

WEBINAIRE TTI.5

Séance 14

« Eolien : prévisions, impacts environnementaux et intégration sociale »

JEUDI 25 SEPTEMBRE 2025
13h30 - 15h30



SYNTHÈSE DE LA SÉANCE

Introduction	2
Prévision de la production des centrales éoliennes Georges KARINIOTAKIS PERSEE Mines Paris - PSL	3
Évaluation des impacts environnementaux de l'éolien en mer par analyse de cycle de vie Joanna SCHLESINGER-MARTINAT O.I.E. Mines Paris - PSL	6
Évaluer les enjeux de l'intégration sociale de l'éolien en mer en France Rhoda FOFACK-GARCIA France Énergies Marines	10

INTRODUCTION

Intitulé « Éolien : prévisions, impacts environnementaux et intégration sociale », le quatorzième webinaire de TTI.5, qui a eu lieu le 25 septembre 2025, a mis l'accent sur l'une des sources d'énergies renouvelables — l'énergie éolienne — constituant le mix énergétique français en présentant des exemples relatifs (i) à la prévision de la production des énergies éoliennes terrestres, (ii) à l'évaluation des impacts environnementaux de l'éolien en mer par analyse de cycle de vie et (iii) aux enjeux socio-écosystémiques de l'intégration de l'éolien en mer.

Ce webinaire a été animé par Claude Tadonki, enseignant-chercheur en informatique au CRI de Mines Paris – PSL, et a accueilli (par ordre de présentation) :

- Georges Kariniotakis, directeur de recherche de classe exceptionnelle au centre PERSEE de Mines Paris – PSL, dont la présentation a porté sur la prévision de la production des centrales éoliennes ;
- Joanna Schlesinger-Martinat, ingénierie de recherche de vie au centre O.I.E. de Mines Paris – PSL, dont la présentation a porté sur l'évaluation des impacts environnementaux de l'éolien en mer par analyse de cycle de vie ;
- Rhoda Fofack-Garcia, chercheure en sociologie à France Énergies Marines, dont la présentation a porté sur l'évaluation des enjeux de l'intégration sociale de l'éolien en mer en France.

Ainsi, le focus de ce quatorzième webinaire a été mis sur l'une des sources d'énergies renouvelables qu'est l'énergie éolienne, notamment en mer. Constituant environ 10% du mix électrique français, l'éolien devrait rentrer dans une phase de croissance considérable pour atteindre, en 2035, les objectifs de la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie. Il est alors crucial de bien cerner les enjeux à la fois de prédictibilité pour faciliter l'intégration de cette énergie dans le réseau mais aussi d'impacts environnementaux et sociaux-économiques à travers des analyses de cycle de vie.

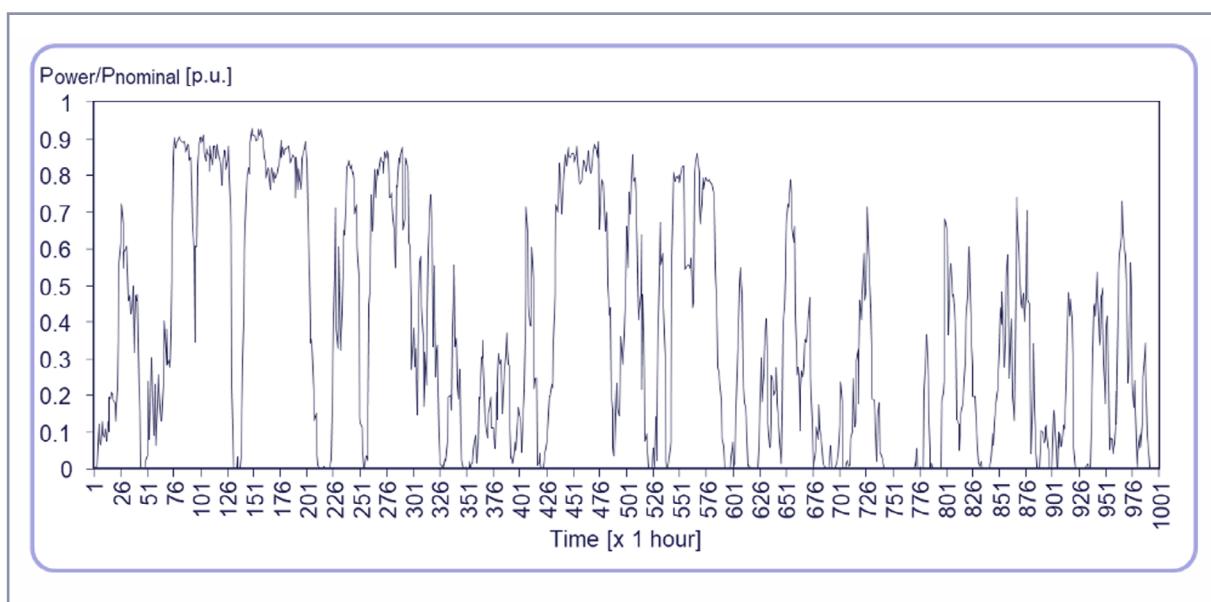
Prévision de la production des centrales éoliennes

Georges KARINIOTAKIS | PERSEE Mines Paris - PSL

Contexte

Le développement des énergies renouvelables et, en particulier, de l'éolien s'inscrit dans une dynamique de transition énergétique. Celle-ci transforme le système électrique en un réseau plus distribué, plus complexe, mais apporte également plus d'observabilité du fait du nombre croissant de fermes sur le territoire. Cette évolution crée de nouveaux besoins pour les gestionnaires de réseaux : la prévision de la production, la gestion de la variabilité météorologique, l'allocation des réserves de flexibilité et la maîtrise des congestions. Ces opérations doivent être réalisées sur des échelles de temps allant de quelques minutes à plusieurs jours, ce qui exige des réseaux intelligents et adaptatifs, qui nécessite donc des modèles de prédiction fiable et robuste.

Exemple de variabilité horaire de la production d'un parc éolien



Source : https://hal.science/hal-04073569v1/file/FEE_Keynote_GKariniotakis_2022-10-11_v1pub2.pdf

État de l'art :

Les premières tentatives de prévision datent de 1985 avec des modèles déterministes basés sur des séries auto-régressives linéaires, reliant directement la production aux données météorologiques et aux caractéristiques des fermes éoliennes. À partir des années 1990, puis surtout dans les années 2000, sont apparues des approches stochastiques et les premiers recours aux réseaux de neurones. L'intérêt scientifique a connu une véritable explosion entre 2005 et 2010 de par le développement de projets éoliens, notamment en mer, de certains pays précurseurs (Danemark, Allemagne, etc.) jusqu'à l'arrivée massive des méthodes d'intelligence artificielle (IA) après 2015. D'autant plus qu'au-delà des modèles de prévision, les acteurs se doivent d'optimiser leur stratégie de bidding, où ils définissent la quantité qu'ils mettront à disposition sur les marchés et son prix de vente. Cette optimisation donne également lieu à de nombreuses publications. L'approche traditionnelle de prévoir puis optimiser a été complétée par des techniques dites « orientées valeur » qui incluent une rétroaction de cette optimisation sur les prévisions. Le développement actuel de l'IA permet aujourd'hui de combiner la prévision et l'optimisation pour définir directement une offre sur le marché à partir des données brutes.

Les progrès récents sont significatifs. Météo-France a, par exemple, introduit des simulations dites « Large Eddy Simulation », capables de capturer des variations infra-horaires avec une précision spatiale supérieure aux standards classiques (jusqu'à 50m), ce qui permet des gains de l'ordre de 9 %. Par ailleurs, il est désormais possible de corrélérer les données mesurées sur les fermes voisines aux prévisions de production d'une ferme à un horizon de temps de l'ordre de quelques heures plus tard. Il y a évidemment des enjeux de confidentialité : c'est pourquoi, des techniques de cryptage ont été développées pour conserver l'entièreté de l'information utile sans échanger de données brutes.

Recherches en cours et défis futurs :

Malgré ces avancées, plusieurs défis demeurent. Les chercheurs s'efforcent d'améliorer la prévision à moyen terme, notamment pour mieux intégrer les effets saisonniers mais aussi la prévision lors d'événements extrêmes (orages, gel). Cela permettra alors de réduire l'incertitude autour des contrats du type « Power Purchase Agreement » (PPA). Enfin, au-delà de la seule recherche de précision, la résilience des modèles devient cruciale : il faut tenir compte des situations de données manquantes, des cyberattaques ou encore des contraintes externes comme la maintenance ou le bruit généré. Du côté de l'IA, il est également crucial de rendre les modèles les plus interprétables

possibles de manière à rendre moins opaque le processus de définition de l'offre à partir des données brutes.

Discussion :

Utilise-t-on des modèles de séries temporelles à seuil pour la prévision de production ?

Oui, des modèles à détection de seuil ont été appliqués afin de détecter le passage d'un régime à un autre, notamment pour le projet SafeWind.

Vous parliez de la production éolienne comme si elle devait être égale en chaque instant à la consommation. Est-ce bien le cas ?

Ce sujet n'est pas spécifique à la production éolienne. En effet, c'est là la mission de RTE que de faire en sorte qu'à chaque instant la production soit égale à la consommation. Ceci dit, il existe effectivement des solutions de stockage. On assiste notamment au développement du stockage sur batterie pour lequel des appels d'offres ont été émis. Cela concerne principalement les systèmes insulaires en outre-mer. Ces solutions apportent de la flexibilité mais ne sont pas en mesure de stocker toute la production excédentaire des énergies renouvelables, comme en témoignent les prix parfois négatifs de l'électricité en milieu de journée. D'autres facteurs de flexibilité sont à trouver du côté de la consommation. Il existe déjà des signaux plus ou moins directs que RTE met en place afin d'inciter les usagers à réduire leur consommation par exemple.

Évaluation des impacts environnementaux de l'éolien en mer par analyse de cycle de vie

Joanna SCHLESINGER-MARTINAT | O.I.E. Mines Paris - PSL

Contexte :

RTE, à travers son rapport Futurs Energétiques 2050 paru en 2023, estime que la part de l'éolien atteindra entre 25% et 52% de la production électrique d'électricité en 2050 en France hexagonale, bien au-delà des 10% en 2023. En termes de capacités installées, la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie fixe donc comme objectif une multiplication par 2 des capacités de l'éolien terrestre et par plus de 10 de l'éolien en mer d'ici 2035. Cette croissance devrait se poursuivre jusqu'en 2050 à des rythmes plus ou moins importants en fonction des scenarii de RTE.

Cette croissance est déjà observable : 10 fermes éoliennes en mer d'une capacité totale de 4,6 GW sont en cours de développement pour s'ajouter au 1,5 GW déjà opérationnels. On recense également 3,6 GW de capacités supplémentaires, pour l'instant au stade de l'appel d'offre.

Définition :

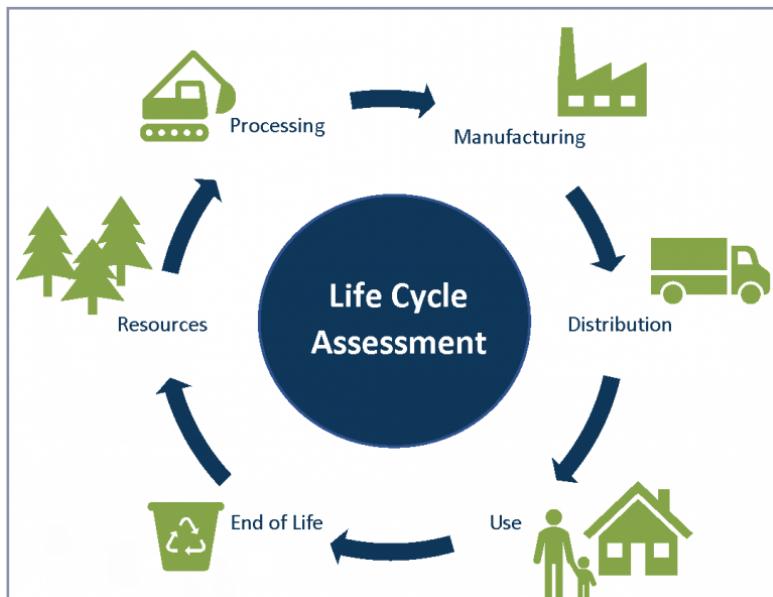
À l'heure du bilan carbone qui se concentre sur les effets sur le changement climatique, l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) constitue une approche multicritère et normée (ISO14040, ISO14044) pour évaluer les impacts environnementaux, de l'extraction de ressources jusqu'à la fin de vie du projet. Il est important de comprendre qu'il s'agit d'un outil parmi d'autres. En effet, l'ACV se veut multicritère et les indicateurs qui en découlent agrègent parfois de nombreux éléments, notamment en ce qui concerne la biodiversité ; c'est pourquoi, il est pertinent de le combiner avec d'autres outils d'évaluation d'impacts plus spécifiques. Pour autant, certains projets de recherche se destinent à améliorer ces indicateurs globaux.

Application de l'ACV à l'éolien en mer :

Selon les données issues de la [Base empreinte de l'ADEME](#), l'éolien terrestre et en mer français présentent actuellement une empreinte carbone similaire de 14-15 gCO₂eq/kWh électrique produit, d'où son intérêt dans un contexte

de décarbonation visant notamment à se passer des énergies fossiles comme le charbon (~1000 gCO₂eq/kWh) et le gaz (~400 gCO₂eq/kWh) dans la production d'électricité. À titre de comparaison, l'éolien présente une empreinte carbone 1,5 à 3 fois plus faible que le solaire photovoltaïque, mais environ 3 fois supérieure à celle de l'hydroélectricité ou du nucléaire.

Représentation schématique de l'analyse de cycle de vie

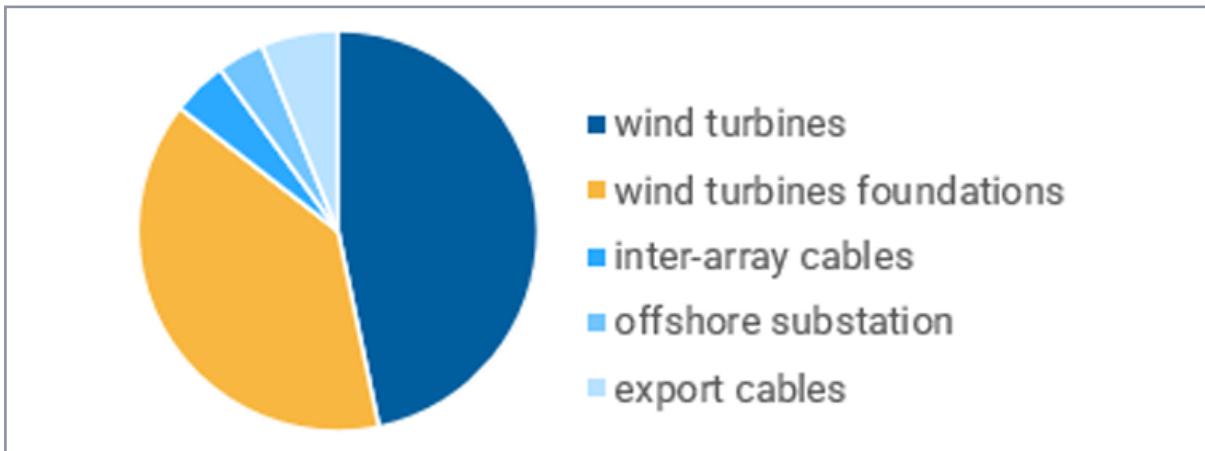


Source : <https://www.ncasi.org/technical-studies/sustainable-manufacturing/life-cycle-assessment/>

Un cas d'étude portant sur un parc éolien en mer fictif de soixante turbines de 10 MW dans un contexte français a été réalisé. Concernant la catégorie d'impact changement climatique, la moitié des émissions de gaz à effet de serre est générée lors de la fabrication des composants. Parmi les autres étapes du cycle de vie, l'installation et le démantèlement de la ferme en mer sont les étapes qui contribuent le plus aux émissions de gaz à effet de serre après la fabrication. Concernant l'étape de fabrication, ce sont plus précisément la fabrication des turbines et des fondations, à part égale, qui y contribuent le plus alors que les émissions générées par la fabrication des câbles et des sous stations électriques ne représentent qu'une petite partie de ces émissions.

L'ACV permet également d'étudier d'autres catégories d'impacts environnementaux. Les phases d'opération en mer, notamment l'installation et le démantèlement, contribuent fortement à l'acidification et aux émissions de particules. Pour les catégories d'impacts « raréfaction des ressources » et « écotoxicité », c'est l'étape de fabrication qui contribue le plus aux impacts.

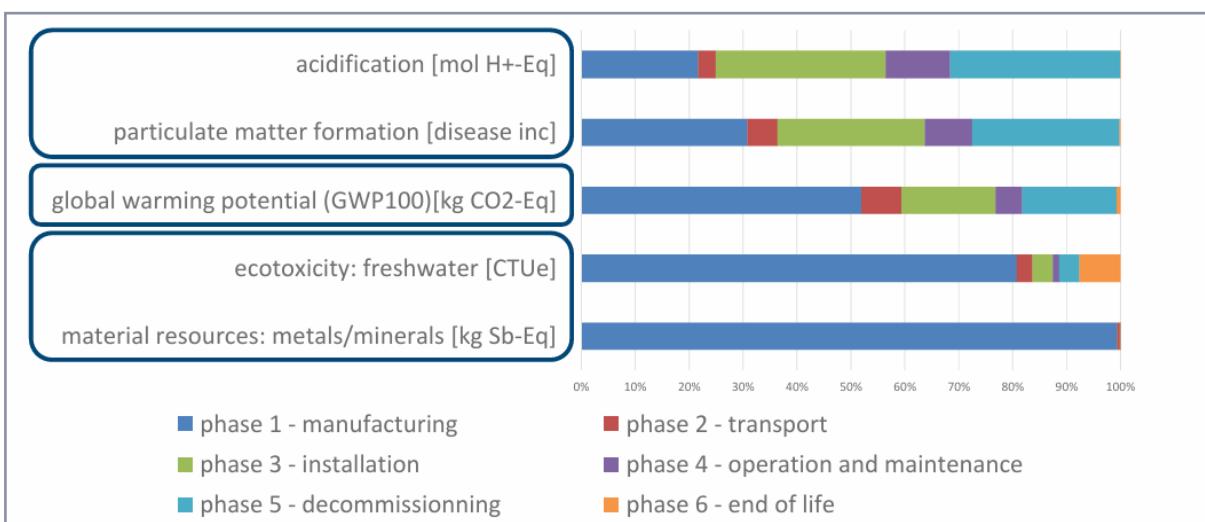
Répartition des émissions de gaz à effet de serre liées à l'étape de fabrication par type de composant



Source : Données issues d'un cas d'étude réalisé avec le modèle LIF-OWI, Joanna Schlesinger-Martinat

Même si les politiques publiques restent essentiellement centrées sur les émissions de gaz à effets de serre, en témoigne l'intégration du seul critère d'émission de gaz à effets de serre aux processus d'appel d'offre, l'ACV constitue désormais une obligation réglementaire : avant tout raccordement, les opérateurs doivent fournir une ACV à l'ADEME. Des entreprises (notamment RTE) explorent l'utilisation de résultats d'études ACV pour réduire l'impact environnemental des futurs parcs éoliens via des démarches d'éco-conception. Enfin, il est rappelé que l'énergie ayant le plus faible impact reste celle qui n'est pas consommée, un principe essentiel à garder en tête au-delà des raisonnements à consommation d'énergie fixée.

Part relative des différentes étapes du cycle de vie pour différents critères



Source : Données issues d'un cas d'étude réalisé avec le modèle LIF-OWI, Joanna Schlesinger-Martinat

Discussion :

Quelle est la méthode utilisée pour les études d'impact ?

C'est la méthode « Environmental Footprint 3.0 » recommandée par l'UE qui a été utilisée. La question est pertinente dans le sens où le choix de la méthode est effectivement un facteur de variabilité entre les résultats.

Prend-on en compte l'impact sur la modification des fonds marins ?

Cela n'a pas été pris en compte dans cette étude. Mais, effectivement, ce projet transforme l'usage du fond marin. Il s'agit là d'une limite de l'ACV. L'indicateur biodiversité est très macroscopique et ne rend pas très bien compte de l'ensemble des différentes typologies d'impact. Il est alors nécessaire, à l'avenir, de se questionner sur la manière dont on pourrait l'intégrer dans l'ACV ou alors sur l'utilisation d'une autre étude d'impact plus spécifique.

Quel est l'impact des solutions de stockage sur l'impact environnemental ?

Les moyens de stockage activés ne sont pas les mêmes à chaque instant. Ils dépendent du scénario étudié, de la quantité d'énergie à stocker, etc. Globalement, on peut considérer que l'impact du stockage est un impact non négligeable mais de second ordre. Une étude en cours sur les scénarios Futurs énergétiques 2050 de RTE montre une augmentation des émissions de gaz à effet de serre de 15% à cause du stockage dans le cas du scénario 100% renouvelable pour la France hexagonale.

A-t-on accès à des ACV sur des projets qui datent déjà de plusieurs années ?

La difficulté réside dans la confidentialité des données dans ce secteur étant donné la concurrence dans ce domaine. En effet, même s'il y a des études sur ces projets, il est difficile de les anonymiser du fait du peu de fermes éoliennes existantes. L'ADEME dispose de certaines études qu'il est obligatoire de réaliser mais celles-ci ne sont pas disponibles publiquement pour autant.

Quelle est la durée de vie des installations éoliennes ? Quel est le facteur limitant ?

La durée de vie observée aujourd'hui des turbines est de l'ordre de 20 à 30 ans en raison de la dégradation des composants mécaniques et électriques. Toutefois, il existe des cas au Danemark, pays pionnier de l'éolien en mer, où l'exploitation de certaines installations a été prolongée de 10 ou 25 ans après une vingtaine d'année d'exploitation. Cela nécessitera un suivi particulier et, probablement, des remplacements de certains composants. Il est également intéressant de noter que de telles prolongations facilitent l'acceptabilité dans le sens où il n'est pas nécessaire de construire une nouvelle ferme pour poursuivre l'exploitation de l'énergie éolienne.

Évaluer les enjeux de l'intégration sociale de l'éolien en mer en France

Rhoda FOFACK-GARCIA | France Énergies Marines

Contexte :

Le développement de nouvelles technologies d'énergies marines renouvelables, notamment l'éolien en mer, influence les interactions entre les systèmes écologiques et sociaux dans lesquels ces projets se déploient.

L'ACV sociale se présente comme un outil clé pour évaluer les impacts socio-économiques tout au long du cycle de vie d'un projet. Elle agit comme un outil d'aide à la décision dans le choix entre différentes options en fonction de critères prioritaires en matière de risques ou d'enjeux sociaux, de parties prenantes à considérer à chaque étape du cycle de vie et compte tenu des spécificités géographiques des territoires concernés. L'ACV sociale se décline selon[CG7.1] deux approches principales :

- **les approches de type 1**: axées sur la performance sociale d'une entreprise ;
- **les approches de type 2** : basées sur une logique cause à effet, visant à intégrer les chaînes d'impacts dans l'analyse.

Les études actuelles développent des approches hybrides d'évaluation afin de prendre en compte les impacts du point de vue de différentes parties prenantes plutôt que de limiter les analyses à des évaluations de performance purement centrées sur l'organisation ou d'intégrer une gamme limitée d'impacts sociaux tels que la santé humaine et le bien-être des parties prenantes ciblées.

En octobre 2024, la norme ISO 14075 a été publiée, formalisant et homogénéisant le cadre méthodologique pour l'application de l'ACV sociale. Avant la publication de cette norme, le cadre méthodologique reposait sur les recommandations de l'[UNEP de 2020](#). L'adaptation de ce cadre méthodologique au cas spécifique des parcs éoliens en mer, fixes et flottants, a fait l'objet du projet de recherche [LIF-OWI](#). Ce dernier a permis de développer une approche multi-échelle (globale, nationale et locale) d'évaluation des impacts sociaux en proposant des mesures et des indicateurs d'impacts adaptés à chaque échelle d'évaluation. Les résultats du projet LIF-OWI mettent également en évidence la nécessité de diversifier les cas

d'étude sur les impacts socio-économiques afin d'améliorer l'évaluation des indicateurs d'impacts sociaux à l'échelle locale de l'implantation des parcs éoliens en mer.

Cas d'étude :

Afin d'illustrer la réponse au besoin de données et d'analyses spécifiques à des sites de parcs éoliens en mer, concentrons-nous sur une étude de cas des impacts de l'éolien en mer sur le tourisme. Cette étude se déploie sur trois projets de parcs éoliens en mer en France, chacun à des niveaux de développement différents : le parc éolien de Courseulles-sur-Mer (Calvados), celui de Saint-Nazaire (encore appelé Banc de Guérande) sur la façade atlantique et Leucate sur le front méditerranéen.

Etat des projets éoliens en mer en France

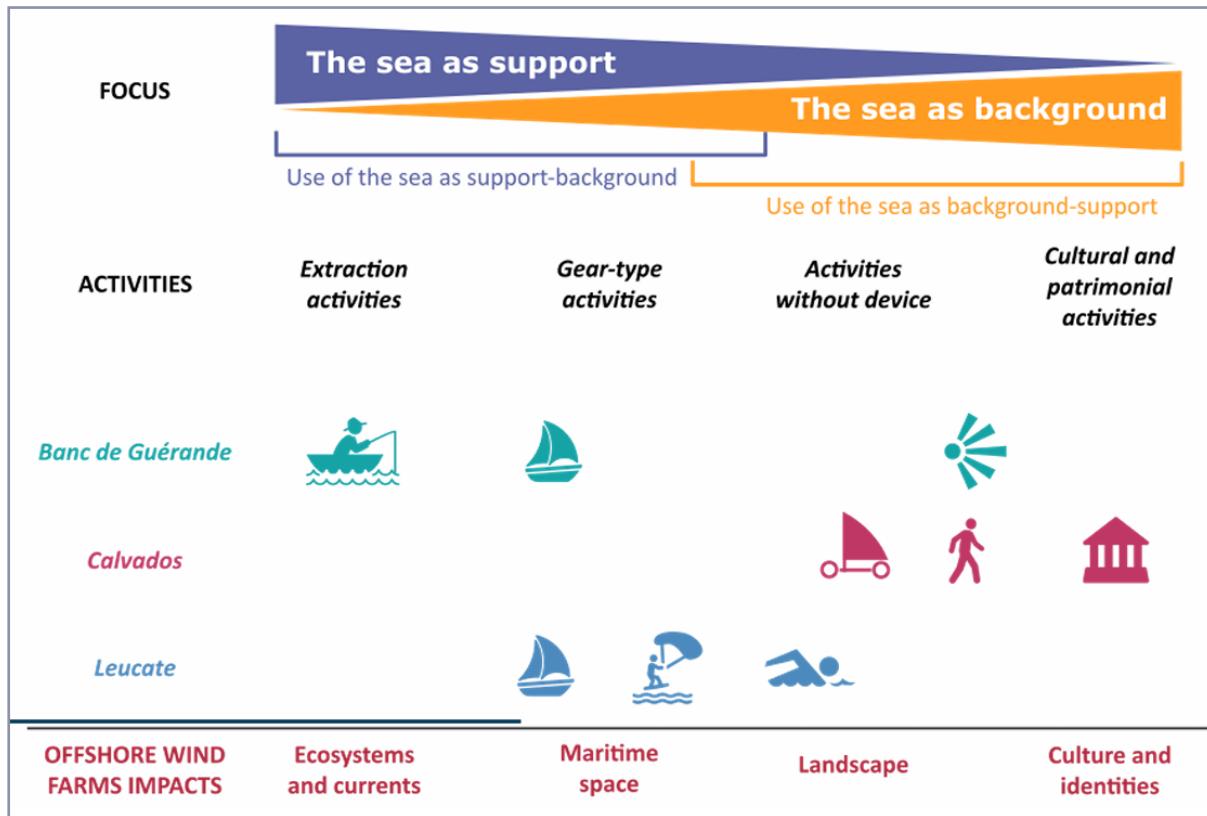


Source : [Connaissance des énergies – Parc éolien français](#)

Alors que la majorité des études essaie aujourd'hui de quantifier chez les potentiels touristes des phénomènes d'attraction ou d'aversion vis-à-vis de ces projets éoliens en fonction des géographies, la méthodologie retenue dans le cas présenté est différente. L'étude se place du point de vue des acteurs du tourisme qui construisent et fournissent l'offre touristique sur les territoires maritimes visés, plus précisément des prestataires privés de tourisme ainsi que des représentants institutionnels des offices de tourisme. Il s'agit d'analyser l'impact des parcs éoliens en mer sur les activités touristiques et d'évaluer les perceptions des acteurs vis-à-vis de ces impacts. Pour comparer les potentiels impacts, une typologie des activités maritimes récréatives a été construite qui distingue la mer comme médium ou comme toile de fond. Cette

typologie met en évidence les différences d'impacts potentiels des parcs éoliens offshore sur le tourisme local. On distingue notamment les activités extractives de pêche qui utilisent un engin, potentiellement affectées par des changements de zones de pratiques des activités culturelles ou patrimoniales, potentiellement affectées par les modifications de paysage et de l'aspect visuel du territoire.

Typologie des activités récréatives maritimes



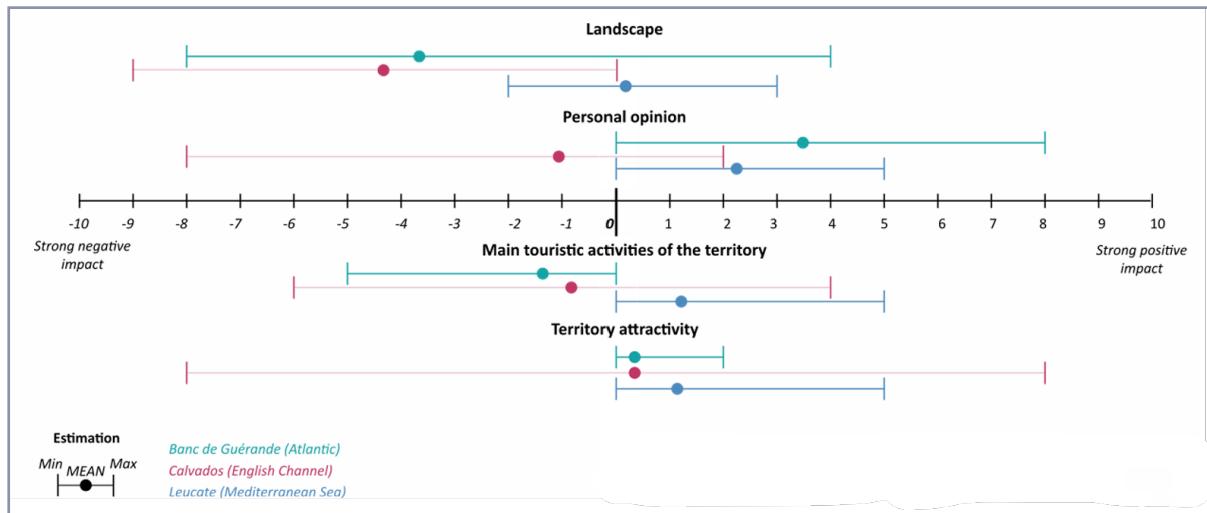
Source : Rhoda Fofack-Garcia - Analyse comparative des projets éoliens en mer sur le tourisme et les activités récréatives dans 3 territoires

Au-delà de cette typologie des activités maritimes récréatives, les résultats de l'étude portent sur l'évaluation des perceptions des impacts des parcs éoliens offshore sur les trois sites d'étude et en considérant cinq enjeux principaux : (1) l'impact sur le paysage, (2) l'activité de la personne interviewée, (3) les activités touristiques du territoire, (4) l'image du territoire et (5) l'attractivité du territoire.

En termes d'opportunités, l'étude met en évidence l'émergence d'un «tourisme de l'éolien en mer» : musées dédiés à l'éolien en mer, visites de parcs éoliens en mer en bateau, mais aussi un soutien des développeurs de parcs éoliens en mers aux activités locales, notamment aux événements sportifs. Un suivi à moyen-terme de l'évolution des pratiques touristiques et de la perception des impacts sur le tourisme a été mis en place. Ce suivi permettra

de confirmer des tendances observées et d'analyser les futures trajectoires d'intégration territoriale de l'éolien en mer. Enfin, le cadre méthodologique de l'ACV sociale continue de se développer. Le projet COMPASS, issu d'un appel à projet Horizon Europe et coordonné par France Énergies Marines, en est le parfait exemple. Il vise à développer un outil d'évaluation holistique des impacts environnementaux, sociaux et économiques, à différentes échelles spatiales afin d'accompagner la prise de décision en matière de durabilité des parcs éoliens en mer dès les étapes de conception.

Perception des impacts des parcs éoliens offshore

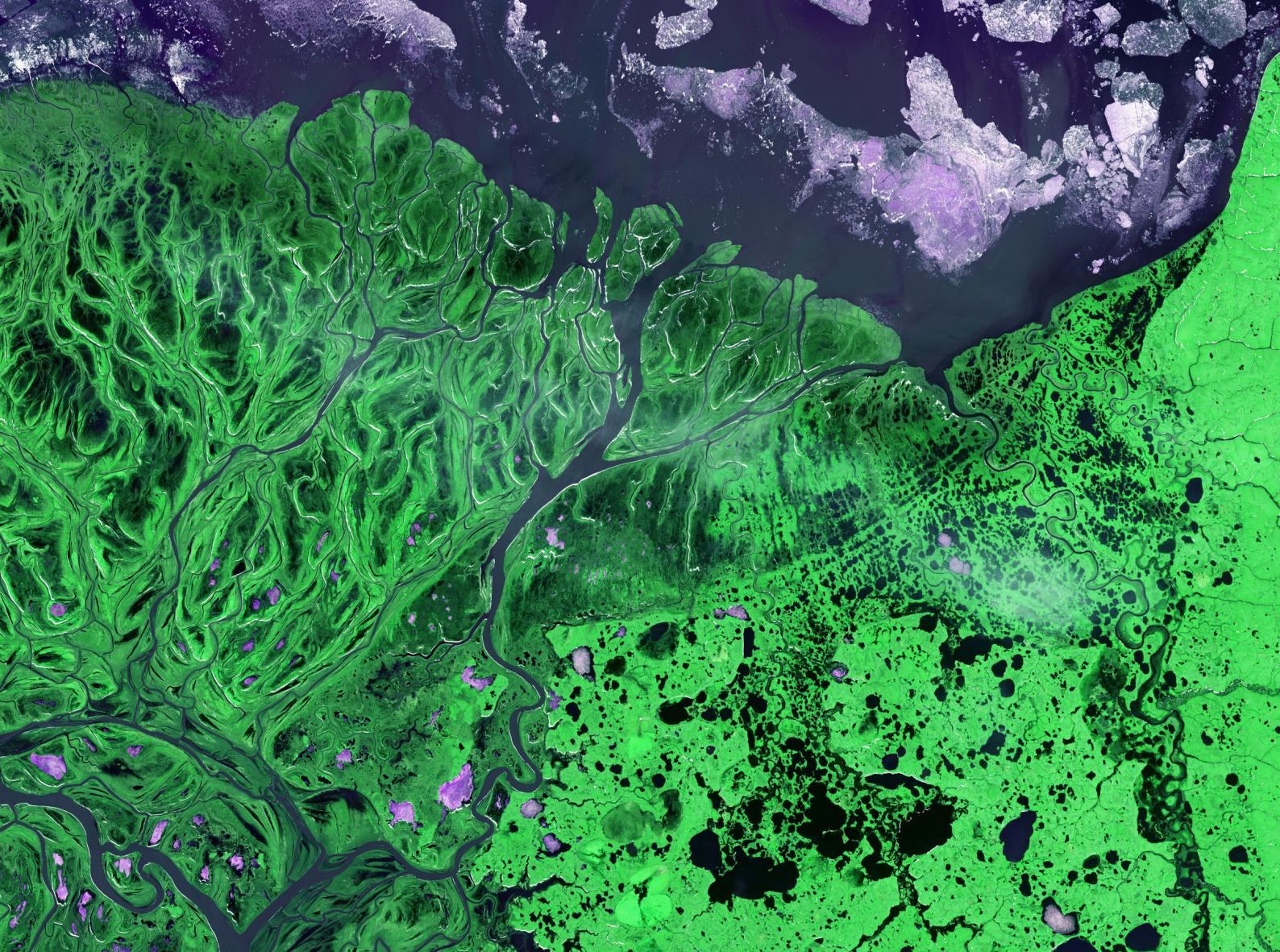


Source : [Unravelling The Offshore Wind Energy Tourism](#), 2024, Yoann Baulaz, Rhoda Fofack-Garcia

Discussion :

N'y a-t-il pas un impact de l'avancement des projets, notamment s'ils sont déjà construits ou non, sur les résultats de l'étude ?

Oui, effectivement, l'objectif de la méthodologie était de déployer une enquête pré- et post-construction. C'est primordial pour comprendre comment les perceptions peuvent évoluer. Il est prévu de déployer une nouvelle fois la méthodologie après construction des projets pour lesquels l'étude a été menée pré-construction afin de mettre en place un suivi de long terme. Toutefois, la mise en service d'une ferme éolienne n'est que la partie émergée[CG13.1] de l'iceberg. En réalité, la partie en amont, notamment le choix de l'emplacement, suscite déjà des débats publics et façonne déjà les opinions et les dynamiques d'acteurs.



CONTACT

🌐 the-transition-institute.minesparis.psl.eu

✉️ tti.5@minesparis.psl.eu