes in wind energy.
- Jones, N., & Pejchar, L. K. (2015). The energy footprint: How oil, natural gas, and wind energy affect land for biodiversity and the flow of ecosystem services. 65(3).
- Jones, R., & Burgess, M. (1984). Zinc and cadmium in soils and plants near electrical transmission (hydro). 18(10).
- Jones, R., Prohaska, K., & Burgess, M. (1988). Zinc and cadmium in corn plants growing near electrical transmission towers. 37(3-4).
- Josimovic, B., & Crncevic, T. (2012). The development of renewable energy capacities in Serbia: Case study of three small hydropower plants in the "Golija" biosphere reserve with special reference to the landscape heritage. 48.
- Jouanin, C., Briand, C., Beaulaton, L., & Lambert, L. (2012). *Eel Density Analysis (EDA 2.x). Un modèle statistique pour estimer l'échappement des anguilles argentées (Anguilla anguilla) dans un réseau hydrographique*. ONEMA - IRSTEA.
- Joubert-Garnaud, C. (2010). Les énergies renouvelables dans l'agriculture de la Charente-Maritime : l'émergence en milieu rural d'un nouveau moteur du développement économique et social non dépourvu d'incidences sur l'environnement local.
- Kadiri, M., Ahmadian, R., Bockelmann-Evans, B., Falconer, R., & Kay, D. (2014). An assessment of the impacts of a tidal renewable energy scheme on the eutrophication potential of the Severn Estuary, UK.
- Kadiri, M., Ahmadian, R., Bockelmann-Evans, B., Rauen, W., & Falconer, R. (2012). A review of the potential water quality impacts of tidal renewable energy systems.
- Kagan, R. A., Viner, T. A., Trail, P. W., & Espinoza, E. O. (2014). *Avian Mortality at Solar Energy Facilities in Southern California : A preliminary Analysis*. National Fish and Wildlife Forensics Laboratory.
- Kagel, A., Bates, D., & Gawell, K. (2005). A guide to geothermal energy and the environment.
- Kaldellis, J. K. (2005). Social attitude towards wind energy applications in Greece.
- Katsaprakakis, D. (2012). A review of the environmental and human impacts from wind parks. A case study for the Prefecture of Lasithi, Crete.
- Katsaprakakis, D., & Christakis, D. (2016). The exploitation of electricity production projects from Renewable Energy Sources for the social and economic development of remote communities. the case of Greece: An example to avoid.
- Katzner, T., Johnson, J. A., Evans, D.M., Garner, T.W., Grompper, M.E., Altwegg, R., . . . Pettorelli, N. (2013). Challenges and opportunities for animal conservation from renewable energy development.
- Keilty, K., Beckley, T., & Sherren, K. (2016). Baselines of acceptability and generational change on the Mactaquac hydroelectric dam headpond (New Brunswick, Canada). 75.
- Kelsey, E., Felis, J., Czapanskiy, M., Pereksta, D., & Adams, J. (2018). Collision and displacement vulnerability to offshore wind energy infrastructure among marine birds of the Pacific Outer Continental Shelf. 227.
- Kidd, I., Fischer, A., Chai, S., & Davis, J. (2015). A scenario-based approach to evaluating potential environmental impacts following a tidal barrage installation.

- Kikuchi, R. (2008). Adverse impacts of wind power generation on collision behaviour of birds and anti-predator behaviour of squirrels.
- Kleinman, J., & McCully, P. (n.d.). Environmental effects of hydropower plants including those using thermal, tidal and wave power.
- Kline, K., Martinelli, F., Mayer, A., Medeiros, R., Oliveira, C., & Sparovek, G. (2015). Bioenergy and biodiversity: key lessons from the Pan American Region. 56(6).
- Klugmann-Radziemska, E. (2014). Environmental Impacts of Renewable Energy Technologies. *International Conference on Environmental Science and Technology*. 69. IPCBEE.
- Kochan, D., & Grant, T. (2007). In the Heat of the Law, It's Not Just Steam: Geothermal Resources and the Impacts on Thermophile Biodiversity.
- Köppel, J., Dahmen, M., Helfrich, J., Schuster, E., & Bulling, L. (2014). Cautious but Committed: Moving Toward Adaptive Planning and Operation Strategies for Renewable Energy's Wildlife Implications.
- Korner-Nievergelt, F., Behr, O., Brinkmann, R., Etterson, M., Huso, M., & Dalharp, D. (2015). Mortality estimation from carcass searches using the R-package carcass: a tutorial. 21(1).
- Kristmannsdóttir, H., & Ármannsson, H. (2003). Environmental aspects of geothermal energy utilization. *Geothermics*, 32(4).
- Krivtsov, V., & Linfoot, B. (2012). Disruption to benthic habitats by moorings of wave energy installations: A modelling case study and implications for overall ecosystem functioning.
- Krone, R., Dederer, G., Kanstinger, P., Krämer, P., Schneider, C., & Schmalenbach, I. (2017). Mobile Demersal Megafauna at Common Offshore Wind Turbine Foundations in the German Bight (North Sea) Two Years after Deployment - Increased Production Rate of Cancer pagurus. 123.
- Kumar, D., & Katoch, S. (2014). Small hydropower development in western Himalayas: Strategy for faster implementation. *Renewable Energy*, 77.
- Kurdoğlu, O. (2016). Expert-based evaluation of the impacts of hydropower plant construction on natural systems in Turkey. *Energy and Environment*, Volume 27, Issue 6-7, Pages 690-703.
- Labussière, O., & Nadai, A. (2011). Expérimentations cartographiques et devenirs paysagers : la planification éolienne de la Narbonnaise (Aude).
- Ladenburg, J., & Lutzeyer, S. (2012). The economics of visual disamenity reductions of offshore wind farms—Review and suggestions from an emerging field. 16(9).
- Lal, R. (2001). Soil degradation by erosion.
- Lal, R. (2005). World crop residues production and implications of its use as a biofuel. 31(4)(575-584).
- Landmann, G. (2018). *Recommandations pour une récolte durable de biomasse forestière pour l'énergie - Focus sur les compartiments menus bois et souches (projet GERBOISE)*. ADEME.
- Landmann, G., & Nivet, C. (2014). *Projet RESOBIO - Gestion des rémanents forestiers : préservation des sols et de la biodiversité - Synthèse*. MAAF, ADEME, GIP ECOFOR.
- Lange, K., Meier, P., Trautwein, C., Schmid, M., Robinson, C., Weber, C., & Brodersen, J. (2018). Basin-scale effects of small hydropower on biodiversity dynamics.
- Langhamer, O. (2009). Colonization of blue mussels (*Mytilus edulis*) on offshore wave power installations on the Swedish west coast. In *Biofouling, Type, Impact and Anti-Fouling*. Nova Science Publishers.
- Langhamer, O. (2010). Effects of wave energy converters on the surrounding soft-bottom macrofauna (west coast of Sweden). 69.
- Langhamer, O. (2012). Artificial Reef Effect in relation to Offshore Renewable Energy Conversion: State of the Art.
- Langhamer, O., Dahlgren, T., & Rosenqvist, G. (2018). Effect of an Offshore Wind Farm on the Viviparous Eelpout: Biometrics, Brood Development and Population Studies in Lillgrund, Sweden. 84.
- Langhamer, O., Haikonen, K., & Sundberg, J. (2010). Wave power—Sustainable energy or environmentally costly? A review with special emphasis on linear wave energy converters. 14(4).
- Lapola, D., Schaldach, R., Alcamo, J., Bondeau, A., Koch, J., Koelking, C., & Priess, J. (2010). Indirect land-use changes can overcome carbon savings from biofuels in Brazil. 107(8).
- Laranjeiro, L., May, R., & Verones, F. (2018). Impacts of onshore wind energy production on birds and bats: recommendations for future life cycle impact assessment developments.
- Lavoie, R., Malo, M., & Raymond, J. (2015). Impacts environnementaux potentiels liés à la géothermie profonde.

- Le Floch, S., & Fortin, M. (2009). Le développement durable à l'épreuve des paysages d'Eole. Analyse de contestations sociales autour de parcs d'éoliennes: étude de cas français (Finistère) et québécois (Gaspésie).
- Lees, A., Peres, C., Fearnside, P., Schneider, M., & Zuanon, J. (2016). Hydropower and the future of Amazonian biodiversity. 25.
- Lehnert, L., Kramer-Schadt, S., Schönborn, S., Lindecke, O., Niermann, I., & Voigt, C. (2014). Wind Farm Facilities in Germany Kill Noctule Bats from Near and Far. 9(8).
- Leopold, M., Boonman, M., Collier, M., Davaasuren, N., Jongbloed, R., Lagerveld, S., . . . Scholl, M. (2014). *A first approach to deal with cumulative effects on birds and bats of offshore wind farms and other human activities in the southern North Sea*. IMARES.
- Leroy, J., Rollins, K., LaGory, K., Smith, K., & Meyers, S. (2016). A preliminary assessment of avian mortality at utility-scale solar energy facilities in the United States. 92.
- Liang, C., Xin, S., Dongsheng, W., Xiuying, Y., & Guodong, J. (2016). The ecological benefit-loss evaluation in a riverine wetland for hydropower projects – A case study of Xiaolangdi reservoir in the Yellow River, China. *Ecological engineering*, 96.
- Liechti, F., Guélat, J., & Komenda-Zehnder, S. (2013). Modelling the spatial concentrations of bird migration to assess conflicts with wind turbines.
- Lin, L., & Yu, H. (2012). Offshore wave energy generation devices: Impacts on ocean bio-environment.
- Lindeboom, H., Degraer, S., Dannheim, J., Gill, A., & Wilhelmsson, D. (2015). Offshore wind park monitoring programmes, lessons learned and recommendations for the future.
- Lintott, P., Richardson, S., Hosken, D., Fensome, S., & F., M. (2016). Ecological impact assessments fail to reduce risk of bat casualties at wind farms. 26(21).
- Liska, A., Yang, H., Milner, M., Goddard, S., Blanco-Canqui, H., Pelton, M., . . . Suyker, A. (2014). Biofuels from crop residue can reduce soil carbon and increase CO₂ emissions. 4(5).
- Loloum, T. (2016). La vie touristique des grands barrages hydroélectriques.
- Long, C., Flint, J., & Lepper, P. A. (2011). Insect attraction to wind turbines: Does colour play a role? 27(2).
- Lopes, S., Vale, V., Prado-Jr, J., Schiavini, I., & Oliveira, P. (2014). Landscape changes and habitat fragmentation associated with hidroelectric plants reservoirs: insights and perspectives from a central brazilian case history.
- Łopucki, R., & Perzanowski, K. (2018a). Effects of wind turbines on spatial distribution of the European hamster.
- Łopucki, R., Klich, D., & Gielarek, S. (2017). Do terrestrial animals avoid areas close to turbines in functioning wind farms in agricultural landscapes?
- Łopucki, R., Klich, D., Ścibior, A., Gołębiowska, D., & Perzanowski, K. (2018b). Living in habitats affected by wind turbines may result in an increase in corticosterone levels in ground dwelling animals.
- Loss, S., Will, T., & Marra, P. (2013). Estimates of bird collision mortality at wind facilities in the contiguous United States. 168.
- Lossent, J., Gervaise, C., Iorio, L., Folegot, T., Clorennec, D., & Lejart, M. (2017). Underwater operational noise level emitted by a tidal current turbine and its potential impact on marine fauna.
- Lovich, E., & Ennen, J. (2011). Wildlife Conservation and Solar Energy Development in the Desert Southwest, United States.
- Lovich, E., & Ennen, J. (2013). Assessing the state of knowledge of utility-scale wind energy development and operation on non-volant terrestrial and marine wildlife. 103.
- Lu, M., Lin, A., & Sun, J. (2018). The Impact of Photovoltaic Applications on Urban Landscapes Based on Visual Q Methodology. 10.
- Lüdeke, J. (2015). Review of 10 Years of Research of Offshore Wind Farms in Germany: The State of Knowledge of Ecological Impacts.
- Lusseau, D., Christiansen, F., Harwood, J., Mendes, S., Thompson, P., Smith, K., & Hastie, G. (2012). Assessing the risks to marine mammal populations from renewable energy devices: an interim approach.
- Mackinnon, K., Smith, H., Moore, F., van der Weijde, A., & Lazakis, I. (2018). Environmental interactions of tidal lagoons: A comparison of industry perspectives.
- Maclean, I., Inger, R., D., B., C.G., B., C.B., E., W.J., G., . . . S., B. (2014). Resolving issues with environmental impact assessment of marine renewable energy installations.
- Manzella, A., Bonciani, R., Allansdottir, A., Botteghi, S., Donato, A., Giamberini, S., . . . Scrocca, D. (2018). Environmental and social aspects of geothermal energy in Italy. *Geothermics*, 72.

- Margheritini, L., Hansen, A., & Frigaard, P. (2011). A method for EIA scoping of wave energy converters—based on classification of the used technology.
- Marmo, B. (2017). Operational Noise from Tidal Turbine Arrays and the Assessment of Collision Risk with Marine Mammals.
- Marmo, B., Roberts, I., Buckingham, M., King, S., & Booth, C. (2013). *Modelling of Noise Effects of Operational Offshore Wind Turbines including noise transmission through various foundation types*. Scottish government.
- Marques, A., Batalha, H., Rodrigues, S., Costa, H., Pereira, M., Fonseca, C., . . . Bernardino, J. (2014). Understanding bird collisions at wind farms: An updated review on the causes and possible mitigation strategies.
- Marrou, H., Wery, J., Dufour, L., & Dupraz, C. (2013). Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. *European journal of agronomy*, 44.
- Martinelli, L., & Filoso, S. (2008). Expansion of sugarcane ethanol production in Brazil: environmental and social challenges. 18(4).
- Marx, G. (2017). *Le parc éolien français et ses impacts sur l'avifaune - Etude des suivis de mortalité réalisés en France de 1997 à 2015*. LPO.
- Masden, E., & Cook, A. (2016). Avian collision risk models for wind energy impact assessments.
- Masden, E., Haydon, D., Fox, A., & Furness, R. (2010). Barriers to movement: Modelling energetic costs of avoiding marine wind farms amongst breeding seabirds. 60.
- Maslov, N., Claramunt, C., Wang, T., & Tang, T. (2017). Evaluating the Visual Impact of an Offshore Wind Farm. 105.
- Mateos-Rodríguez, M., Munoz, A., & Arroyo, G. (2013). Assessment of Offshore Wind Farm Effects on Birds and Needs to Plan Their Future Development in Spain.
- Mattigod, S., & Page, A. (1983). Geochemistry, Assessment of metal pollution in soils.
- May, R. (2015). A unifying framework for the underlying mechanisms of avian avoidance of wind turbines.
- May, R., Bevanger, K., van Dijk, J., Petrin, Z., & Brende, H. (2012). Renewable energy respecting nature: a synthesis of knowledge on environmental impacts of renewable energy financed by the research council of Norway.
- May, R., Gill, A., Köppel, J., Langston, R. H., Reichenbach, M., Scheidat, M., . . . Portman, M. (2017). Future Research Directions to Reconcile Wind Turbine – Wildlife Interactions.
- May, R., Reitan, O., Bevanger, K., Lorentsen, S. -H., & Nygård, T. (2015). Mitigating wind-turbine induced avian mortality: Sensory, aerodynamic and cognitive constraints and options. 42.
- McCluney, K., Poff, N., Palmer, M., Thorp, J., Poole, G., . . . Baron, J. (2014). Riverine macrosystems ecology: sensitivity, resistance, and resilience of whole river basins with human alterations.
- McCombie, C., & Jefferson, M. (2016). Renewable and nuclear electricity: Comparison of environmental impacts. 96.
- McDonald, R., Fargione, J., Kiesecker, J., Miller, W., & Powell, J. (2009). Energy Sprawl or Energy Efficiency: Climate Policy Impacts on Natural Habitat for the United States of America. 4(8).
- MEDDE. (2012). *Energies marines renouvelables : étude méthodologique des impacts environnementaux et socio-économiques*.
- MEDDE. (2013). *Connaissance du potentiel hydroélectrique français, synthèse*.
- MEDDTL. (2011). *Installations photovoltaïques au sol - Guide de l'étude d'impact*.
- MEEDDM. (2010). Dossier de presse - Signature de la convention d'engagements pour le développement d'une hydroélectricité durable en cohérence avec la restauration des milieux aquatiques à la suite du Grenelle Environnement.
- MEEM. (2016). *Guide relatif à l'élaboration des études d'impacts des projets de parcs éoliens terrestres*.
- MEEM. (2017). *Guide d'évaluation des impacts sur l'environnement des parcs éoliens en mer*.
- MEFI. (2006). *Rapport sur les perspectives de développement de la production hydroélectrique en France*.
- Meyer-Aurich, A., Schattauer, A., Hellebrand, H., Klauss, H., Plöchl, M., & Berg, W. (2012). Impact of uncertainties on greenhouse gas mitigation potential of biogas production from agricultural resources. 37(1).
- Miller, R., Hutchison, Z., Macleod, A., Burrows, M., Cook, E., Last, K., & Wilson, B. (2013). Marine renewable energy development: assessing the Benthic Footprint at multiple scales.
- Miller, T., Brooks, R., Lanzone, M., Brandes, D., Cooper, J., O'Malley, K., . . . Katzner, T. (2014). Assessing risk to birds from industrial wind energy development via paired resource selection models.

- Millon, L., Colin, C., Brescia, F., & Kerbiriou, C. (2018). Wind turbines impact bat activity, leading to high losses of habitat use in a biodiversity hotspot.
- Millon, L., Julien, J., Julliard, R., & Kerbiriou, C. (2015). Bat activity in intensively farmed landscapes with wind turbines and offset measures.
- Minderman, J., Gillis, M., Daly, H., & Park, K. (2017). Landscape-Scale Effects of Single- and Multiple Small Wind Turbines on Bat Activity.
- Miquel, C. (2009). *HESPUL - Systèmes photovoltaïques : fabrication et impact environnemental - Synthèse*.
- MIT. (2006). *The Future of Geothermal Energy Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century*.
- Möller, B. (2006). Changing wind-power landscapes: regional assessment of visual impact on land use and population in Northern Jutland, Denmark.
- Monmousseau, M., Ducouso, A., Teillac-Deschamps, P., & Moncorps, S. (2015). *Bois-énergie et biodiversité forestière - Synthèse*. UICN France, ADEME.
- Montag, H., & Parker, G. C. (2016). *The effects of Solar farms on local biodiversity : a comparative study*. Clarkson and Woods and Wychwood Biodiversity.
- Mutia, T. (2010). Biodiversity conservation and geothermal development. *Third East african rift geothermal conference*.
- Nadai, A. (2008). Politique éolienne, paysage et externalités. *La recherche en économie source de la décision politique et économique: l'exemple de l'énergie*.
- Nadai, A., & Labussiere, O. (2010). Politiques éoliennes et paysages.
- Nadai, A., & Labussière, O. (2014a). Communs paysagers et devenir éoliens opposés Le cas de la Seine-et-Marne (France).
- Nadai, A., & Labussière, O. (2014b). Recomposer la mer pour devenir offshore : le projet éolien de Veulettes-sur-Mer.
- Naspetti, S., Mandolesi, S., & Zanolli, R. (2016). Using visual Q sorting to determine the impact of photovoltaic applications on the landscape. 57.
- Neill, S., Litt, E., Couch, S., & Favies, A. (2009). The impact of tidal stream turbines on large-scale sediment dynamics. 34(12).
- Newman, C. (2007). Small-Hydroelectricity and Landscape Change in the Bitterroot Mountains: Public Perceptions and Attitudes.
- Noguera, J., Pérez, I., & Minguez, E. (2010). Impact of terrestrial wind farms on diurnal raptors: Developing a spatial vulnerability index and potential vulnerability maps.
- Norman, L., & Niraula, R. (2015). Model analysis of check dam impacts on long-term sediment and water budgets in Southeast Arizona, USA. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 16(3).
- Norro, A., Rumes, B., & Degreear, S. (2013). Differentiating between underwater construction noise of monopile and jacket foundations for offshore windmills: a case study from the Belgian part of the North Sea.
- Northrup, J., & Wittemyer, G. (2013). Characterising the impacts of emerging energy development on wildlife, with an eye towards mitigation.
- Oiry, A. (2015). Conflits et stratégies d'acceptabilité sociale autour des énergies marines renouvelables sur le littoral français. 15(3).
- ONF. (2005). *Conséquences des tassements du sol dus à l'exploitation forestière*. ONF RDV Tech.
- OSPAR Commission. (2006). *Review of the Current State of Knowledge on the Environmental Impacts of the Location, Operation and Removal/Disposal of Offshore Wind-Farms*.
- OSPAR Commission. (2008). *Assessment of the environmental impact of offshore wind-farms*.
- Ostman, D. (2015). *A New Approach for Assessing Landscape Impacts of Geothermal Power Plants: A Case Study of Hellisheiði*.
- Padovani, F. (2004). Les effets sociopolitiques des migrations forcées en Chine liées aux grands travaux hydrauliques. 103.
- Pagnussatt, D., Petrini, M., dos Santos, A., & da Silveira, L. (2018). What do local stakeholders think about the impacts of small hydroelectric plants? Using Q methodology to understand different perspectives. 112.
- Panagiotidou, M., Xydis, G., & Koroneos, C. (2016). Environmental Siting Framework for Wind Farms: A Case Study in the Dodecanese Islands.
- Pandit, M., & Grumbine, R. (2012). Potential Effects of Ongoing and Proposed Hydropower Development on Terrestrial Biological Diversity in the Indian Himalaya. 26.
- Papathanasopoulou, E., Queirós, A., Beaumont, N., Hooper, T., & Nunes, J. (2016). What evidence exists on the local impacts of energy systems on marine ecosystem services: a systematic map.

- Pasqualetti, M. (2011). *Opposing Wind Energy Landscapes: A Search for Common Cause*.
- Pastrana-Corral, M., & Wakida F.T., G.-F. E.-M.-P.-C. (2016). Soil mercury levels in the area surrounding the Cerro Prieto geothermal complex, MEXICO. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(8).
- Pearce-Higgins, J., Stephen, L., Douse, A., & Langston, R. (2012). Greater impacts of wind farms on bird populations during construction than subsequent operation: results of a multi-site and multi-species analysis.
- Pearce-Higgins, J., Stephen, L., Langston, R., Bainbridge, I., & Bullman, R. (2009). The distribution of breeding birds around upland wind farms.
- Péguin, M., Le Visage, C., Rolland, G., & Moncorps, S. (2014). *Développement des énergies marines renouvelables et préservation de la biodiversité*. UICN.
- Péguin, M., Moncorps, S., Fourcade, M., & Denis, H. (2013). Les montagnes et la transition énergétique: état des lieux des utilisations des énergies renouvelables et enjeux de leur développement sur les territoires de montagne. *Les énergies renouvelables*, Volume 1.
- Peire, K., Nonneman, H., & Bosschem, E. (2009). *Gravity base foundations for the thornton bank offshore wind farm*. Terra et Aqua.
- Pérez-de-los-Reyes, C., Sánchez Ormeño, M., Amorós Ortíz-Villajos, J., García Navarro, F., Campos Gallego, J., Martínez López, R., . . . De la Rubia Carretero, O. (2013). Revegetation in solar photovoltaic farms in Mediterranean areas. 22.
- Perrow, M. (2017a). *Wildlife and Wind Farms, Conflicts and Solutions. Volume 1 Onshore: Potential effects*. Pelagic Publishing.
- Perrow, M. (2017b). *Wildlife and Wind Farms, Conflicts and Solutions. Volume 2 Onshore: Mitigation and Monitoring*. Pelagic Publishing.
- Peschel, T. (2010). Solar parks - Opportunities for Biodiversity.
- Pethick, J., Morris, R., & Evans, D. (2009). Nature conservation implications of a Severn tidal barrage – A preliminary assessment of geomorphological change. 17(4).
- Petrova, M. (2013). NIMBYism revisited: public acceptance of wind energy in the United States.
- Pimentel, D. (2003). Ethanol fuels: energy balance, economics, and environmental impacts are negative. 12(2).
- Pimentel, D., Herz, M., Glickstein, M., Zimmerman, M., & Allen, R. (2002). Renewable Energy: Current and Potential Issues. *BioScience*, 52.
- Pointereau, P. (2008). *Indicateur agro-environnemental : bilan import-export équivalent surface*. SOLAGRO.
- Pointereau, P., Bochu, J., Couturier, C., Coulon, F., Arnal, A., & Giorgis, S. (2009). Les impacts environnementaux et paysagers des nouvelles productions énergétiques sur les parcelles et bâtiments agricoles. *Rapport final SOLAGRO/Agence Paysages*.
- Polagye, B., Copping, A., Kirkendall, K., Boehlert, G., Walker, S., Wainstein, M., & Van Cleve, B. (2010). Environmental effects of tidal energy development: a scientific workshop.
- Prieler, S. (2008). *Built-up and associated land area increases in Europe. Programme MOSUS*. International Institute for applied System Analysis.
- Qi, L., & Zhang, Y. (2017). Effects of solar photovoltaic technology on the environment in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(28).
- Querini, F. (2012). Analyse de cycle de vie des énergies alternatives pour l'automobile et propositions méthodologiques pour une meilleure évaluation des impacts locaux. *Thèse de Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique - Poitiers*.
- Quintero-Núñez, M., Cuaya-Simbro, M. C.-R., & O.R. Garcia-Cueto, N. S.-S.-B.-L. (2015). A Comparative Study on the Environmental Impacts of a Binational Geothermal System: Imperial Valley, CA., U.S.A. and Cerro Prieto, Mexicali Valley, BC, México.
- Raková, L., & Škorpil, J. (2012). Influence of photovoltaic power system on environment in the Czech Republic.
- Raoux, A., Tecchio, S., Pezy, J., Lassalle, G., Degraer, S., Wilhelmsson, D., . . . Niquil, N. (2017). Benthic and fish aggregation inside an offshore wind farm: Which effects on the trophic web functioning?
- Rascon, V., & de Lournes, M. (2013). *Calculs sur Excel pour construire les échelles de mesure des indicateurs*.
- Razdan, P., & Garrett, P. (2015). *Life Cycle Assessment of Electricity Production from an Onshore V110-2.0 MW Wind Plant. Version 1.0*. Vestas Wind Systems.
- Reichenbach, M. (2017). Wind Turbines and Birds in Germany - Examples of Current Knowledge, New Insights and Remaining Gaps. *Wind Energy and Wildlife Interactions*. ARSU GmbH.

- Reubens, J., De Rijcke, M., Degreear, S., & Vincx, M. (2013). Diel variation in feeding and movement patterns of juvenile Atlantic cod at offshore wind farms.
- Riefolo, L., Lanfredi, C., Azzellino, A., Tomasicchio, G., Felice, A., Penchev, V., & Vicinanza, D. (2016). Offshore Wind Turbines An Overview of the Effects on the Marine Environment. *International Ocean and Polar Engineering Conference*.
- Riggsbee, J., Wetzel, R., & Doyle, M. (2012). Physical and plant community controls on nitrogen and phosphorus leaching from impounded riverine wetlands following dam removal. 28.
- Robbins, A. (2017). *Seabird Ecology in High-Energy Environments: Approaches to Assessing Impacts of Marine Renewables*.
- Roche, R. C., Walker-Springett, K., Robins, P. E., Jones, J., Veneruso, G., Whitton, T. A., . . . King, J. W. (2016). Research priorities for assessing potential impacts of emerging marine renewable energy technologies: Insights from developments in Wales (UK).
- Rodrigues, M., Montañés, C., & Fueyo, N. (2010). A method for the assessment of the visual impact caused by the large-scale deployment of renewable-energy facilities.
- Rodriguez, J. (2012). Paysages de l'hydroélectricité et développement touristique dans les Pyrénées. De la ressource naturelle au patrimoine culturel. 100(2).
- Rodriguez, J., & Hirtz, S. (2014). Paysages de l'hydroélectricité, tourisme et protection de la nature en haute montagne : le Valais suisse.
- Roemer, C. (2018). *Bat movement ecology at the local scale and anthropogenic collision risks*. Muséum national d'histoire naturelle.
- Roemer, C., Disca, T., Coulmon, A., & Bas, Y. (2017). Bat flight height monitored from wind masts predicts mortality risk at wind farms. 215.
- Roger-Estrade, J., Adamiade, V., Arrouays, D., Baranger, E., Bartoli, M., Boizard, H., . . . Défossez, P. (2011). Dégradation physique des sols agricoles et forestiers liée au tassement : principaux résultats du projet GESSOL-ADD DST. 18(3).
- Röhner, S., Roth, M., & Tilk, C. (2016). Cloud-based Visibility Analysis for Energy Infrastructure: Investigating the Cost-efficiency and Validity as Preconditions for Practical Implementation.
- Roldán, C., Martínez, M., & Peña, R. (2014). Scenarios for a hierarchical assessment of the global sustainability of electric power plants in México.
- Roscioni, F., Russo, D., Febbraro, M. D., Frate, L., Carranza, M. L., & Loy, A. (2013). Regional-scale modelling of the cumulative impact of wind farms on bats.
- Roth, M., Junker, S., Tilk, C., Haubbaum, C., & Schulte-Braucks, K. (2015). To See or not to See: A Critical Investigation of Validity in Visibility Analysis for Assessing Landscape Impacts of Energy Infrastructure.
- Rousseau, K. (2014). *Le travail en réseaux des acteurs touristiques face aux changements sur la ressource paysage : le cas des parcs éoliens en Haute-Gaspésie (Québec)*.
- Rowe, R., Street, N., & Taylor, G. (2009). Identifying potential environmental impacts of large-scale deployment of dedicated bioenergy crops in the UK. 13(1).
- Roy, S. (2011). Simulating impacts of wind farms on local hydrometeorology.
- Roy, S., & Ghosh, B. (2017). Land utilization performance of ground mounted photovoltaic power plants: A case study. 114(B).
- RTE. (2018). *Panorama des énergies renouvelables au 31 mars 2018*.
- Rulli, M., Bellomi, D., Cazzoli, A., De Carolis, G., & D'Odorico, P. (2016). The water-land-food nexus of first-generation biofuels. 6.
- Rydell, J., Bach, L., Dubourg-Savage, M., Green, M., Rodrigues, L., & Hedenström, A. (2010). Mortality of bats at wind turbines links to nocturnal insect migration? 56(6).
- Rydell, J., Bogdanowicz, W., Boonman, A., Pettersson, S., Suchecka, E., & Pomorski, J. (2016). Bats may eat diurnal flies that rest on wind turbines. 81(3).
- Rydell, J., Ottvall, R., Pettersson, S., & Green, M. (2017). *The Effects of Wind Power on Birds and Bats: An Updated Synthesis Report*.
- Sagnes, P. (2018). *Impacts de l'hydroélectricité sur la biodiversité, méthodes de suivi. Premiers éléments*. Agence française pour la biodiversité.
- Sánchez-Pantoja, N., Vidal, R., & Pastor, C. (2018). Aesthetic perception of photovoltaic integration within new proposals for ecological architecture. 39.
- Savilaakso, S., Garcia, C., Garcia-Ullo, J., Ghazoul, J., Groom, M., & Guariguata, M. (2014). Systematic review of effects on biodiversity from oil palm production. 3(1).
- Savoie, P. (2003). Impacts du barrage des Trois Gorges sur le développement durable de la Chine. 4(3).
- Schmitt, P., Culloch, R., Lieber, L., Molander, S., Hammar, L., & Kregting, L. (2017). A tool for simulating collision probabilities of animals with marine renewable energy devices. *Volume 12*.

- Schöbel, S., & Dittrich, A. (2010). Renewable energies - landscapes of reconciliation.
- Schuster, E., Bulling, L., & Köppel, J. (2015). *Consolidating the State of Knowledge: A Synoptical Review of Wind Energy's Wildlife Effects*. Environmental Management.
- Scognamiglio, A. (2016). Photovoltaic landscapes': Design and assessment. A critical review for a new transdisciplinary design vision. 55.
- Scott, B., Langton, R., Philpott, E., & Waggitt, J. (2014). Seabirds and Marine Renewables: Are we Asking the Right Questions?
- Searchinger, T., Heimlich, R., Houghton, R., Dong, F., Elobei, A., & Fabiosa, J. (2008). Use of US croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. . 319(5867).
- Shen, G., Xu, B., Jin, Y., Chen, S., Zhang, W., Guo, J., . . . Yang, X. (2017). Monitoring wind farms occupying grasslands based on remote-sensing data from China's GF-2 HD satellite - A case study of Jiuquan city, Gansu province, China. *Resources, conservation and recycling*, 121.
- Sherren, K., Beckley, T., Parkins, J., Stedman, R., Keilty, K., & Morin, I. (2016). Learning (or living) to love the landscapes of hydroelectricity in Canada: Eliciting local perspectives on the Mactaquac Dam via headpond boat tours. 14.
- Shields, M., & Payne, A. (2014). *Marine renewable energy technology and environmental interactions*.
- Shields, M., Dillon, L., Woolf, D., & Ford, A. (2009). Strategic priorities for assessing ecological impacts of marine renewable energy devices in the Pentland Firth (Scotland, UK).
- Shortall, R., & Kharrazi, A. (2017). Cultural factors of sustainable energy development: A case study of geothermal energy in Iceland and Japan.
- Shortall, R., Davidsdottir, B., & Axelsson, G. (2015). Geothermal energy for sustainable development: A review of sustainability impacts and assessment frameworks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44.
- Siddiqui, O., & Dincer, I. (2017). Comparative assessment of the environmental impacts of nuclear, wind and hydro-electric power plants in Ontario: A life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 164.
- Sinclair, K., Copping, A., May, R., Bennet, F., Warnas, M., Perron, M., & Elmqvist, A. (2018). Resolving environmental effects of wind energy.
- Siyal, S., Mortberg, U., Mentis, D., Welsch, M., Babelon, I., & Howells, M. (2015). Wind energy assessment considering geographic and environmental restrictions in Sweden: A GIS-based approach.
- Sklenicka, P., & Zouhar, J. (2018). Predicting the visual impact of onshore wind farms via landscape indices: A method for objectivizing planning and decision processes.
- Skov, H., Heinänen, S., Norman, T., Ward, R., Méndez-Roldán, S., & Ellis, I. (2018). *ORJIP Bird Collision and Avoidance Study*. Offshore Renewables Joint Industry Programme (ORJIP).
- Smallwood, S. (2013). Comparing bird and bat fatality-rate estimates among North American wind-energy projects. 37(1).
- Smallwood, S., & Neher, L. (2017). *Comparing Bird And Bat Data For New Wind Power Generation*. California Energy Commission.
- Smeets, E., Lewandowski, I., & Faaij, A. (2009). The economical and environmental performance of miscanthus and switchgrass production and supply chains in a European setting. 13(6).
- Smith, J., & Dwyer, J. (2016). Avian interactions with renewable energy infrastructure: An update.
- Smolders, E., Mcgrath, S., Lombi, E., Karman, C., Bernhard, R., Cools, D., & Walrave, N. (2003). Comparison of toxicity of zinc for soil microbial processes between laboratory-contaminated and polluted field soils. 22(11).
- Smoucha, E. A., Fitzpatrick, K., Buckongham, S., & Knox, O. (2016). Life Cycle Analysis of the Embodied Carbon Emissions from 14 Wind Turbines with Rated Powers between 50 Kw and 3.4 Mw. 6(4).
- Smyth, K., Christie, N., Burdon, D., Atkins, J., Barnes, R., & Elliott, M. (2015). Renewables-to-reefs? – Decommissioning options for the offshore wind power industry. 90.
- SNH. (2016). *Assessing collision risk between underwater turbines and marine wildlif*. Scottish Natural Heritage.
- Souchon, Y., & Nicolas, V. (2011). *Barrages et seuils : principaux impacts environnementaux*.
- Southgate, D., Wasserstrom, R., & R. S. (2009). Oil development, deforestation, and indigenous populations in the Ecuadorian amazon. *Meeting of the Latin American Studies Association*.
- Sparovek, G., & Schnug, E. (2001). Temporal erosion-induced soil degradation and yield loss. 65(5).
- Strazzera, E., Mura, M., & Contu, D. (2012). Combining choice experiments with psychometric scales to assess the social acceptability of wind energy development projects. 48.
- Streit, J. (2009). Calcul et analyse de l'empreinte carbone des gazons.

- Tabassum, A., Premalatha, M., Abbasi, T., & Abbasi, S. (2014). Wind energy: Increasing deployment, rising environmental concerns.
- Taormina, B., Bald, J., Want, A., Thouzeau, G., Lejart, M., Desfro, N., & Carlier, A. (2018). A review of potential impacts of submarine power cables on the marine environment: Knowledge gaps, recommendations and future directions. 96.
- Tétrel, C. (2012). L'éolien perçu par les acteurs locaux.
- Thériault, I. (2007). Prise en compte du paysage dans la planification territoriale des parcs éoliens terrestres: comparaison des cas du Québec et de la Bretagne.
- Thiébot, J., Bailly du Bois, P., & Guillou, S. (2015). Numerical modeling of the effect of tidal stream turbines on the hydrodynamics and the sediment transport – Application to the Alderney Race (Raz Blanchard), France. 75.
- Thinus, Z., & Guillot, F. C. (2017). *Impact à la dévalaison de l'Anguille des centrales hydroélectriques de grande capacité de l'aval de la Sein. Rapport de synthèse*. CEREMA.
- Thompson, M., Beston, J., Etterson, M., Diffendorfer, J., & Loss, S. (2017). Factors associated with bat mortality at wind energy facilities in the United States. 215.
- Thompson, P., Hastie, G., Nedwell, J., Barham, R., Brookes, K., Cordes, L., . . . McLean, N. (2013). Framework for assessing impacts of pile-driving noise from offshore wind farm construction on a harbour seal population. 43.
- Thomsen, F., Gill, A., Kosecka, M., Andersson, M., Andre, M., Degrear, S., . . . Gabriel, J. e. (2015). *MaRVEN - Environmental Impacts of Noise, Vibrations and Electromagnetic Emissions from Marine Renewable Energy - Final study report*. European commission.
- Thórhallsdóttir, T. (2007). Environment and energy in Iceland: A comparative analysis of values and impacts. *Environmental Impact Assessment Review*, 27(6).
- Tidau, S., & Briffa, M. (2016). Review on behavioral impacts of aquatic noise on crustaceans. 27.
- Tolbert, V., Thornton, F., Joslin, J., Bock, B., Bandaranayake, W., Houston, A., . . . Pettry, D. (2000). Increasing below-ground carbon sequestration with conversion of agricultural lands to production of bio-energy crops . 30(1/2).
- Tolbert, V., Todd, D., Mann, L., Jawdy, C., Mays, D., Malik, R., . . . Pettry, D. (2002). Changes in soil quality and below-ground carbon storage with conversion of traditional agricultural crop lands to bioenergy crop production. 116.
- Topham, E., & McMillan, D. (2017). Sustainable Decommissioning of an Offshore Wind Farm. 102.
- Torres-Sibille, A., Cloquell-Ballester, V., Cloquell-Ballester, V., & Darton, R. (2007). Development and validation of a multicriteria indicator for the assessment of objective aesthetic impact of wind farms.
- Tougaard, J. (2015). Underwater noise from a wave energy converter is unlikely to affect marine mammals.
- Transénergie. (2010). *Eco-conception d'un Système Solaire THERmique individuel par l'Analyse de son Cycle de vie et son impact sur l'Environnement*.
- Tremblay, F. (2005). Du « pas dans ma cour » à l'écocitoyenneté : Opposition aux centrales hydroélectriques privées et projets locaux de société.
- Trommetter, M. (2017). *Climat et biodiversité. Concilier énergies renouvelables et biodiversité*. Orée.
- Tsoutsos, T., Frantzeskaki, N., & Gekas, V. (2005). Environmental impacts from the solar energy technologies. *Energy Policy*, 33(3).
- Turney, D., & Fthenakis, V. (2011). *Environmental impacts from the installation and operation of large-scale solar power plants*.
- UICN France. (2013). *Les montagnes et la transition énergétique: état des lieux des utilisations des énergies renouvelables et enjeux de leur développement sur les territoires de montagne*.
- Uihlein, A., & Magagna, D. (2016). Wave and tidal current energy – A review of the current state of research beyond technology.
- UNCCD. (2011). Desertification: a visual synthesis.
- Vallejo, G., Grellier, K., Nelson, E., McGregor, E., Canning, S., Caryl, F., & McLean, N. (2017). Responses of two marine top predators to an offshore wind farm. 7(21).
- Van den Eynde, D., Brabant, R., Fettweis, M., Francken, F., Melotte, J., Sas, M., & Van Lancker, V. (2010). *Chapter 3. Monitoring of hydrodynamic and morphological changes at the C-Power and the Belwind offshore wind farm sites - A synthesis*.
- van der Horst, D. (2010). Eighth Council of Europe Workshops for the implementation of the European Landscape Convention.
- van Hal, R., Griffioen, A., & OA, v. K. (2017). Changes in fish communities on a small spatial scale, an effect of increased habitat complexity by an offshore wind farm. 126.

- Vanermen, N., Onkelinx, T., Verschelde, P., Courtens, W., Van de Walle, M., Verstraete, H., & Stienen, E. (2015). Assessing seabird displacement at offshore wind farms: power ranges of a monitoring and data handling protocol. 756.
- Vasilakis, D., Whitfield, D., Schindler, S., Poirazidis, K., & Kati, V. (2016). Reconciling endangered species conservation with wind farm development: Cinereous vultures (*Aegypius monachus*) in south-eastern Europe.
- Vernois, M., & Deglise, X. (2015). *La combustion du bois contribue-t-elle à la pollution de l'air ?* Académie d'Agriculture de France.
- Visser, E. (2016). *The impact of South Africa's largest photovoltaic solar energy facility on birds in the Northern Cape, South Africa.*
- Voigt, C., Lehnert, L., Pētersons, G., Adorf, F., & Bach, L. (2015). Wildlife and renewable energy: German politics cross migratory bats. 61(2).
- Voigt, C., Popa-Lisseanu, A., & Niermann, I. K.-S. (2012). The catchment area of wind farms for European bats: A plea for international regulations. 153.
- Voke, M., Fairley, I., Willis, M., & Masters, I. (2013). Economic evaluation of the recreational value of the coastal environment in a marine renewables deployment area. 78.
- Voltaire, L., Loureiro, M., Knudsen, C., & Nunes, P. (2017). The impact of offshore wind farms on beach recreation demand: Policy intake from an economic study on the Catalan coast. 81.
- Wade, H. (2015). *Investigating the potential effects of marine renewable energy developments on seabirds.*
- Waggitt, J., & Scott, B. (2014). Using a spatial overlap approach to estimate the risk of collisions between deep diving seabirds and tidal stream turbines: A review of potential methods and approaches. 44.
- Waggitt, J., Robbins, A., Wade, H., Masden, E., Furness, R., Jackson, A., & Scott, B. (2017). Comparative Studies Reveal Variability in the use of Tidal Stream Environments by Seabirds.
- Walsh-Thomas, J., Cervone, G., Agouris, P., & Manca, G. (2012). Further evidence of impacts of large-scale wind farms on land surface temperature.
- Wang, S., & Wang, S. (2015a). Impacts of wind energy on environment: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 49.
- Wang, S., Wang, S., & Smith, P. (2015b). Ecological impacts of wind farms on birds: Questions, hypotheses, and research needs. 44.
- Watson, R., Kolar, P., Ferrer, M., Nygård, T., Johnston, N., Hunt, W., . . . Katzner, T. (2018). Raptor Interactions with Wind Energy: Case Studies from Around the World. 52(1).
- Wawrzyczek, J., Lindsay, R., Metzger, M. J., & Quétier, F. (2018). The ecosystem approach in ecological impact assessment : lessons learned from windfarm development on peatlands in Scotland. 72.
- Weilgart, L. (2018). *The impact of ocean noise pollution on fish and invertebrates.* Oceancare & Dalhousie university.
- Westerberg, V., Jacobsen, J., & Lifran, R. (2015). Offshore wind farms in Southern Europe – Determining tourist preference and social acceptance. 10.
- Whitehouse, R., Harris, J., Sutherland, J., & Rees, J. (2011). The nature of scour development and scour protection at offshore.
- Wiesebron, L., Horne, J., Scott, B., & Williamson, B. (2016). Comparing nekton distributions at two tidal energy sites suggests potential for generic environmental monitoring.
- Wilhelm, W., Johnson, J., Karlen, D., & Lightle, D. (2007). Corn stover to sustain soil organic carbon further constrains biomass supply. 99(6).
- Wilhelmsson, D., Malm, T., Thompson, R., Tchou, J., Sarantakos, G., McCormick, N., . . . Dubi, A. (2010). *Greening Blue Energy: Identifying and managing the biodiversity risks and opportunities of offshore renewable energy.*
- Williamson, B. J., Fraser, S., Blondel, P., Bell, P., Waggitt, J., & B.E., S. (2017). Multisensor Acoustic Tracking of fish and seabird behavior around tidal turbine structures in Scotland. 42(4).
- Willstead, E., Gill, A., Birchenough, S., & Jude, S. (2017). Assessing the cumulative environmental effects of marine renewable energy developments: Establishing common ground.
- Willstead, E., Jude, S., Gill, A., & Birchenough, S. (2018). Obligations and aspirations: A critical evaluation of offshore wind farm cumulative impact assessments. 82.
- Wilson, B., Batty, R. S., Daunt, F., & Carter, C. (2006). *Collision risks between marine renewable energy devices and mammals, fish and diving birds: Report to the Scottish executive.*
- Winemiller, K. O., McIntyre, P. B., Castello, L., Fluet-Chouinard, E., Giarrizzo, T., Nam, S., . . . Gomes, L. C. (2016). Balancing hydropower and biodiversity in the Amazon, Congo, and Mekong. 351.

- Witt, M., Sheehan, E., Bearhop, S., Broderick, A., Conley, D., Cotterell, S., . . . Godley, B. (2011). Assessing wave energy effects on biodiversity: The Wave Hub experience. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*.
- Wolsink, M. (2006). Planning of renewables schemes: Deliberative and fair decision-making on landscape issues instead of reproachful accusations of non-cooperation.
- Wolsink, M. (2010). Near-shore wind power—Protected seascapes, environmentalists' attitudes, and the technocratic planning perspective.
- Wolsink, M. (2013). Acceptation sociale de l'innovation en matière d'énergie renouvelable : en quoi l'offshore est-il différent ?
- Wolsink, M. (2018). Co-production in distributed generation: renewable energy and creating space for fitting infrastructure within landscapes.
- World Bank. (2018). *Good practice handbook. Environmental flows for hydropower projects. Guidance for the private sector in emerging markets*. World Bank Group.
- Wu, S., Li, Y., Wang, P., Zhong, L., Qiu, L., & Chen, J. (2016). Shifts of microbial community structure in soils of a photovoltaic plant observed using tag-encoded pyrosequencing of 16S rRNA. *100*.
- Wüstenhagen, R., Wolsink, M., & Bürer, M. (2007). Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept. *35(5)*.
- Xia, G., & Zhou, L. (2017). Detecting Wind Farm Impacts on Local Vegetation Growth in Texas and Illinois Using MODIS Vegetation Greenness Measurements.
- Zhai, H., BoHua, B., & Zhang, K. (2010). Prediction of river ecological integrity after cascade hydropower dam construction on the mainstream of rivers in Longitudinal Range-Gorge Region (LRGR), China. *Ecological engineering*, *36(4)*.
- Zhao, Q. L. (2013). Determining the influencing distance of dam construction and reservoir impoundment on land use: A case study of Manwan Dam, Lancang River. *Ecological Engineering*, *53*.
- Zimmermann, Y., Schäffer, A., Corvini, P., & Lenz, M. (2013). Thin-film photovoltaic cells: long-term metal (loid) leaching at their end-of-life. *47(22)*.
- Ziv, G., Baran, E., Nam, S., Rodríguez-Iturbe, I., & Levin, S. A. (2012). Trading-off fish biodiversity, food security, and hydropower in the Mekong River Basin. *109*.
- Zwart, M., Dunn, J., McGowan, P., & Whittingham, M. (2016). Wind farm noise suppresses territorial defense behavior in a songbird. *27*.

Index des tableaux et figures

Tableaux

Tableau 1 : Technologies liées aux énergies renouvelables étudiées.....	24
Tableau 2 : Impacts étudiés	25
Tableau 3 : Mots-clés utilisés (en anglais) – liste non exhaustive	28
Tableau 4 : Système de <i>scoring</i> – Publications portant sur les impacts biodiversité.....	31
Tableau 5 : Analyse de la couverture bibliographique des impacts des EnR lors des phases d'installation, d'exploitation et de démantèlement sur site	158

Figures

Figure 1 : Schéma de principe des installations de type photovoltaïque au sol (à gauche) (MEDDE, 2010) et sur bâti en surimposition (à droite) (othermie.fr)	34
Figure 2 : Illustration de l'effet des modules sur l'écoulement des eaux de pluie (Ministère de l'écologie et Ministère de l'économie).....	46
Figure 3 : Schéma de la composition d'une éolienne terrestre (ADEME, 2018).....	53
Figure 4 : Types de fondation des éoliennes en mer posées : monopieu, embase gravitaire et jacket (EMF et OWEC).....	77
Figure 5 : Types d'ancrage des technologies éoliennes en mer flottantes (France énergies marines)	78
Figure 6 : Schéma des différents types de structure-support des hydroliennes (Présentation ADEME, 2015).....	95

Figure 7 : Schémas des centrales au fil de l'eau : centrale de basse chute (gauche) et centrale de moyenne et haute chute (droite) (Guide pour le montage de projets de petite hydroélectricité, ADEME)	116
Figure 8 : Schéma d'une STEP (lampiris.be)	117
Figure 9 : Schémas des pompes à chaleur géothermiques avec des capteurs horizontaux (gauche), des sondes géothermiques verticales (milieu) ou des pompes à chaleur sur nappes ou sur aquifères (droite) (BRGM, 2010)	138
Figure 10 : Schémas des protections des câbles électriques sous-marins : l'enrochement (gauche), le matelas en béton (milieu) et l'ensouillage (droite) (RTE et BRLi, 2015).	151
Figure 11 : Schéma du stockage par moyen hydraulique (EnerGeek, 2011)	151

Annexes

Annexe 1 – Glossaire

Terme	Définition
Définition des typologies d'impact sur la biodiversité	
<i>Destruction / altération de milieux</i>	
Modification / perte d'habitat	Cette catégorie regroupe tous les aspects d'un projet engendrant, directement ou indirectement, une destruction physique de milieux ou une altération notable.
Fragmentation d'habitat	Cette catégorie regroupe tous les aspects d'un projet engendrant, directement ou indirectement, une altération des continuités écologiques (par exemple, morcellement de milieux ou installation de barrières aux déplacements).
Modification du fonctionnement d'un écosystème	Cette catégorie regroupe tous les aspects d'un projet engendrant, à travers des modifications physiques des milieux, une perturbation du fonctionnement initial de ceux-ci (par exemple par l'introduction de nouveaux substrats initialement absents).
Risque de pollutions accidentelles ou chroniques	Cette catégorie regroupe tous les aspects relatifs aux risques de pollution accidentelle (généralement lors de travaux) ou chronique (long terme).
<i>Perturbation et dérangement d'individus d'espèces de faune et de flore</i>	
Déplacement / éloignement lié aux infrastructures	Cette catégorie regroupe les effets comportementaux induits par certains ou l'ensemble des composants de l'installation EnR sur l'utilisation des milieux proches de l'EnR par la faune terrestre ou aquatique (éloignement, etc.).
Effet barrière / perturbation des animaux	Cette catégorie regroupe les effets comportementaux induits par certains ou l'ensemble des composants de l'installation EnR sur l'utilisation des milieux proches de l'EnR par la faune en vol (oiseaux, chiroptères et insectes) ou en mer.
Perturbations sonores (y compris vibrations, ultrasons et infrasons)	Cette catégorie regroupe les effets liés aux bruits associés aux différentes étapes du cycle de vie d'une installation EnR (bruits de travaux, bruits de fonctionnement, ultrasons, infrasons, vibrations). Cette catégorie peut dans certains cas être rattachée à l'aspect «déplacement».
Perturbations visuelles, dont lumineuses	Cette catégorie regroupe les effets d'ordre visuel, liés à la présence physique de l'installation, aux activités induites (engins de chantier et aux lumières (toutes catégories). Cette catégorie peut dans certains cas être rattachée à l'aspect «déplacement».
Perturbations électromagnétiques ou électrostatiques	Cette catégorie concerne spécifiquement les champs électromagnétiques pouvant être produits par des composants d'installations EnR ou les réseaux associés (câbles électriques notamment).
<i>Mortalité ou blessure d'individus d'espèces de faune sauvage</i>	
Collision (avec ou sans mortalité)	Cette catégorie regroupe l'ensemble des phénomènes de choc et collision entre un spécimen animal et un élément (mobile ou non) de l'installation EnR.
Variation de champ de pression (avec ou sans mortalité)	Cette catégorie correspond aux phénomènes de changement de pression pouvant subvenir aux abords de certains éléments mobiles d'EnR, notamment les pales d'éoliennes, d'hydroliennes ou de turbines. Les effets liés sont notamment des barotraumatismes.
Electrocution	Cette catégorie regroupe les phénomènes d'électrocution de spécimens (concerne les câbles électriques).
Brûlures / Autres blessures	Cette catégorie regroupe toutes les autres causes de blessures ou de mortalité pouvant être induites par la présence ou le fonctionnement des installations EnR sur la faune.
<i>Modification des paramètres environnementaux</i>	
Modifications physico-chimiques (dont concentration en oxygène)	Cette catégorie regroupe tous les aspects relatifs aux modifications physico-chimiques des milieux, par exemple l'apport de matières organiques, la remise en suspension de sédiments susceptibles d'altérer la qualité des écosystèmes récepteurs, l'eutrophisation et l'acidification des milieux aquatiques ou terrestres.
Eutrophisation	Augmentation du contenu en éléments nutritifs (azote, soufre, etc.) d'un milieu, qui se traduit par un développement important de la végétation par rapport à un milieu habituellement pauvre. Les dépôts atmosphériques d'azote et de soufre favorisent l'eutrophisation des écosystèmes terrestres naturels, semi-naturels (forêts et prairies) ou aquatiques, ayant pour conséquences une diminution de leur biodiversité (car elle favorise quelques espèces des milieux riches). Dans les milieux aquatiques, les algues

	qui se développent grâce à ces substances nutritives absorbent de grandes quantités d'oxygène, lorsqu'elles meurent et se décomposent. Leur prolifération provoque l'appauvrissement, puis la mort de l'écosystème aquatique présent : il ne bénéficie plus de l'oxygène nécessaire pour vivre, ce phénomène est dit « Asphyxie des écosystèmes aquatiques ».
Modifications de température	Cette catégorie concerne spécifiquement les modifications de température (augmentation ou diminution) des milieux (air, eau, sol) pouvant être associées au fonctionnement de certaines installations EnR.
Piège écologique	On parle de piège écologique quand l'attractivité d'un habitat augmente anormalement, par rapport à sa valeur pour la survie et la reproduction de l'espèce ou d'une communauté d'espèces. Le résultat est une « préférence contrainte » pour un habitat inadéquat mais rendu faussement et artificiellement attrayant par l'Homme.
Définition des typologies d'impact sur les sols et les sédiments	
Sol (définition de pédologie)	D'une épaisseur centimétrique à métrique, le sol est la couche superficielle meuble de la croûte terrestre, qui résulte de l'altération des roches sous-jacentes sous l'influence de processus physiques et chimiques (eau, climat, etc.) et des activités biologiques. Composé de particules minérales, de matière organique, d'eau, d'air et d'organismes vivants, il est organisé en horizons (couches) différenciés. Les sols ont des natures - et donc des propriétés - très variées. Le sol connaît d'autres acceptions. Pour l'agronome, le sol se limite souvent aux horizons labourés. En génie civil, le sol correspond au matériau meuble situé en surface (sol, roche altérée ou matériau artificiel). Au sens hydrogéologique, le sol est la couche comprise entre la surface et le niveau de la nappe phréatique. Dans ce rapport le terme sol est réservé à la couche superficielle des écosystèmes terrestres.
Sédiments	Accumulation de particules plus ou moins grosses ou de matières précipitées ayant, séparément, subi un certain transport par les eaux ou par le vent. Les matériaux des sédiments peuvent par exemple provenir de l'érosion de roches préexistantes ou résulter d'une activité organique (accumulation de coquilles par exemple). Les sédiments qui se sont déposés peuvent, à terme, subir une diagenèse et former une roche sédimentaire (conglomérats, grès, diatomites, calcaires, charbons, gypse, phosphates, etc.). On parle en général de sédiment lorsque le dépôt est récent, surtout s'il se trouve encore dans son milieu de formation et s'il est gorgé d'eau. Dans ce rapport, le terme sédiment est réservé à la couche située immédiatement sous les colonnes d'eaux douces et marines.
Sous-sol	Le sous-sol désigne l'ensemble des matériaux intacts ou quasi-intacts situés sous les sols ou sous les sédiments, et dont l'étude est du domaine de la géologie. Il s'agit le plus souvent de roches.
Impacts en termes de surfaces de sols et fonds marins	
Occupation du sol	L'occupation du sol peut être succinctement définie comme la couverture physique (et biologique) de la surface des terres émergées. Elle distingue plusieurs catégories biophysiques – les zones de végétation (arbres, buissons, champs, pelouses), les sols nus (même s'il s'agit d'un manque de couverture), les surfaces dures (roches, bâtiments), les surfaces humides et les plans d'eau (nappes et cours d'eau, zones inondables). L' utilisation des sols renvoie à la description des zones selon leur finalité socio-économique : superficies à vocation résidentielle, industrielle ou commerciale, agricole ou forestière, destinées aux loisirs ou à la préservation, à la production d'énergie renouvelable, etc. On parle également d'utilisation ou d'occupation des « sols » dans le cas du domaine public maritime naturel (lais et relais de la mer, étangs salés en communication de la mer, sols et sous-sols de l'estran, des eaux intérieures et de la mer territoriale), même si les « sols » désignent ici des sédiments.
Artificialisation du sol	Les surfaces artificialisées sont des surfaces retirées de leur état naturel, forestier ou agricole, qu'elles soient bâties, revêtues ou non. Elles incluent les sols bâtis à usage d'habitation ou à usage industriel ou commercial (bureaux, usines, etc.), les sols revêtus ou stabilisés (routes, voies ferrées, aires de stationnement, ronds-points, etc.), et d'autres espaces non construits, mais fortement perturbés par l'activité humaine (chantiers, carrières, mines, décharges, etc.). Cette catégorie inclut également des espaces verts artificialisés (parcs et jardins urbains, équipements sportifs et de loisirs, etc.).
Changement d'affectation du sol	Modification de l'usage initial et de la couverture associée aux sols. Le <u>changement d'affectation des sols</u> (CAS) se décompose en CAS direct (CASd) et CAS indirect (CASi). Dans le cas des biocarburants, le CASd a lieu lorsque la mise en place d'une culture sur une terre pour produire des biocarburants modifie l'usage de cette terre. Le CASi a lieu quand une demande supplémentaire pour les biens agricoles pour produire des

	bioénergies est induite par les mécanismes de marché des CAS sur d'autres terres afin de produire des biens non destinés à la production de bioénergie. Par nature, les CASi sont moins faciles à cerner dans la mesure où ils mettent en jeu des modifications dans les équilibres des marchés qui influent sur les prix et donc sur les décisions des agents en matière d'allocation des sols, d'utilisation d'intrants et de demande de produits alimentaires et non-alimentaires, tant au niveau domestique qu'à l'étranger.
Co-usage du sol	Utilisation de sols pour plusieurs usages simultanés, <i>a priori</i> complémentaires.
Recouvrement du sol	Modification des matériaux constituant une barrière plus ou moins imperméable à l'interface du système sol-climat (et impactant l'ombrage, la pluviométrie ou autre).
Impacts physiques sur les sols et sédiments	
Compaction / Tassement du sol	Déformation verticale due à l'application de contraintes extérieures (par exemple, pressions exercées par des engins mécanisés et/ou des infrastructures), conduisant à l'augmentation de la densité et la réduction de la porosité des sols. Cette déformation réduit par conséquent l'infiltration et la disponibilité en eau des sols, tout en limitant le développement de la végétation et de la faune du sol (vers de terre par ex.). Cela peut induire une imperméabilisation des sols dans certains cas.
Imperméabilisation du sol	Recouvrement permanent du sol par des matériaux non poreux (construction, béton, bitume, etc.). Outre la consommation de terres naturelles et agricoles, elle entraîne généralement une dégradation irréversible des sols et une altération de certaines de leurs fonctions, en particulier concernant la régulation des flux hydriques.
Erosion du sol	Phénomène naturel qui résulte de l'altération des couches superficielles du sol, impliquant le détachement de particules de sols, leur transport et leur dépôt à distance, sous l'action de l'eau ou du vent. Ce phénomène peut être amplifié par les activités humaines (certaines pratiques culturales, imperméabilisation, entre autres).
Changement de température du sol / des sédiments	Variation de la température observée en surface ou en profondeur des sols / des sédiments.
Altération de la capacité de rétention d'eau du sol	Modification (réduction) du volume maximal d'eau retenu dans un sol grâce à ses microporosités (et aux forces capillaires). Ce volume d'eau ne s'écoule pas sous l'action de la gravité, et est indirectement mis à disposition des organismes vivants des sols et en surface.
Changement morphologique du sol	Modification de l'aspect extérieur du sol (notamment sa structure). Cette modification peut être observée d'un point de vue de la porosité, la forme des agrégats, la couleur ou l'odeur du sol.
Perturbation hydro-sédimentaire (en milieu aquatique)	En milieu aquatique, modification du transport sédimentaire pouvant modifier la morphologie de certains terrains (par accumulation et/ou érosion, selon la morphologie de la zone concernée, la nature des terrains et des courants).
Ruissellement / Risque d'inondation du sol	Le ruissellement désigne l'écoulement d'eau (précipitations ou eau d'irrigation, entre autres) à la surface du sol, retournant <i>in fine</i> dans un cours d'eau ou le réseau hydrique. Ces écoulements peuvent être concentrés en une zone précise du sol par la présence d'infrastructures de production d'énergie, voire peuvent (dans certains cas) indirectement augmenter le risque d'inondation des sols environnants.
Impacts chimiques sur les sols et sédiments	
Contamination / Pollution du sol	Dégradation de la qualité chimique des sols, par l'introduction intentionnelle ou non de substances chimiques ou d'agents biologiques dangereux dans le sol. Les contaminants des sols peuvent ensuite être transférés dans d'autres compartiments de l'environnement (transferts vers l'eau, ingestion directe de sol par des animaux, transferts vers les plantes, etc.). Lorsque ces substances ou agents ont des effets préjudiciables sur le fonctionnement du sol ou sur la santé de l'homme et des écosystèmes, du fait de leurs propriétés ou de leur quantité, on parle alors de pollution des sols.
Acidification du sol	Modification résultant de l'apport d'acide ou de réactions produisant des acides (ou consommant des bases) et pouvant conduire à plus ou moins long terme à un abaissement du pH des sols.
Salinisation du sol	Accumulation de sels hydrosolubles (notamment de sels de sodium) dans le sol. La présence de fortes teneurs en sels dans les sols a pour conséquences une forte toxicité pour les cultures, la réduction de la quantité d'eau assimilable par la plante, la diminution des rendements, la désertification (dans les cas les plus extrêmes).
Modification de la teneur en matière organique du sol	Modification (réduction) du taux de matière organique dans le sol liée au faible taux de retour de la biomasse végétale et/ou à l'oxydation excessive. Les matières organiques regroupent les constituants organiques morts ou vivants, d'origine végétale, animale ou

	microbienne, transformés ou non, présents dans le sol. Elles sont composées de feuilles, brindilles, résidus de cultures, racines mortes, microorganismes morts, etc. et des molécules issues de leur décomposition et de leur transformation.
Impacts biologiques sur les sols et sédiments, et services écosystémiques	
Perturbation de la faune et microflore du sol	Modification (réduction) en termes de diversité et de nombre d'individus de la pédofaune (organismes présents dans les sols, par exemple : acariens, vers de terre, entre autres) et de la microflore du sol.
Modification des fonctions écologiques et des services écosystémiques assurés par le sol	Cette typologie d'impact est large et regroupe des impacts variés, en lien avec les fonctions écologiques ou les services écosystémiques rendus par les sols. Les fonctions écologiques assurées par les sols recouvrent les processus biologiques naturels de fonctionnement et de maintien des écosystèmes (cycle de l'eau, cycle du carbone et de l'azote, photosynthèse, offre d'habitats aux organismes vivants, etc.). Les services écosystémiques rendus par les sols recouvrent les bénéfices que les humains retirent des écosystèmes pour assurer leur bien-être. Ils sont le résultat des fonctions écologiques. Il peut s'agir d'avantages matériels, d'approvisionnement et de régulation (épuration de l'eau et des déchets, purification de l'air, production d'aliments, de matériaux de construction et de fibres, régulation du changement climatique, des inondations et des maladies, etc.) ou immatériels (activités récréatives ou culturelles par ex.).
Impact sur le cycle du carbone	Modification de la capacité de stockage du carbone dans les sols ou de la dynamique des échanges de carbone entre les sols, la végétation et l'atmosphère.
Définition des typologies d'impact sur les paysages	
Notions sur le paysage (Convention de Florence)	
Paysage	Une partie de territoire telle que perçue par les populations, dont le caractère résulte de l'action de facteurs naturels et/ou humains et de leur interrelation.
Politique du paysage	Formulation par les autorités publiques compétentes des principes généraux, des stratégies et des orientations permettant l'adoption de mesures particulières en vue de la protection, la gestion et l'aménagement du paysage.
Objectif de qualité paysagère	Formulation par les autorités publiques compétentes, pour un paysage donné, des aspirations des populations en ce qui concerne les caractéristiques paysagères de leur cadre de vie.
Protection des paysages	Actions de conservation et de maintien des aspects significatifs ou caractéristiques d'un paysage, justifiées par sa valeur patrimoniale émanant de sa configuration naturelle et/ou de l'intervention humaine.
Gestion des paysages	Actions visant, dans une perspective de développement durable, à entretenir le paysage afin de guider et d'harmoniser les transformations induites par les évolutions sociales, économiques et environnementales.
Aménagement des paysages	Actions présentant un caractère prospectif particulièrement affirmé visant la mise en valeur, la restauration ou la création de paysages.
Projet de paysage	Processus et ensemble d'outils, idéalement collectifs, de conception et de construction des paysages (notamment les paysages quotidiens). Le projet de paysage se veut dynamique en assumant le caractère intentionnel et volontaire de la transformation de l'espace qu'il impulse (en intégrant les notions de création, de préservation, de valorisation ou de requalification des paysages)
Impacts liés à l'aménagement	
Planification	Choix des sites d'implantation, soit d'un point de vue régional, soit localement, soit par rapport à d'autres implantations, selon un phasage prévu ou non.
Esthétique/design	Type de matériel utilisé (design des structures, matériaux, balisage choisi, etc.).
Mise en site et agencement	Organisation des différentes structures entre elles (structures de production mais aussi de desserte ou de construction) et insertion de l'ensemble de l'installation dans le territoire d'accueil.
Densité	Nombre et proximité des structures sur un territoire donné.
Impacts liés à l'usager	
Acceptation sociale	Appropriation des aménagements par les populations (régulière ou ponctuelle) et moyens mis en œuvre pour cette appropriation. Les définitions sont nombreuses, mais s'accordent sur la notion du partage des décisions et des orientations (choix de projet et souhaits de développement). On peut retenir la définition de Caron-Malenfant et Coraud (2009) : « <i>Résultat d'un processus par lequel les parties concernées conviennent ensemble des conditions minimales à mettre en</i>

	<i>place pour qu'un projet, un programme ou une politique s'intègre harmonieusement, à un moment donné, dans son milieu d'accueil ».</i>
Visibilité	Vues potentielles sur les aménagements depuis les territoires ou vues simultanées (co-visibilités) avec des éléments de valeur paysagère (patrimoine par exemple).
Usages	Rapport des aménagements avec d'autres activités, déjà présentes ou se développant postérieurement, utilisant le territoire pour la mise en valeur d'un produit.

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale. L'Agence aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, les économies de matières premières, la qualité de l'air, la lutte contre le bruit, la transition vers l'économie circulaire et la lutte contre le gaspillage alimentaire.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle conjointe du ministère de la Transition Écologique et Solidaire et du ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.

ÉTAT DE L'ART DES IMPACTS DES ENERGIES RENOUVELABLES SUR LA BIODIVERSITE, LES SOLS ET LES PAYSAGES, ET DES MOYENS D'EVALUATION DE CES IMPACTS

Le développement des énergies renouvelables (EnR) est un des moyens majeurs de lutte contre le changement climatique et l'épuisement des ressources énergétiques non renouvelables. La loi de programmation sur la transition énergétique prévoit une part d'énergie renouvelable de 32 % de la consommation énergétique finale en 2030.

Les activités humaines dans les transports, la production d'énergie conventionnelle, l'industrie, l'agriculture intensive et l'urbanisation affectent très fortement la biodiversité, les sols et les paysages. Toutes proportions gardées par rapport à ces activités, la production d'EnR peut également être source d'impacts sur la biodiversité, les sols et les paysages.

Cet état de l'art apparaît ainsi comme une première étape pour identifier les travaux futurs à mener concernant les impacts des EnR sur la biodiversité, les sols et les paysages, en se basant sur la littérature existante et l'expertise des nombreux acteurs sur le sujet.

Quelles sont les prochaines étapes ?

Cette étude a permis d'identifier les besoins de travaux en matière d'impacts des EnR sur la biodiversité, les sols et les paysages. Une feuille de route a été rédigée, avec pour objectif d'identifier, d'organiser et planifier les actions à réaliser dans les années à venir pour améliorer la connaissance, l'évaluation, ainsi que la comparabilité des impacts des EnR, et identifier les mesures de réduction appropriées.