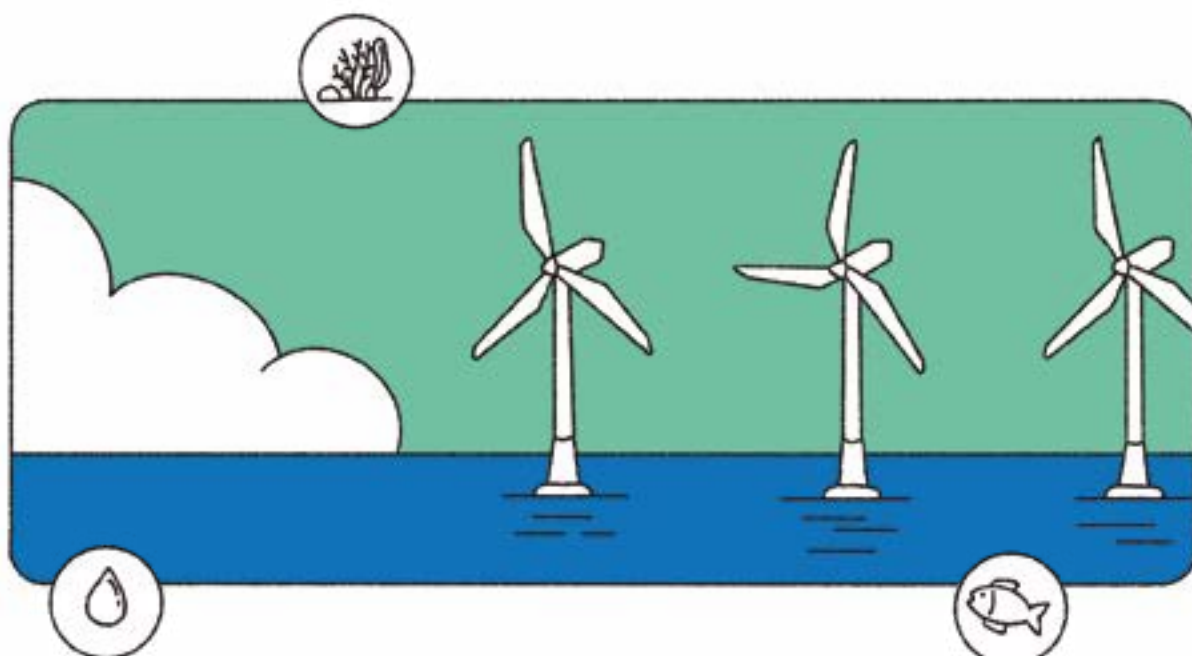




Boîte à outils L'ÉOLIEN EN MER



Introduction

Chers et chères bénévoles,

Surfrider s'intéresse depuis le milieu des années 2010 aux questions de l'éolien en mer. Luttant depuis des années contre les énergies fossiles, et malgré le besoin primordial de faire preuve de sobriété, Surfrider reconnaît la nécessité de développer les énergies renouvelables dont font partie l'éolien en mer et les autres énergies marines (EMR), et ne s'y oppose pas. Plusieurs études notamment pour la France montrent d'ailleurs que l'on ne pourra pas se passer de l'éolien en mer dans le cadre de la transition écologique. Le débat ne porte pas sur le pour ou contre l'éolien en mer, mais bien sur le comment.

En effet, ce nouvel usage marin vient exercer des pressions sur les milieux. Le nécessaire développement de l'éolien en mer doit donc se faire avec précaution, dans le respect de l'environnement et des êtres vivants.

En 2023, Surfrider publie officiellement son positionnement sur les énergies marines renouvelables. En voici les grandes lignes :

- Surfrider **soutient sur le principe l'ambition de l'Union européenne** et des États membres de développer les projets d'éolien en mer,

- Ce développement doit se faire de manière impérative dans le cadre d'une politique de **sobriété énergétique**,

- Ce développement ne doit pas se faire au détriment de la biodiversité et du patrimoine naturel et culturel. Si des dommages collatéraux sont inévitables, ils doivent être réduits au maximum,

- Seule une **planification spatiale maritime** rigoureuse qui prend en compte la biodiversité parmi les premiers critères pourra permettre le développement de l'éolien en mer dans de bonnes conditions.

- Enfin, **le dialogue avec la société civile est essentiel**, avec une information transparente sur les connaissances des impacts environnementaux, des conséquences socio-économiques et des stratégies de l'Etat en matière d'énergie, de protection de l'environnement et de planification spatiale maritime. Chaque projet aura ses spécificités en regard des enjeux locaux, et doit donc aussi faire l'objet d'une analyse par projet, en dialogue étroit avec la société civile.

C'est par rapport à ce dernier point que Surfrider propose en 2024 cette **boîte à outils à l'usage des bénévoles** : pour vous **informer** de manière plus détaillée sur certains enjeux soulevés par certains bénévoles de l'association impliqués sur le sujet des EMR, mais aussi pour vous partager **ce que pense Surfrider** de ces enjeux, et vous donner des idées de **questions à poser** si vous allez en débat ou réunion publique, ou si vous avez l'occasion de visiter des sites d'éolien en mer ou encore d'échanger avec des développeurs de l'éolien en mer.

Cette boîte à outils se compose de 11 fiches thématiques. et 1 fiche bibliographique. Elles peuvent se lire de manière indépendante. Quand c'est nécessaire, elles se font référence les unes aux autres ! Les mots marqués d'un astérisque * sont définis sur la dernière fiche, où vous trouverez également une liste de ressources pour creuser le sujet par thématiques. Certaines fiches y pointent directement les références (indiquées par le chiffre en exposant !).

Bonne lecture !

Liste des fiches

1. **CONCERTATION EN FRANCE**
2. **ENJEUX TECHNIQUES D'UN PARC ÉOLIEN**
3. **DESCRIPTION TECHNIQUE D'UN PARC ÉOLIEN**
4. **EOLIEN POSÉ**
5. **EOLIEN FLOTTANT**
6. **RACCORDEMENT ET Câbles sous-marins**
7. **MATÉRIAUX UTILISÉS**
8. **ÉTUDES ENVIRONNEMENTALES**
9. **EFFETS ENVIRONNEMENTAUX**
10. **EFFETS DU BRUIT sous-MARIN**
11. **CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES**
12. **BIBLIOGRAPHIE**

Rédactrice principale

Adeline Adam

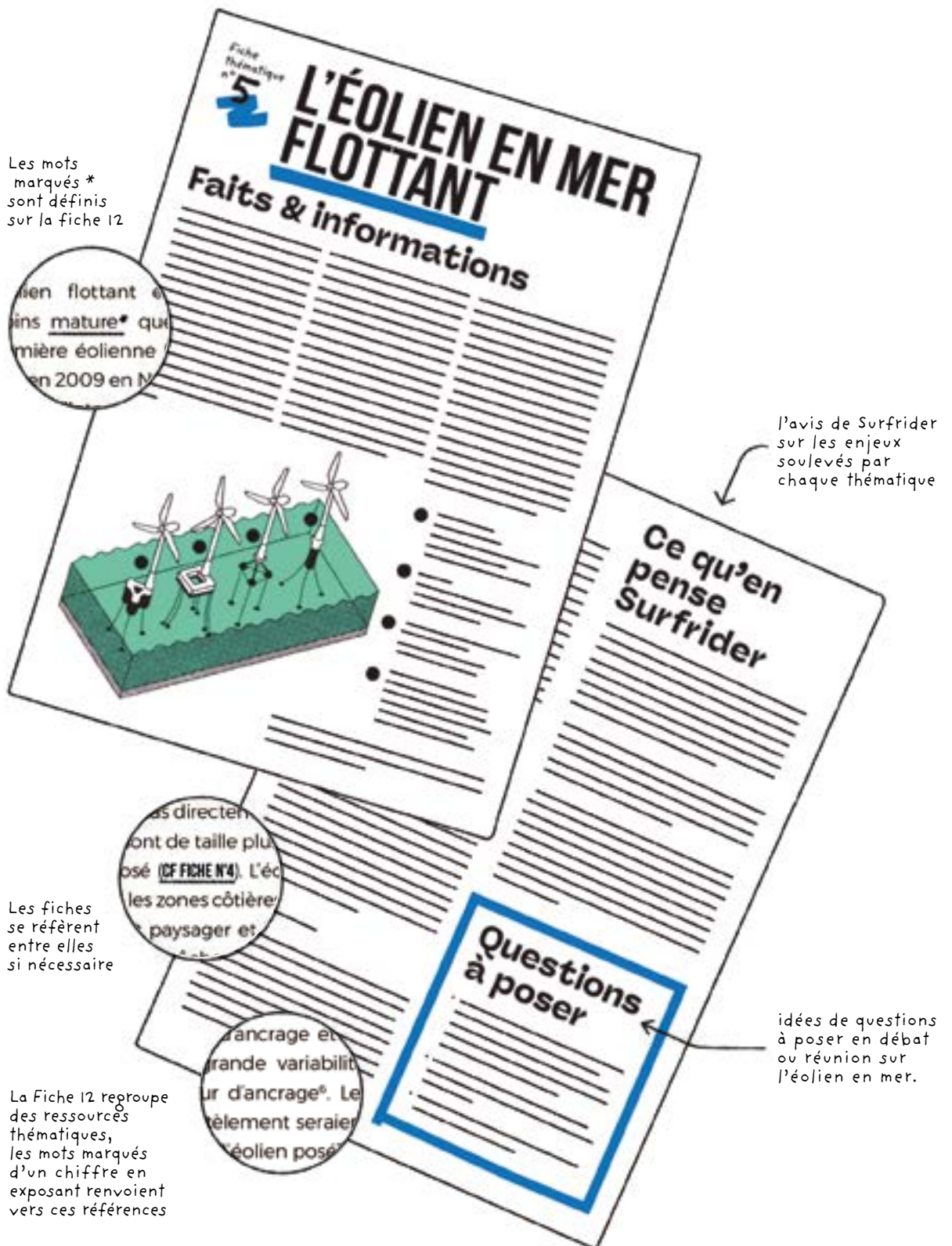
aadam@surfrider.eu



Ce projet a reçu les financements du programme LIFE de l'Union Européenne. Le soutien de la Commission européenne à la production de cette publication ne constitue pas une approbation du contenu, qui reflète uniquement le point de vue des auteurs, et la Commission ne peut être tenue responsable de toute utilisation qui pourrait être faite des informations qu'elle contient.



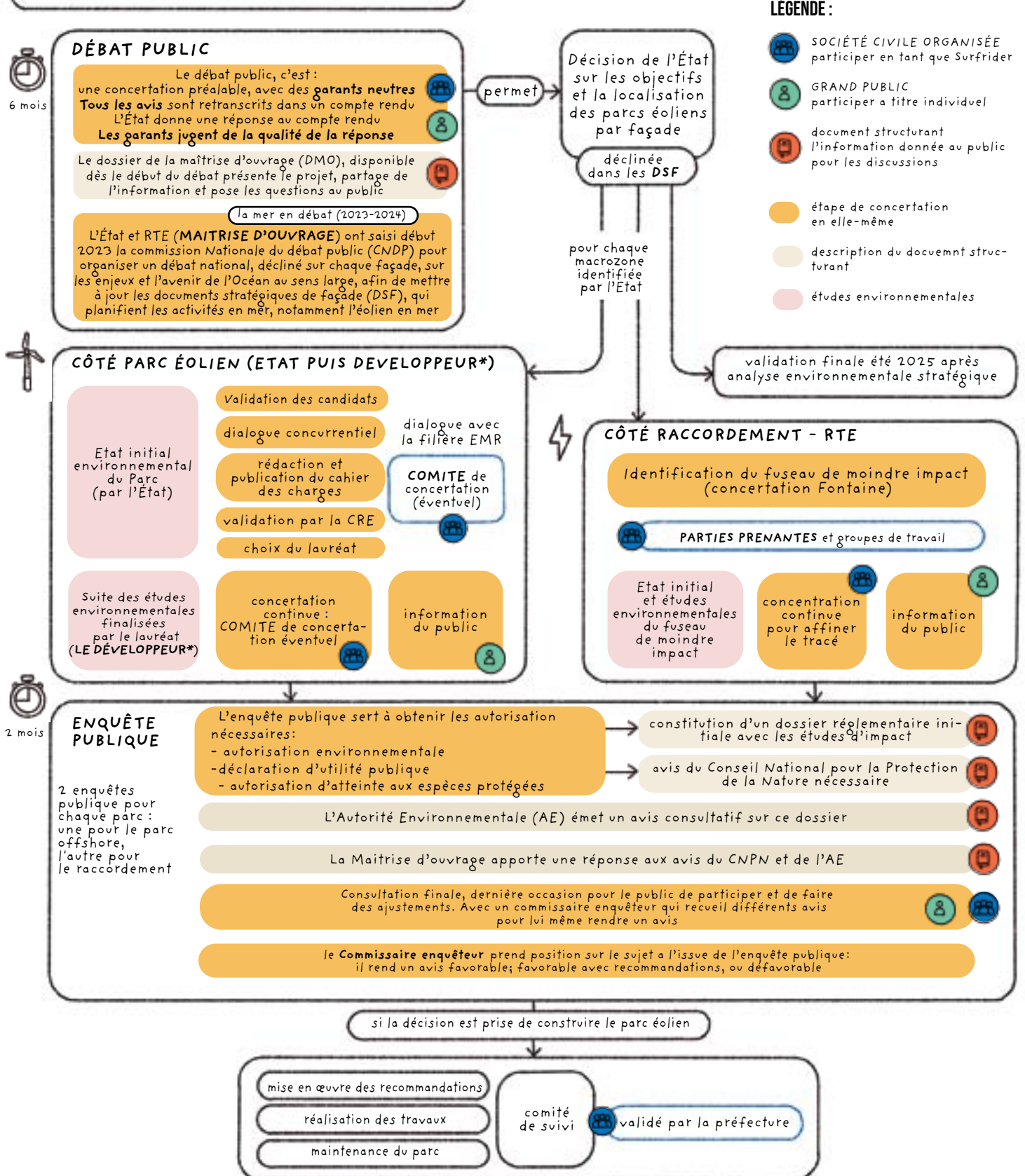
mode d'emploi de la boîte à outils



CONCERTATION

Faits & informations

ÉTAPES DE LA CONCERTATION DANS LE CAS DE PARCS ÉOLIENS EN MER



La concertation préalable est bien souvent facultative. Elle est obligatoire seulement pour certains secteurs et certaines envergures de projet et prend alors la forme d'un débat public, organisé par la CNDP. C'est le cas pour l'éolien en mer. Chacun des 14 parcs éoliens actés avant 2024 a ainsi fait l'objet d'un débat public. Ces parcs ont été officiellement lancés via des appels d'offres (8 en tout), Certains appels d'offre (AO) regroupaient plusieurs parcs éoliens.

La mer en débat fait office de débat public pour tous les parcs éoliens décidés à partir de 2024, qui seront tous en fonctionnement en 2050 au plus tard. La mer en débat a permis à l'Etat de réaliser une «planification de l'éolien en mer». Plusieurs AO concernant chacune plusieurs parcs en émergeront. Chaque parc aura ensuite ses étapes d'études environnementales et d'enquêtes publiques. Le prochain débat public aura vraisemblablement lieu lors de la prochaine révision des DSF, vers 2030, ou 10 ans après «la mer en débat», en 2034.



Ce qu'en pense Surfrider



Pour Surfrider, **une concertation impliquant activement tous les publics** est indispensable pour réussir à concilier au mieux le respect de l'environnement avec un approvisionnement énergétique durable qui satisfait les besoins humains. Cependant, ce qui est appelé concertation lors du débat public n'est qu'une consultation : la maîtrise d'ouvrage, qui décide à la fin, est libre de tenir compte ou non des différents avis. Il faut aussi avoir clairement en tête que tous les avis exprimés ne pourront être pris en compte, car ils sont parfois contradictoires, ou pas réalistes (lors du débat public comme de l'enquête publique).

Surfrider regrette que bien souvent, la **réelle marge de manœuvre possiblement ajustable par le grand public ne soit pas clairement posée** : le grand public en vient à s'exprimer sur des éléments qui ne sont pas de son ressort, et parfois sur une exposition

des faits lacunaire. La participation du public devrait apporter un éclairage territorial sur le projet et permettre de questionner l'opportunité du projet. Pour Surfrider, il est nécessaire de **participer à toutes les étapes de la concertation en étant informé autant que possible** : sinon c'est une confrontation d'opinions, et non pas un débat de propositions. C'est pourquoi nous mettons à disposition de nos bénévoles et de notre communauté des informations factuelles.

Surfrider regrette également que les enquêtes publiques ne permettent pas réellement de poser à nouveau **l'opportunité du projet** à la lumière des études d'impact, indisponibles au moment du débat public.

En tant que partie prenante, **Surfrider encourage ses bénévoles à participer aux groupes de travail** mis en place dans les périodes où la concertation se fait en comité restreint.

Questions à poser

- Quelles sont les variables d'ajustement laissées au grand public lors des différentes phases de concertation ?
- Comment allons-nous être informés des résultats des études environnementales ?
- Comment pouvons-nous exprimer notre avis sur les résultats des études environnementales ?

ENJEUX TECHNIQUES POUR UN PARC ÉOLIEN

Faits & informations

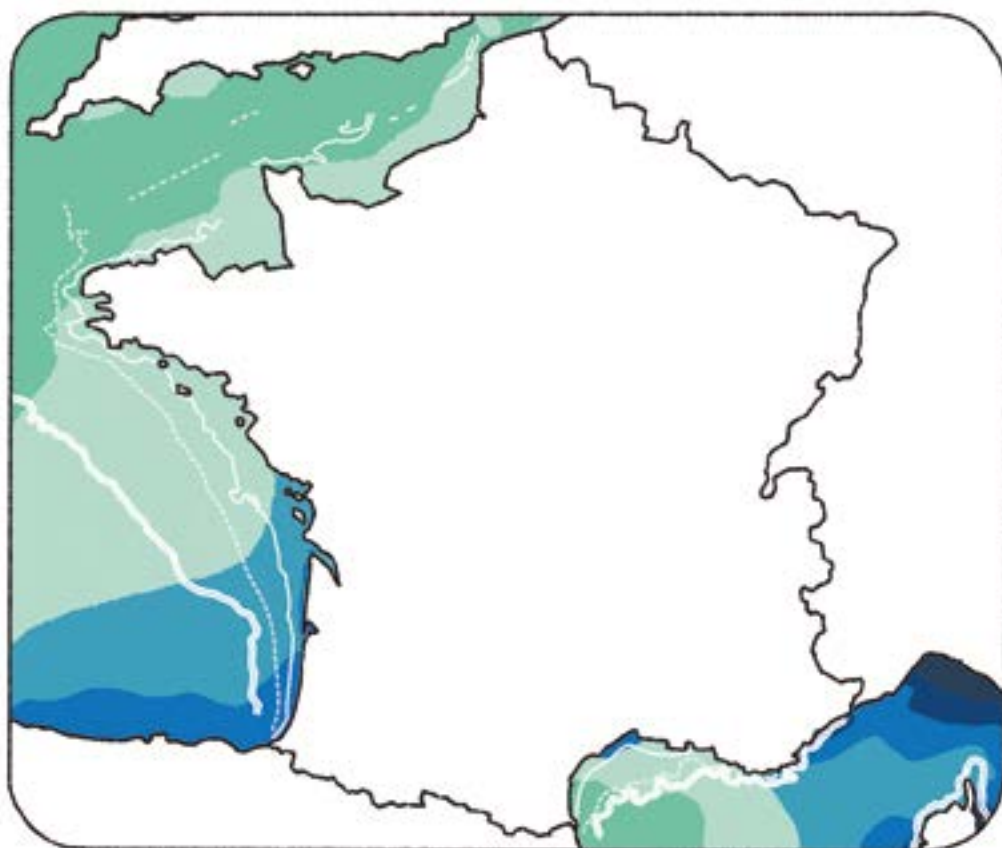
Un parc éolien ne peut pas s'implanter n'importe où : au-delà des enjeux environnementaux (cf **FICHE N°9**) et des contraintes d'usage, il y a aussi des enjeux techniques limitants qu'il est essentiel de prendre en compte, et sur lesquels il n'y a pas ou peu de marge de manœuvre. Nous détaillons ici les enjeux de **ressource en vent**, de **profondeur** et de proximité du **réseau électrique** de la zone d'atterrissage pour le raccordement. D'autres enjeux comme la force des courants, des vagues ou des tempêtes limiteront aussi techniquement les possibilités d'installation d'un parc éolien sur une zone donnée.

RESSOURCE EN VENT

Pour garantir un fonctionnement optimal des éoliennes, il faut les installer dans des espaces où la vitesse moyenne du vent est supérieure à **8m/s** à hauteur de nacelle, c'est-à-dire environ à 100m de hauteur. En France, le potentiel de vent est plus important en Méditerranée et en Normandie, ainsi qu'en Bretagne jusqu'au nord de l'estuaire de la Gironde.

PROFONDEUR DU SOL SOUS-MARIN

Un parc éolien ne peut être posé que jusqu'à 60m maximum de profondeur. Au-delà, il faut recourir au flottant. En 2024, on ne sait pas encore faire de sous-station électrique flottante : il y a un enjeu de développement technologique autour des câbles électriques dynamiques. Lors du débat public de 2024, une **limite de 100m** de profondeur a donc été fixée comme contrainte au développement des parcs éoliens, la sous-station électrique posée pouvant être implantée jusqu'à 100m.

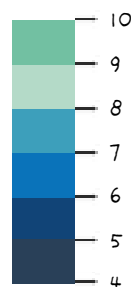


**BATHYMÉTRIE ET VITESSE DU VENT
À 100M DE HAUTEUR
EN FRANCE HEXAGONALE**

**BATHYMÉTRIE (PROFONDEUR
DES FONDS MARINS)**

— -50 M
----- - 100 M
— -200 M

**VITESSE DU VENT AU LARGE
À 100M DE HAUTEUR (EN M/S)**



LOCALISATION ET CAPACITÉS D'ACCUEIL DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE



d'après RTE (SDDR)

RÉSEAU DU TRANSPORT D'ÉLECTRICITÉ
HAUTE ET TRÈS HAUTE TENSION, POSTES
ÉLECTRIQUES, ET ZONES DE CONTRAINTE
DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE

RÉSEAU RTE

POSTE RTE ● 225 kV
 ● 400 kV

LIGNE RTE — 225 kV
 — 400 kV

Zone de contraintes sur le réseau déjà identifiées il y a 5 ans (des projets prévus pour y remédier)

Nouvelles zones de contraintes (renforcement du réseau nécessaire avant d'envisager de nouveaux raccordements)

Le réseau électrique fait partie des éléments critiques déterminant les zones d'implantation des éoliennes en mer. D'une part il y a un enjeu à ce que **le poste électrique terrestre** qui relie le câble souterrain venant du parc éolien au réseau national existant (cf **FICHE N°6**) ne soit pas trop éloigné du lieu d'atterrissage pour limiter la longueur des câbles souterrains. Si ce n'est pas possible, un poste élec-

trique peut être créé. D'autre part, il faut que le réseau existant où a lieu ce raccordement puisse accueillir **une production électrique supplémentaire**. En effet, le réseau électrique est dimensionné pour une certaine puissance électrique. Si cette puissance augmente et dépasse le dimensionnement prévu, des effets de **saturation du réseau** peuvent apparaître (similaires à des embouteillages sur une

autoroute par exemple). Raccorder un parc éolien en mer peut ainsi générer ou contribuer à déclencher des besoins de renforcement du réseau terrestre, au même titre que d'autres sources d'énergie électrique, générant des coûts et des délais supplémentaires. Le délai de mise en œuvre d'un renforcement structurant du réseau est généralement d'environ 10 à 12 ans.

Ce qu'en pense Surfrider

Surfrider encourage à rendre plus **transparentes** les contraintes techniques notamment en termes d'atterrissage. Au-delà de ces contraintes techniques, Surfrider regrette que les **enjeux environnementaux** n'apparaissent pas plus clairement dans les choix d'implantation de l'éolien en mer.

Questions à poser

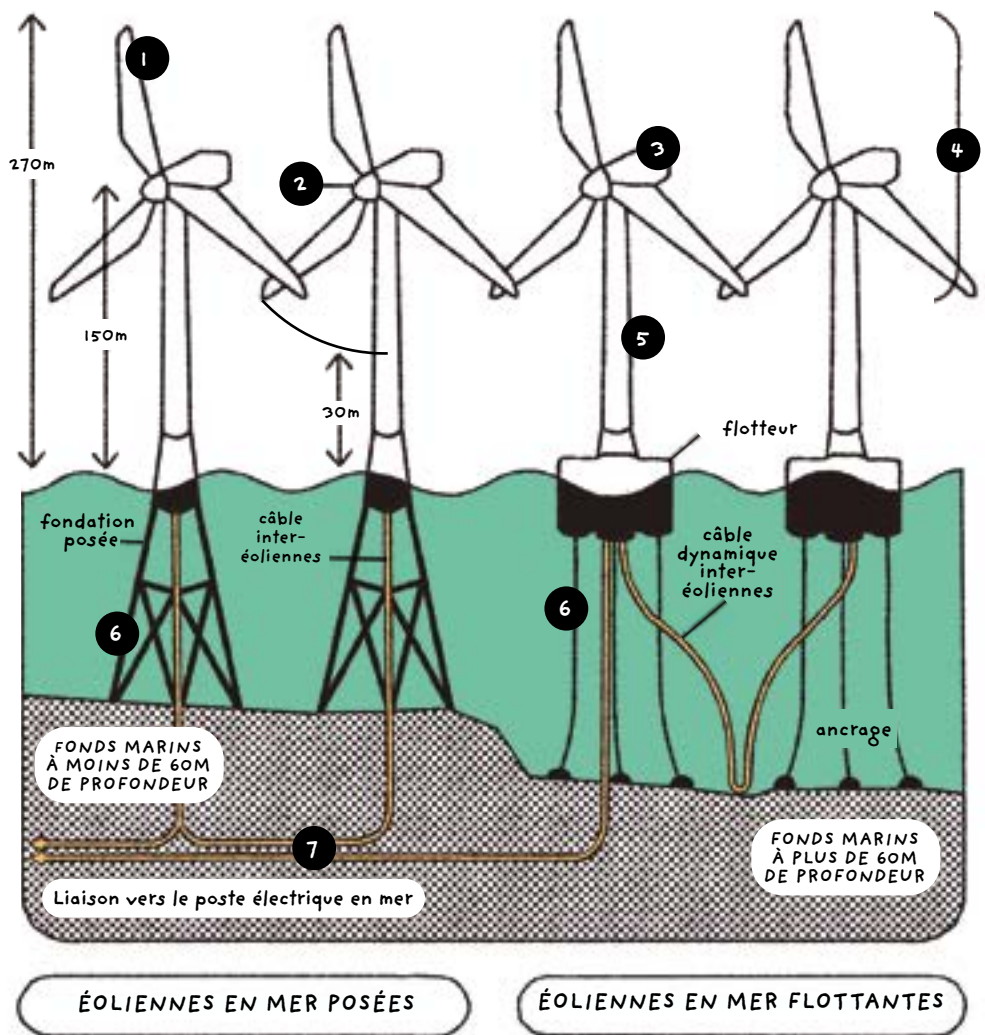
- Quels ont été les enjeux techniques limitants pour le choix d'implantation ?
- Quelles pourraient être les autres options ?

DESCRIPTION TECHNIQUE D'UN PARC ÉOLIEN

Faits & informations

DESCRIPTION D'UNE ÉOLIENNE

- 1 LA PALE**
Sa forme profilée lui permet de capter un maximum de vent pour faire tourner le rotor.
- 2 LE MOYEU**
Il permet de fixer les pales.
- 3 LA NACELLE**
Elle contient la génératrice, c'est ici que l'électricité est produite.
- 4 LE ROTOR**
Composé des pales et du moyeu, il est la partie tournante de l'éolienne. Il permet la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, qui sera transmise ensuite à la génératrice.
- 5 LE MÂT**
Il supporte la nacelle et les pales. Il abrite également des éléments électriques importants.
- 6 LA FONDATION / LE SYSTÈME D'ANCRAGE**
Elle fixe l'ensemble de la structure au fond marin. Pour les éoliennes flottantes, ce sont le flotteur et le système d'ancrage qui remplissent ce rôle.
- 7 LES CÂBLES ÉLECTRIQUES**
Les câbles servent soit à relier les éoliennes entre elles, soit à assurer le raccordement vers le poste électrique en mer.



d'après Vestas

PARC ÉOLIEN

Un parc éolien est composé de l'ensemble des éoliennes (posées ou flottantes, CF. FICHES N°4 ET 5), et des éléments de raccordement (CF. FICHE N°6) : les câbles inter-éoliennes, la plateforme électrique en mer, le câble de raccordement, le système électrique terrestre ainsi que la base de maintenance.

DISPOSITION

Une fois un projet de parc validé (CF. FICHE N°1), le parc éolien doit être conçu en fonction de différents paramètres **environnementaux, d'optimisation énergétique, paysagers et de cohabitation d'usages** : cela va influencer l'agencement des éoliennes. Un parc

de 1GW avec des éoliennes de 16 MW, est composé de 62 éoliennes sur une surface de 150 à 200 km² carré environ, qui peut être réduite pour augmenter la densité énergétique (le nombre de MW installés au km²). L'emprise réelle des éoliennes et des câbles est d'environ 2% de cette surface.

BALISAGE ET SIGNALISATION

Les parcs éoliens doivent également respecter la réglementation en termes de **visibilité** et de **signalisation**.

Ainsi, la partie émergée des fondations est peinte en jaune, le reste de l'éolienne est d'un gris réglementaire, les extrémités des pâles sont peintes en rouge, et un anneau rouge est également présent sur le mât.

En plus de ce **marquage**, un **balisage lumineux** rend les éoliennes visibles par les navires (un feu à l'interface entre les fondations et le mât) et par les avions (un éclairage blanc le jour et rouge la nuit au niveau de la nacelle). Le balisage lumineux est plus intense pour les éoliennes en bordure de parc que pour celles au centre. Des balises maritimes sont également présentes autour du parc.

CYCLE DE VIE DU PARC

CONSTRUCTION

C'est d'abord le **système électrique** (les câbles et le poste en mer) qui est mis en place, puis les éoliennes. Les différents éléments sont construits à terre dans des usines différentes.

En France, il y a des usines pour la fabrication de nacelles et de pâles. Pour les **éoliennes posées**, les fondations (fabriquées en trois tronçons distincts) sont pré-assemblées dans les ports, puis transportées sur le lieu d'implantation.

Cela nécessite des navires auto-élévateurs équipés de grues spécifiques, car les fondations gravitaires par exemple pèsent plus de 3000 tonnes chacune. Une éolienne posée est installée en 24h environ. Pour les **éoliennes flottantes**, les différentes parties de l'éolienne sont assemblées sur le flotteur à terre, dans les ports. L'ensemble est remorqué sur le lieu d'implantation, après avoir installé les ancres et lignes d'ancrage.

Une fois l'éolienne (posée ou flottante) installée sur site, les câbles inter-éoliennes sont connectés, et la mise en service du parc et du raccordement peut avoir lieu. La durée totale des travaux est de 3 à 6 ans.

MAINTENANCE

Elle est assurée depuis la base de maintenance, située en général à proximité du parc. Elle a lieu en **bateau** ou en **hélicoptère** selon la nature des opérations.

DÉMANTÈLEMENT

Réglementairement, il doit être prévu dès la conception du parc éolien, notamment budgétairement : cela se fait à la **charge du développeur**. Le développeur et RTE doivent réaliser, deux ans avant la fin du terme, des études techniques et environnementales pour identifier les conditions du démantèlement.

Ce qu'en pense Surfrider

Surfrider soutient un éloignement raisonnable des parcs par rapport à la côte (au moins 20km, 12milles nautiques) pour éviter des zones à haute valeur écologique **sans être trop au large** notamment pour limiter l'impact des travaux, de maintenance et de raccordement et les besoins en matériaux et probablement sur les mammifères marins.

Surfrider encourage à **recourir aux flottes déjà existantes** pour la construction et la maintenance des parcs éoliens. Si de nouveaux navires doivent être construits, Surfrider demande qu'ils soient compatibles avec les carburants alternatifs synthétiques (e-méthanol, e-ammoniac) pour qu'ils soient prêts lorsque les carburants de synthèse seront disponibles. Surfrider demande l'électrification des navires, et le cas échéant, qu'il lui soit permis d'utiliser l'électricité renouvelable produite dans le parc éolien.

Surfrider demande à **anticiper dès à présent le démantèlement** du parc éolien, pas seulement d'un point de vue financier mais en se demandant s'il sera pertinent de laisser les structures en mer – **à condition qu'elles soient gérées** : les espèces et habitats vont fortement changer entre le début des travaux et la fin de l'exploitation. Le changement climatique provoquant lui aussi des modifications conséquentes sur les écosystèmes marins, l'état écologique de référence entre le début des travaux et la fin d'exploitation du parc est complètement différent.

Questions à poser

- Prévoyez-vous de construire des navires ? Fonctionneront-ils avec des moyens de propulsion décarbonés ?
- Qu'anticipez-vous pour le démantèlement, au-delà des obligations réglementaires ? Avez-vous pensé à anticiper les effets du changement climatique sur l'évolution des espèces présentes, et d'en déduire des mesures de gestion de votre parc ?
- Quelles sont les descriptions techniques des éoliennes ? Pourquoi avez-vous fait ces choix là ?

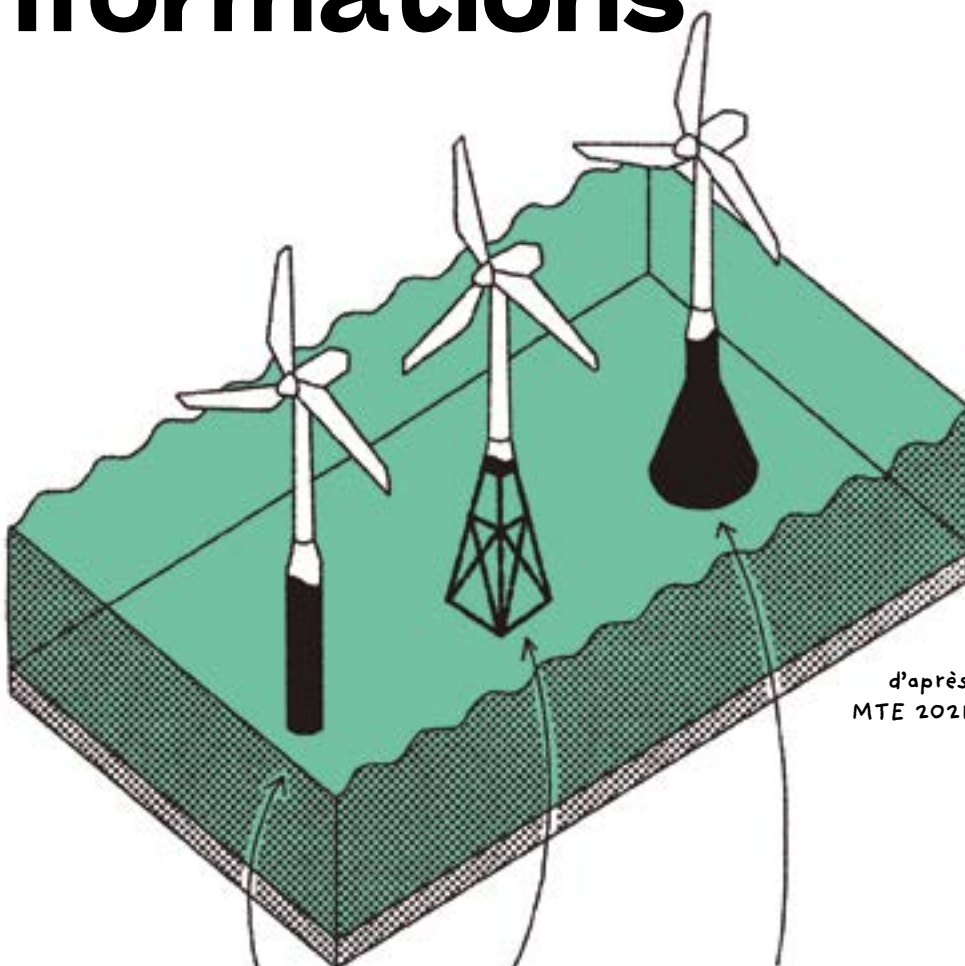
Faits & informations

L'éolien posé est la technologie la plus mature* pour l'éolien en mer et les énergies marines renouvelables de manière générale : le premier parc éolien en mer a été construit au Danemark, en 1991, et comptabilisait 11 éoliennes de 450 kW chacune. Il a été démantelé en 2017. Aujourd'hui, une éolienne peut avoir une puissance de 16 MW à elle seule pour une hauteur de 250 m^{1,2}. A travers le monde, plus de 75 GW sont installés fin 2023³. A l'échelle mondiale, la Chine a la plus grande puissance éolienne installée, suivie de l'Angleterre, puis de la Belgique.

Le mât de l'éolienne est directement posé sur le fond marin. Plusieurs types de fondations existent. Elles dépendent du type de sol, ne nécessitent pas les mêmes matériaux, ni les mêmes moyens d'installation⁴.

La technologie posée nécessite d'avoir des **fonds peu profonds** : 60m maximum. C'est pourquoi elle est très répandue en Mer du Nord, qui est peu profonde, et y a été très vite développée. Elle est technologiquement plus facile à installer et coûte moins cher que l'éolien flottant. **L'assemblage** des différents éléments d'une éolienne posée (fondation, mât, nacelle, pâles) a lieu en mer, à l'aide d'un navire auto-élévateur et des grues spécifiques.

La présence des fondations en mer **modifie localement** le milieu et les habitats, et provoque un effet récif*
(**CF FICHE N°4**)



d'après
MTE 2021

FONDATION	MONOPIEU	JACKET	GRAVITAIRE
DESCRIPTION	Pieu métallique enfoncé dans le sol marin	Treillis métallique fixé sur le fond marin	Large structure en béton ou acier posée sur le fond marin
SOL	Sable ou argile	Caillouteux	Lit de graviers
MATÉRIAUX PRINCIPAL	acier	acier	béton
INSTALLATION	Vibrofonçage (ou battage) des pieux de 10m de diamètre (13 MW)	Fixé au sol par des pieux de 2.5m de diamètre (13 MW)	Posé sur le sol après aplanissement : diamètre au sol 30m pour une puissance de 7 MW
PARCS FRANÇAIS	Calvados, Saint-Nazaire, Yeu-Noirmoutier	Saint-Brieuc, Dieppe Le Tréport	Fécamp

BILAN CARBONE

ÉOLIEN POSÉ⁵⁻⁷

57%

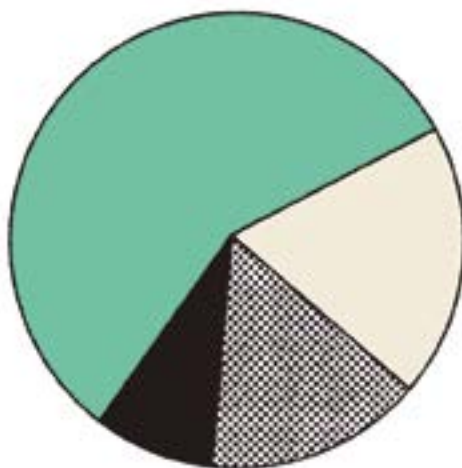
MATIÈRES PREMIÈRES

(extraction de la matière première, transport vers le lieu de production, production du matériau)

8%

EXPLOITATION ET MAINTENANCE

(consommation de carburant)



19%

DÉVELOPPEMENT ET INSTALLATION DU PARC

(études environnementales, énergie consommée pour l'acheminement et l'installation)

16%

DÉMANTÈLEMENT

(destruction des équipements, transport des matériaux, valorisation et recyclage)

Entre **14 et 18 gCO₂eq/ kWh** produit (en moyenne sur les 6 premiers parcs posés français)

Temps de retour énergétique entre **4 et 6 ans** par rapport au mix électrique français

En comparaison en 2023, le mix électrique européen émet 250gCO₂eq/kWh, le mix électrique français 56 gCO₂eq/kWh, une centrale à gaz 406gCO₂eq/kWh, et une centrale à charbon 1038gCO₂eq/kWh⁸.

Ce qu'en pense Surfrider

Surfrider reconnaît que les technologies posées sont intéressantes pour les fonds peu profonds, qu'elles sont suffisamment matures technologiquement pour être installées dès maintenant, et qu'en ce sens, cela constitue en 2024 la meilleure stratégie pour le **développement à court terme** de l'éolien en mer en France et en Europe.

Les fondations des éoliennes induisent une **modification conséquente du milieu marin**, de ses habitats, des

espèces présentes, et des fonctionnalités qu'elles remplissent. Surfrider considère que cela peut être un atout dans des zones déjà détériorées par d'autres activités humaines, à condition de travailler sur **l'écoconception des fondations** de façon à créer de véritables récifs artificiels gérés et suivis, favorisant les espèces endémiques, et prenant en compte les effets du changement climatique. Cette écoconception visant à avoir un effet récif positif, voire à provoquer l'effet réserve si la

pêche est interdite, nécessite de se demander dès la conception ce qu'il adviendra de ces structures à la fin de l'exploitation du parc : il peut être envisageable de les laisser tant qu'elles restent gérées comme des récifs artificiels.

Cependant, Surfrider **favorise la technologie flottante** de manière générale, notamment car elle a des impacts moindres sur les fonds marins (**CF. FICHE N°5**).

Questions à poser

- Comment vont être conçues les fondations ? Y a-t-il une écoconception prévue ? Pour quelles espèces ? Avec quelle anticipation du changement climatique ?
- Un suivi et une gestion sur le long terme de l'effet récif est-il prévu ?
- Comment justifiez-vous le choix des fondations ?
- Quelle sera la quantité de matériaux utilisés ?

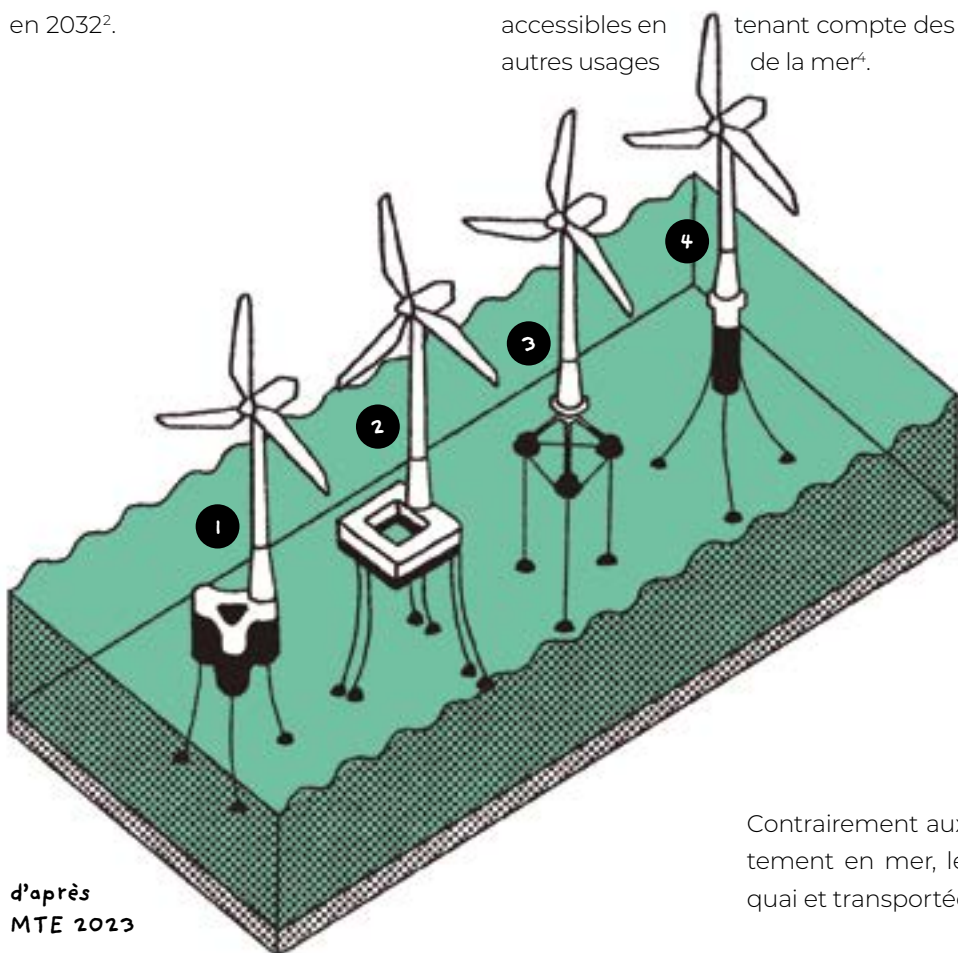
L'ÉOLIEN EN MER FLOTTANT

Faits & informations

L'éolien flottant est techniquement moins mature* que l'éolien posé. La première éolienne flottante a été installée en 2009 en Norvège. Le succès de ce site pilote a permis la construction du premier parc flottant en Ecosse¹, en 2017, avec 5 éoliennes sur une surface de 4 km². En 2024, les parcs considérés comme commerciaux n'excèdent pas les quelques dizaines de MW de puissance installée, bien loin derrière les parcs posés. L'Ecosse reste le pays le plus avancé au monde en ayant pour objectif d'avoir 20 parcs d'éolien flottant en fonctionnement pour une puissance installée totale de 17,8 GW en 2032².

En Europe et dans le monde, plusieurs **démonstrateurs** (une éolienne) ou **parcs pilotes** (quelques éoliennes) existent : ils servent à tester ou affiner certains aspects techniques et à recueillir de la donnée de terrain sur les impacts environnementaux. On en trouve en France, en Ecosse, en Norvège, au Portugal, en Espagne au Japon et aux Etats-Unis. En France en 2024, un démonstrateur est installé sur un site d'essai qui se situe au large du Croisic depuis 2018³ et trois parcs pilotes sont en développement en Méditerranée. Selon l'Ademe, le potentiel de l'éolien flottant en France serait de 155 GW, dont 33 GW facilement accessibles en tenant compte des autres usages de la mer⁴.

Les éoliennes flottantes sont maintenues sur les fonds marins par des **lignes d'ancrage**. Plusieurs technologies d'ancrage existent : ancres ou pieux, qui eux peuvent être forés, battus ou gravitaires. Les flotteurs varient en forme et en profondeur immergée selon la façon dont la structure doit être stabilisée. Enfin, les **câbles** qui relient le flotteur aux ancres peuvent être soit tendus, soit libres (auquel cas ils résistent seulement à la dérive⁵). La partie immergée des flotteurs sera de quelques mètres à quelques dizaines de mètres de hauteur, et trois des quatre principales technologies sont testées en France sur les sites pilotes de Méditerranée.



- 1 **LA PLATEFORME SEMI-SUBMERSIBLE**
les volumes immergés du flotteur garantissent sa stabilité.
Les lignes d'ancrage sont libres
- 2 **LA BARGE**
le flotteur est stabilisé grâce à l'ouverture au centre. Les lignes d'ancrage sont libres
- 3 **LA PLATEFORME AVEC ANCRAGE À LIGNES TENDUES**
les lignes d'ancrage tirent la structure vers le fond
- 4 **LA BOUÉE ÉQUIPÉE D'UN FLOTTEUR DE TYPE CRAYON**
le flotteur est immergé sur une grande hauteur. Ce n'est possible que sur des fonds profonds et n'a été testé qu'en Norvège.

Contrairement aux éoliennes posées qui s'assemblent directement en mer, les éoliennes flottantes sont assemblées à quai et transportées déjà montées.

AVANTAGES PAR RAPPORT À L'ÉOLIEN POSÉ

L'éolien flottant présente plusieurs avantages notamment par rapport à l'éolien posé, tant du point de vue technique que de l'impact environnemental. Il offre une plus grande **flexibilité** d'installation car il peut être installé sur des fonds plus profonds et plus accidentés que l'éolien posé. Il permet d'accéder à des **vents plus forts** et plus constants car il peut aisément être éloigné des côtes. Le pré-assemblage à terre facilite l'installation en mer. Enfin, l'éolien flottant provoque **moins de perturbations des fonds** marins lors de l'installation, car les structures flottantes ne sont pas directement ancrées dans le sol et que les ancrages sont de taille plus réduite que les fondations de l'éolien posé (cf. FICHE N°4). L'éolien flottant en étant **plus éloigné** évite les zones côtières à haute valeur écologique, réduit l'impact paysager et les conflits d'usage avec les activités côtières (pêche, plaisance, tourisme,...).

INCONVÉNIENTS PAR RAPPORT À L'ÉOLIEN POSÉ

L'éolien flottant en 2024, reste **cher** car il est peu développé et la filière n'a pas assez de visibilité pour passer à l'étape d'industrialisation. Il ne bénéficie pas du retour d'expérience de l'éolien posé, notamment en termes d'impacts environnementaux. Les principaux inconvénients sont **techniques** (maintenance plus compliquée car les infrastructures sont moins accessibles), **économiques** (coûts d'investissement très élevés) et **environnementaux**. Les impacts environnementaux propres à l'éolien flottant concernent les câbles d'ancrage (ragage des fonds marins, risque d'enchevêtrement des mammifères marins), les câbles électriques sous-marins des éoliennes qui sont dynamiques, et les câbles de raccordement qui doivent couvrir des distances plus importantes. L'assemblage à terre de ces éoliennes nécessite des **infrastructures portuaires spécifiques** pour pouvoir accueillir du matériel plus lourd que pour les éoliennes posées, ou que pour tout autre type d'infrastructure maritime.

BILAN CARBONE

Le bilan carbone des parcs éoliens flottants est estimé à 42g CO₂eq/kWh (moyenne sur plusieurs parcs pilotes européens). Les flotteurs semblent être une source importante de ces émissions, avec peu de variation selon la technologie. A l'inverse, le système d'ancrage et les câbles électriques présentent une grande variabilité, selon la technologie et la profondeur d'ancrage⁶. Les opérations d'installation et de démantèlement seraient moins consommatrices en énergie que l'éolien posé⁷.

Ce qu'en pense Surfrider

Surfrider privilégie l'éolien flottant par rapport au posé, avec les précautions qui s'imposent : attendre le **retour d'expérience** des fermes pilotes en termes d'impacts environnementaux pour mieux comprendre les mesures environnementales à instaurer, et la compatibilité de cette technologie avec les enjeux écologiques des aires marines protégées de Méditerranée, et **anticiper l'adaptation des ports**, sans détériorer l'environnement littoral à proximité.

Surfrider attire l'attention sur la fin de vie des éoliennes et **l'écoconception des flotteurs** : si la question de laisser des pieux d'éolienne écoconçus en place peut se poser, cela semble peu souhaitable pour les flotteurs d'éoliennes qui seront plus difficilement gérés car plus éloignés.

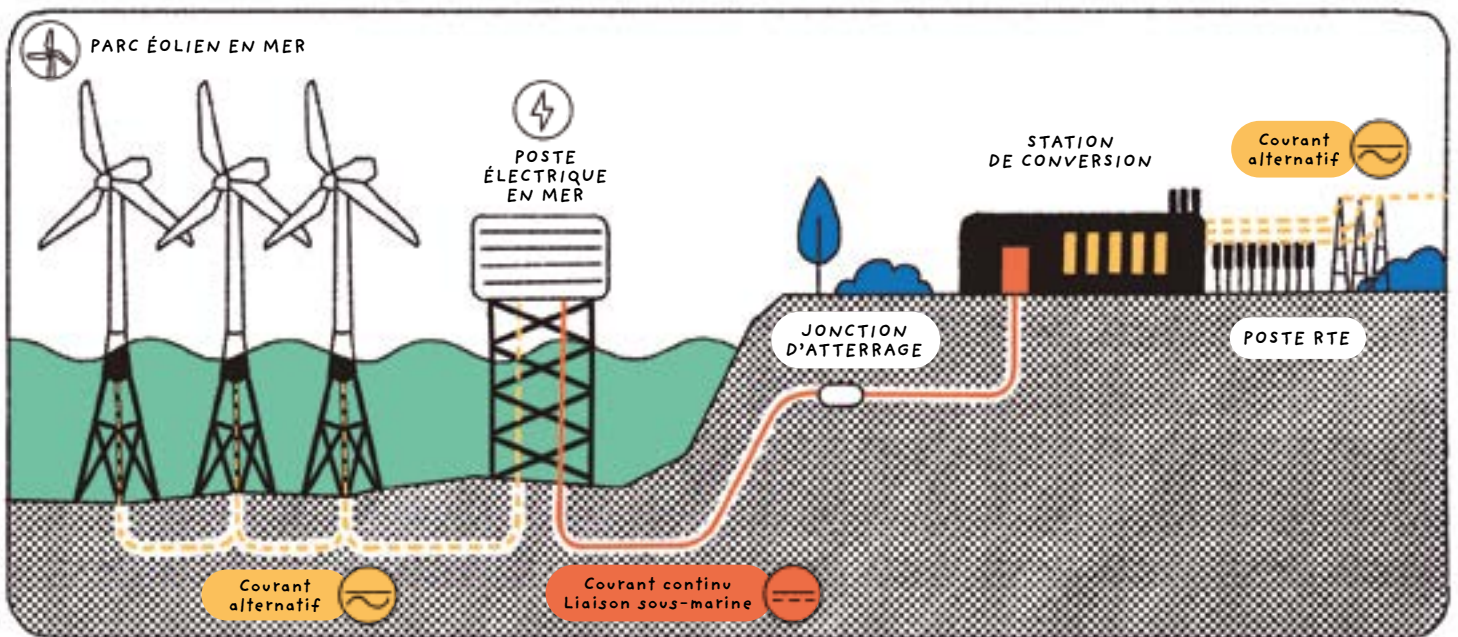
Surfrider Considère que l'éolien flottant ne doit pas être un **prétexte** pour trop éloigner les parcs éoliens des côtes. S'il est nécessaire de ne pas être proche de la bande côtière pour éviter les couloirs de migration des oiseaux notamment, trop éloigner les parcs éoliens revient à occuper un espace pour l'instant « vide » et donc de relative tranquillité, et demande aussi beaucoup plus de ressources en termes de matériaux et de maintenance, ce que diminue l'intérêt écologique du parc.

Questions à poser

- Comment vont être conçus : les ancrages, les câbles d'ancrage, les flotteurs, les câbles électriques interéoliennes (en eau ou enterrés) et le raccordement ? Comment justifiez-vous ces choix ? Quelle sera la quantité de matériaux utilisés ?
- Y a-t-il des mesures d'écoconception prévues ? lesquelles ? (sur le design des flotteurs, pour éviter le biofouling.. ?)
- Quelle sont les modalités de la maintenance (fréquence des navires, intervention d'hélicoptère, etc.)

RACCORDEMENT ET CÂBLES SOUS-MARINS

Faits & informations



d'après RTE

Chaque éolienne a son propre **câble électrique** et génère du **courant alternatif***. C'est le **développeur*** qui en est responsable. Tous ces câbles se rejoignent au niveau du **poste électrique en mer**, qui permet d'élever la tension de ces câbles, et qui transforme le courant alternatif des éoliennes en **courant continu***, si la puissance (au moins 1 GW) et la longueur totale de raccordement (au moins 80 km en marin+ en terrestre) le nécessitent. C'est le cas depuis l'appel d'offre d'Oléron (2021), où les parcs sont plus puissants et plus éloignés des côtes que les premiers parcs français. L'électricité peut ainsi être transportée depuis ce poste jusqu'à la côte par un nombre réduit de câbles sous-marins. Si le courant est continu, il passe par une **station de conversion** terrestre pour être à nouveau transformé en courant alternatif, utilisé sur le réseau terrestre national, avant d'être raccordé à un poste électrique terrestre. La puissance des câbles est dimensionnée selon la puissance du parc éolien.

Depuis le parc de Dunkerque (mise en fonctionnement attendue en 2028), ce n'est plus le développeur mais RTE qui développe, installe et gère ce poste en mer.

TRAVAUX ET ATERRAGE

En mer, un **navire câblé** installe et protège le câble. Celui-ci est généralement ensouillé : une tranchée est creusée sur quelques mètres de profondeur, puis le câble y est enfoui. Pour les fonds rocheux, cela n'est pas possible : le câble est alors posé et protégé par des enrochements ou des matelas de béton.

Le lien entre les ouvrages en mer et sur terre s'appelle **l'atterrage**, qui peut être réalisé sur différents types de zones sur la côte (plage, port, parking...). Une jonction y est réalisée entre les câbles sous-marins et les câbles souterrains, dans **une chambre de jonction d'atterrage**. Celle-ci est généralement enfouie et recouverte d'une dalle en béton armé puis remblayée. Plusieurs techniques d'atterrage existent et vont dépendre du milieu littoral, de la nature des sols, de la présence et de la nature d'obstacles à franchir : tranchée, forage dirigé, microtunnel, ou Direct-Pipe®. Les trois dernières sont des passages en sous-cœuvre : elles permettent de passer sous les dunes ou les cours d'eau par exemple.

Pour la suite du trajet terrestre, le câble est sous-terrain jusqu'au poste de raccordement existant.

IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DES CÂBLES SOUS-MARINS

Les câbles sous-marins peuvent engendrer différents types d'impact :

PHASE DE CONSTRUCTION / AMÉNAGEMENT :

- **Remaniement de sédiments** : lors des travaux d'installation des câbles principalement (le ragage des câbles est anecdotique car les câbles sont stabilisés). Il y a un risque de remise en suspension de polluants si les sédiments en contiennent : les zones polluées doivent donc être évitées dans la définition du tracé du câble.
- **Destruction locale** des fonds et modification durable de leur nature lors de la mise en œuvre d'enrochement (surface réduite).

PHASE EXPLOITATION :

- **Effet récif*** : colonisation par des organismes de toute structure immergée. Ces organismes peuvent être envahissants ou **endémiques***. Une écoconception des enrochements peut permettre de cibler l'installation de certaines espèces.
- **Émission de chaleur** : la circulation de courant électrique provoque l'échauffement des matériaux. Cette chaleur est vite dissipée dans l'eau. Si le câble est enfoui, il y a un échauffement anecdotique du sédiment à proximité.
- **Émission de champs électromagnétiques directs et induits** : localisés autour des câbles (entre 1 et 5m généralement), ils sembleraient avoir peu d'impact (cf. fiche dédiée).

Si aujourd'hui les postes électriques sont en technologie posée, c'est-à-dire avec des fondations fixées au sol, des développements sont en cours pour permettre à l'avenir l'installation de **postes flottants**, qui reposeraient sur des flotteurs et seraient reliés au fond marin par des lignes d'ancrage. Ils nécessiteront un câble dynamique de grande puissance entre le poste et le fond marin, qui pourra présenter de nouveaux impacts potentiels.

Le risque d'enchevêtrement indirect lié aux **macrodéchets** (principalement des filets de pêches) pris dans les câbles est plus probable mais reste faible également. Les champs électromagnétiques directs et indirects générés par ces câbles dynamiques seront présents dans l'ensemble de la **colonne d'eau**, et plus seulement au niveau du fond marin. Sur la base des retours d'expérience ces champs auront une incidence circonscrite à moins de 5m autour du câble.



Ce qu'en pense Surfrider

Surfrider encourage la **mutualisation** des postes électriques en mer, c'est-à-dire l'installation d'un poste pouvant connecter plusieurs parcs pour limiter le nombre d'infrastructures et les travaux.

Surfrider encourage également d'avoir **des postes électriques écoconçus et multi-usages**, qui proposent des services à la collectivité tels que l'installation d'équipements permettant l'acquisition de connaissances sur l'environnement et qui permettent de favoriser un effet récif pour les espèces locales.

Pour les ouvrages d'atterrissage, Surfrider recommande de prendre en compte **l'évolution du trait de côte** à horizon 2100 pour localiser les chambres d'atterrissage. Les forages dirigés et micro-tunnels sont à privilégier.

Surfrider demande que les raccordements se fassent sur des zones déjà **anthropisées**.

Questions à poser

- Quelle technologie d'atterrissage allez-vous utiliser ?
- Ou va se situer la chambre d'atterrissage ? Est-ce une zone anthropisée ?
- Comment êtes-vous accompagnés par des experts tels que le CEREMA ou le BRGM pour anticiper le recul du trait de côte et prendre en compte les mouvement hydrosédimentaires locaux ?

MATÉRIAUX ET RECYCLABILITÉ

Faits & informations

MATÉRIAUX ET MATIÈRES PREMIÈRES

L'**empreinte carbone** des parcs éoliens vient principalement des matières premières (cf. FICHE N°5). Parmi celles-ci, les plus impactantes du point de vue émission carbone sont les matériaux communs.

Un **parc éolien posé** est en effet principalement constitué d'**acier** pour les fondations monopieux et jacket, et également de **béton** et de gravât pour les fondations gravitaires¹. L'acier est un mélange de fer, de charbon et de chrome. Il peut être produit par recyclage de ferraille, ou à partir de charbon métallurgique et de minerai de fer (production 5x plus émettrice de GES). Le béton lui est produit à partir de sable, de gravillons, de ciment et d'eau.

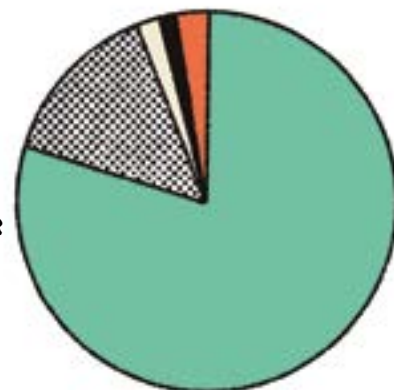
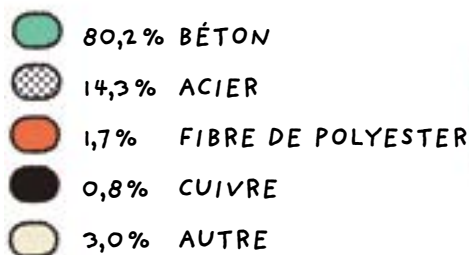
Pour l'**éolien flottant**, la composition du mât est la même (acier principalement), le système d'ancrage est composé d'ancres en acier, de bouées en mousse (polyuréthane), de lignes d'ancrage en polyester et de chaînes en acier. Les flotteurs sont en béton léger et constituent l'essentiel du poids de l'éolienne.

À titre de comparaison, en France, la production annuelle de béton est de 180 millions de tonnes, la consommation annuelle d'acier est de 15 millions de tonnes³, et la consommation annuelle de cuivre de l'ordre de 0,2 millions de tonnes⁴.

MATÉRIAUX UTILISÉS POUR L'ÉOLIEN POSÉ

	FÉCAMP (gravitaire)	SAINT-NAZAIRE (monopieux)
	83 éoliennes de 6 MW, 498 MW installés	80 éoliennes de 6 MW, 480 MW installés
MATÉRIAUX	TOTAL (TONNES)	TOTAL (TONNES)
ACIER	125 049	160 525
CUIVRE	1 700	1 670
ALUMINIUM	3 717	3 317
FIBRE DE VERRE	8 092	7 800
BÉTON	539 500	-
GRAVÂT	810 080	-
CIMENT	33	4 946

MATÉRIAUX UTILISÉS POUR L'ÉOLIEN FLOTTANT



Les pâles sont en **composite thermodurcissable** : c'est un ensemble de fibres de verre ou de carbone enveloppées dans une résine époxy ou polyester (un matériau synthétique)⁵.

À ces matériaux communs des parcs éoliens il faut ajouter les matériaux du **raccordement électrique** : cuivre ou aluminium, et gaine en polyéthylène, ainsi que les matériaux nécessaires

pour les aimants permanents. Ils fonctionnent avec des terres rares, notamment avec du néodyme ou du samarium. Il faut compter en moyenne 170 kg de Néodyme par MW installés⁶, donc 85 tonnes dans le cas d'un parc de 500MW. Si les Terres rares ne sont pas rares, elles sont extraites à 95% par la Chine, et posent des questions de **dépendance géopolitique**.

Globalement, l'augmentation de la puissance des turbines et les évolutions technologiques permettent d'utiliser de **moins en moins** de matériaux par MW installé⁷.

MATÉRIAUX CRITIQUES

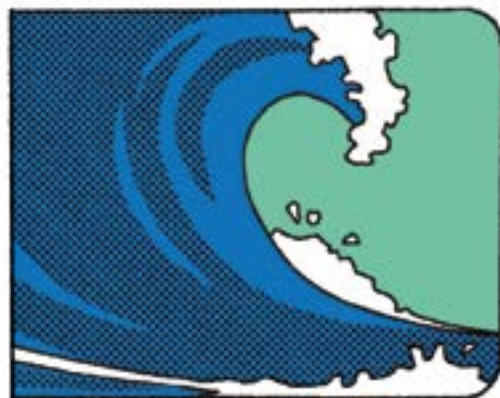
Ce sont des matériaux (notamment des métaux) pour lesquels il y a des enjeux forts d'approvisionnement et d'importance économique. Le **cuivre** et le zinc (d'environ 2600 tonnes pour un parc de 500MW⁴), qui protège les éoliennes de la corrosion, en font partie.

RECYCLABILITÉ ET FIN DE VIE DES MATÉRIAUX

En France, la **réglementation** encadre le démantèlement et la gestion des déchets issus des parcs éoliens offshore, via le code de l'environnement et des réglementations européennes.

COMPOSANT	MATÉRIAUX UTILISÉS	RECYCLABILITÉ
PALES ET ROTOR	Fibres de verre, carbone, résines époxy	La recyclabilité ou réutilisation des matériaux composites des pâles et des terres rares sont encore des sujets de recherche et développement, tant au niveau de nouveaux matériaux que de nouveaux procédés.
MÂT	Acier	Hautement recyclable (90%+). Le taux de ferraille recyclé dans l'acier est de 52,8% en moyenne à l'échelle nationale ⁸ .
FONDATIONS	Acier, béton De nouvelles conceptions pour les fondations et les flotteurs sont en cours pour réduire la quantité d'acier nécessaire, sans modifier sa recyclabilité	Acier recyclable Le béton peut être concassé ou broyé pour former de nouveaux éléments de construction ou des routes.
CÂBLES SOUS-MARINS	Cuivre, aluminium, polymères isolants	Métaux recyclables (demande mondiale de cuivre aujourd'hui satisfaite à 33% par du cuivre recyclé), polymères encore complexes à recycler

Des arrêtés ministériels en France imposent le **recyclage et le réemploi** des matériaux des éoliennes : depuis 2024, 95% de la masse totale du parc doit être réutilisable ou recyclable, et à partir de 2025, 55% de la masse des rotors devra également être recyclable ou réutilisable, contre 35% en 2022⁹.



Ce qu'en pense Surfrider

Surfrider reconnaît l'impact environnemental des matériaux utilisés (non limité à leur empreinte carbone) et la criticité de l'approvisionnement. Si ces impacts sont à considérer et à relativiser à l'ensemble des besoins du pays et de l'Europe, il faut surtout faire preuve de **sobriété** pour limiter le recours aux matériaux, privilégier les technologies les moins demandeuses en matières premières, et ne pas installer les parcs éoliens trop loin des côtes pour **limiter les besoins en matériaux**.

Les bilans carbone devraient prendre **en compte la construction de navires** spécifiques aux parcs éoliens, et la **construction d'infrastructures portuaires**, indissociables de ces projets et pourtant non comptabilisés aujourd'hui.

Comme pour tout déchet, Surfrider privilégie la **réutilisation** des matériaux par rapport au recyclage, et recommande de ne recourir à ce dernier qu'en l'absence d'alternative durable.

Questions à poser

- Quel est l'impact carbone du projet dans son ensemble (navire et infrastructures) ?
- Quels pourcentages de matériaux utilisés sont recyclés ou réutilisés ?
- Quelle dépendance aux autres pays l'utilisation des matériaux provoque-t-elle ?

ÉTUDES ENVIRONNEMENTALES

Faits & informations

Les projets de parcs éoliens offshore sont des projets soumis à **évaluation environnementale** : une **étude d'impact** doit être réalisée. Dans le cas des parcs éoliens, il y a deux études d'impact : l'une pour le parc en tant que tel (à la charge du développeur), l'autre pour le poste électrique en mer et le raccordement (à la charge de RTE). Cependant, chacune des études doit prendre en compte les incidences de l'autre.

Une étude d'impact est un **document réglementaire** qui permet aux autorités et au Conseil National pour la Protection de la Nature de rendre un avis sur le projet (cf **FICHE N°1**). C'est aussi un document de référence pour la maîtrise d'ouvrage pour concevoir un projet le plus **respectueux de l'environnement** possible. C'est enfin un document de base qui permet au **grand public de s'informer** sur les impacts environnementaux du projet. Un résumé non technique synthétique accompagne l'étude d'impact pour la rendre plus accessible.

L'étude d'impact est divisée en plusieurs parties¹ :

• LA DESCRIPTION DU PROJET

Elle décrit la justification du projet, son lieu d'implantation, les choix techniques, les caractéristiques fixes ou variables. En effet, si certaines caractéristiques sont connues dès l'étude d'impact (elles sont fixes), d'autres seront **déterminées au cours du projet (elles sont variables)**. C'est une spécificité de l'éolien en mer. L'étude d'impact précise les différentes options possibles (fourchette de valeur,

par exemple pour la hauteur de l'éolienne, ou liste des options possibles, par exemple pour les fondations). Si le projet est validé, ces éléments seront repris dans l'acte d'autorisation.

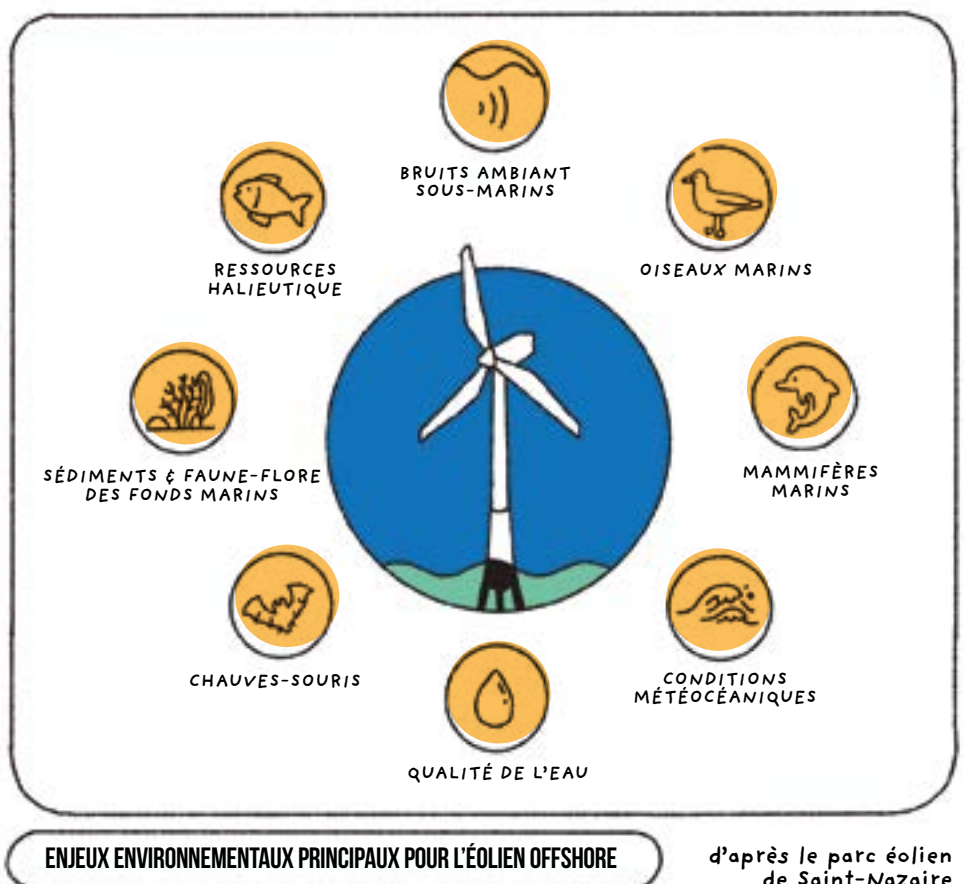
• L'ÉTAT INITIAL

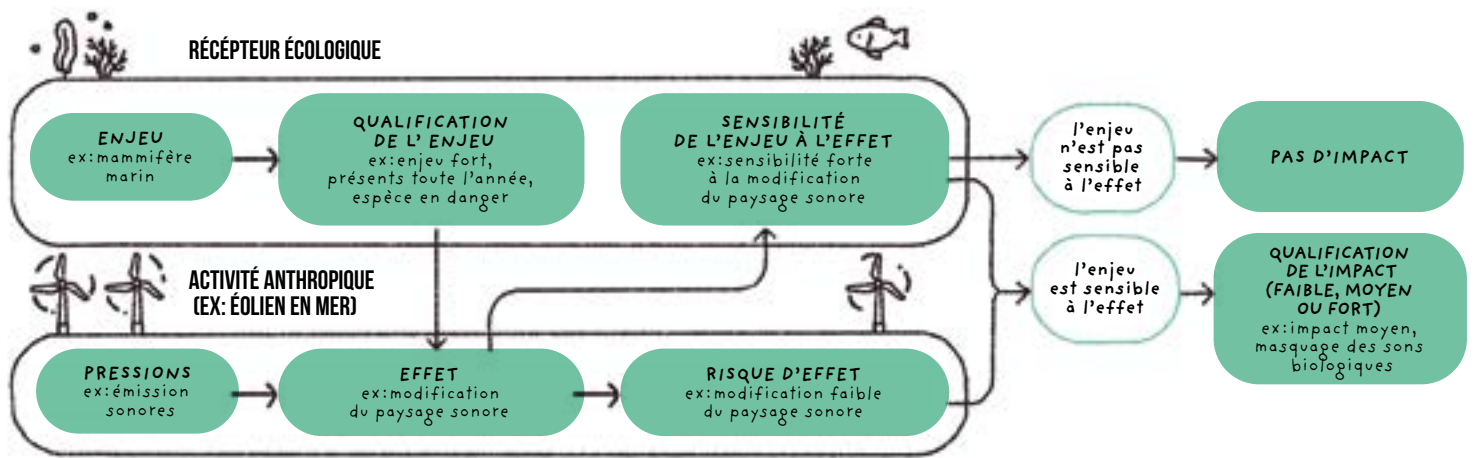
Il identifie les **enjeux** (ce qui reste d'être impacté) et les qualifie selon le niveau de protection ou l'état de conservation de l'espèce, de l'habitat ou du milieu (un enjeu fort ou faible ?). Il identifie également les effets (ou encore les pressions, les impacts potentiels, cf **FICHE N°9**), et la **sensibilité** des enjeux à ces pressions (leur capacité à résister à la pression et à se rétablir après la perturbation). Cette sensibilité peut varier dans le temps et l'espace.

Le code de l'environnement mentionne les enjeux qui doivent être pris en compte :

- 1° La population et la santé humaine ;
- 2° La biodiversité, en accordant une attention particulière aux espèces et aux habitats protégés
- 3° Les terres, le sol, l'eau, l'air et le climat
- 4° Les biens matériels, le patrimoine culturel et le paysage ;
- 5° L'interaction entre tous ces facteurs

Le schéma ci dessous représente les enjeux environnementaux risquant d'être impactés par l'éolien en mer





• L'ÉVALUATION DES IMPACTS

Il s'agit ici de qualifier le risque d'effets, c'est-à-dire d'estimer si cet effet sera fort ou faible. Le croisement entre les risques **d'effets** et les **enjeux** permet d'identifier les incidences, et donc l'**impact** : un effet fort sur un enjeu environnemental faible, donnera un impact moyen (cf schéma ci-dessus).

• LES MESURES D'ÉVITEMENT, DE RÉDUCTION ET DE COMPENSATION (SÉQUENCE ERC)

La loi L.110-1 du code de l'environnement impose aux projets d'avoir un effet nul voire positif sur l'environnement. L'étude d'impact doit donc décrire les mesures d'évitement, de réduction et de compensation mises en place sur toutes les composantes étudiées. Elles doivent **garantir l'absence d'incidence significative sur le milieu marin**

(par exemple suivi des mammifères marins pendant les travaux et mise en œuvre de mesures spécifiques pour les faire fuir de la zone).

• LES MESURES DE SUIVI ET D'ACCOMPAGNEMENT

Les mesures de suivi permettent de **vérifier la bonne application des mesures ERC**, de corriger les prévisions de l'étude d'impact, de consolider les bases de données. Elles sont appliquées avant le démarrage des travaux, pendant les travaux et tout au long de la vie du parc. Les conditions de mise en œuvre, le suivi de leur efficacité et les ajustements nécessaires sont régulièrement revues par un **comité scientifique**. Les mesures d'accompagnement sont facultatives. Elles visent à compléter les mesures de gestion et à soutenir la réalisation effective des recommandations de l'étude.

Ce qu'en pense Surfrider



D'un bureau d'étude à l'autre, la qualité des études d'impact n'est pas la même. Il existe un guide d'harmonisation² mais ce n'est pas suffisant, et **l'avis des scientifiques sur les protocoles proposés est très important.**

Aujourd'hui, l'avis de **l'autorité environnementale** n'est que consultatif. Pour avoir plus de poids, il faudrait qu'il soit conforme, et donc obligatoirement suivi.

Du fait de la complexité du milieu marin et des interactions physiques, chimiques et biologiques, **il n'est pas aujourd'hui possible de mettre en œuvre des mesures de compensation adaptées en milieu maritime**³.

Bien souvent les mesures consistent en de la sensibilisation ou de l'acquisition de connaissances. Il faudrait pousser pour la restauration d'écosystèmes littoraux, même si ça ne compense pas directement l'impact engendré.

Questions à poser

Le plus pertinent est de se baser sur les avis de l'autorité environnementale et du CNPN pour reprendre les points faibles de l'étude d'impact et les questionner auprès du maître d'ouvrage, en accordant une vigilance

sur les mesures d'évitement, de réduction et de compensation, de suivi et sur l'accompagnement par des scientifiques. Même si la MO y a répondu dans son mémoire, il est important de bien comprendre les réponses.

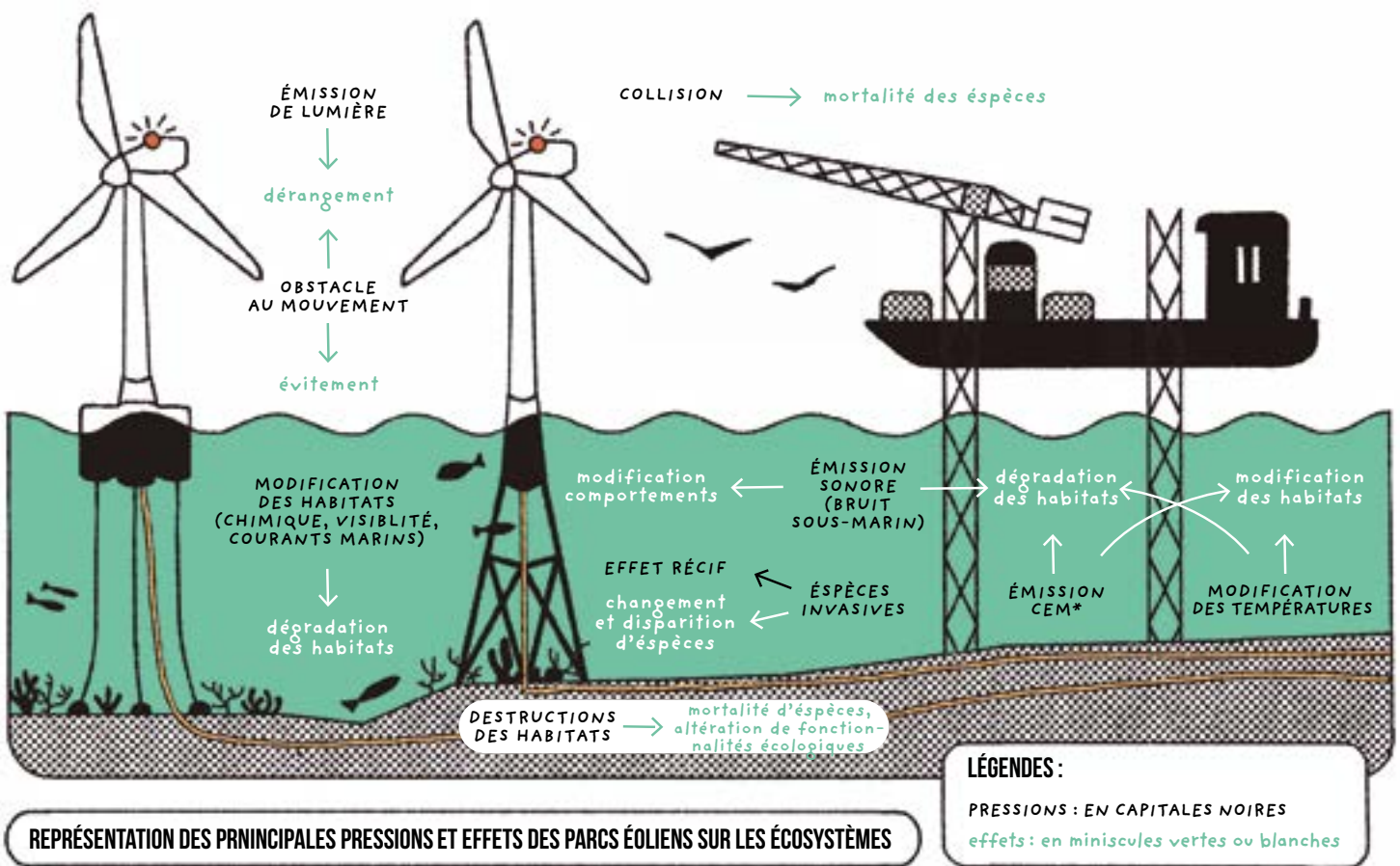
EFFETS ENVIRONNEMENTAUX

Faits & informations

Les parcs éoliens en mer exercent diverses **pressions** sur les écosystèmes marins, engendrant des **effets complexes** sur les espèces, les habitats et les fonctions écologiques. Les impacts de ces installations varient en fonction du type d'éolienne (fixe ou flottante), de la phase de développement du parc (construction, opération ou démantèlement) et des caractéristiques spécifiques du site d'implantation. L'état actuel des connaissances permet de réaliser une évaluation des incidences environnementales (cf **FICHE N°8**), mais

la transposition des retours d'expérience des parcs situés en Mer du Nord à d'autres régions, telles que la Méditerranée, l'Atlantique ou la Manche, n'est pas directe. Il est donc impératif de **poursuivre la recherche** et l'acquisition de données spécifiques pour améliorer la compréhension des impacts dans ces contextes géographiques variés.

Les principales pressions exercées sur le milieu marin sont représentées **EN NOIR ET CAPITALES** sur le schéma :



Le relargage de métaux est une pollution chimique localisée et a priori sans incidence sur les peuplements, liée à la corrosion des structures métalliques, et à la protection mise en œuvre contre cette corrosion



Modification hydrodynamique : les structures, notamment posées, peuvent modifier localement l'écoulement des courants marins



Le bruit sous-marin et les champs électromagnétiques font l'objet de fiches dédiées

*CEM : champs électromagnétique

EFFETS PRINCIPAUX DE CES PRESSIONS

Ces pressions exercent différents effets, en minuscules sur le schéma :

MORTALITÉ D'ESPÈCES ET ALTÉRATION DE FONCTIONNALITÉS ÉCOLOGIQUES

Les infrastructures peuvent entraîner la mortalité directe de certaines espèces, comme les oiseaux en raison de **collisions**, ou les espèces affectées par les nuisances sonores en phase de construction. La destruction d'habitats peut également altérer les fonctionnalités écologiques des habitats concernés (alimentation, reproduction, repos, etc.).

MODIFICATION DU COMPORTEMENT DES ESPÈCES

Plusieurs perturbations (lumière artificielle, le bruit, les champs électromagnétiques, les obstacles physiques, turbidité et modifications des courants) provoquent un **dérangement**, peuvent modifier le comportement des espèces marines, tels que **l'évitement** des zones affectées, en général limité à quelques mètres autour des structures.

CHANGEMENT DES ESPÈCES, MODIFICATION HABITATS

Les infrastructures maritimes sont souvent colonisées par divers organismes (c'est l'effet **récif***). Cette colonisation peut inclure des **espèces exotiques envahissantes**, entraînant des changements dans la composition des espèces présentes et la disparition des espèces originelles. L'impact dépasse l'emprise directe des infrastructures, pouvant transformer un substrat mou (type sableux) en un substrat dur (type rocheux). Selon l'état de conservation du milieu et les espèces, cet effet peut être positif ou négatif. Ces infrastructures peuvent également engendrer un **effet réserve*** du fait de la disparition d'autres pressions (pêche notamment).

DÉGRADATION DES HABITATS

L'élévation de la température, la présence de polluants chimiques, l'augmentation de la turbidité, du bruit et des champs électromagnétiques peuvent entraîner la dégradation des habitats marins à **proximité immédiate** des structures. Ces changements peuvent détériorer les conditions de survie des espèces sans nécessairement altérer leurs comportements.

IMPACTS CUMULÉS

Les effets et impacts précédemment cités sont pour beaucoup localisés et peuvent être pour la plupart restreints et acceptables à l'échelle d'un parc éolien lorsque les mesures d'évitement et de réduction ont été correctement mises en place. Cependant, la question se pose différemment quand il s'agit d'évaluer l'accumulation de ces impacts **entre plusieurs parcs**, et avec les impacts des **autres activités humaines**. En France, un programme d'étude des impacts cumulés est en cours pour mieux comprendre ces interactions.

Ce qu'en pense Surfrider

Surfrider insiste sur la nécessité d'avoir une **approche écosystémique** pour identifier les enjeux, au-delà des espèces, il faut prendre en compte leur fonctionnalité et leur rôle dans l'écosystème, pour voir comment l'ensemble des interactions risque d'être perturbé.

Surfrider demande à **éviter les aires marines protégées** autant que possible. Une implantation en aire marine protégée peut être envisagée comme une exception, uniquement s'il n'y a pas d'alternative et si cela ne nuit pas à l'atteinte des objectifs de conservation.

Surfrider demande à gérer l'**effet récif**, en concevant des fondations de manière à favoriser certaines fonctionnalités écologiques en anticipant les effets du changement climatique.

Les **impacts cumulés** sont particulièrement préoccupants, notamment ceux avec les activités maritimes « historiques » qui exercent déjà des pressions sur le milieu marin. Il est urgent de diminuer l'impact de ces activités pour laisser la place à l'éolien en mer, car l'Océan n'est pas un espace infini à conquérir.

Questions à poser

- Quelles sont les espèces présentes et leurs enjeux de protection ? Quelles sont les fonctionnalités écologiques ? Avez-vous eu une approche écosystémique pour analyser les enjeux environnementaux ?
- Étudiez-vous le cumul d'impact avec les autres activités et avec les autres parcs éoliens français et étrangers ?
- Les fondations seront-elles écoconçues ? Pour quelles espèces ? avec quelle anticipation du changement climatique ? Un suivi de l'effet récif est-il prévu ?

BRUIT SOUS-MARIN DE L'ÉOLIEN OFFSHORE

Faits & informations

Le bruit anthropique sous-marin (émissions sonores d'origine humaine) est une des pressions exercées par les activités liées aux parcs éoliens en mer sur l'environnement marin. Les émissions sonores peuvent être soit impulsives (sons brefs, à durée limitée d'émission, et en général à forte énergie) ou alors continues (de moindre énergie, mais de plus longue durée). Les pressions associées, et donc les impacts ne sont pas les mêmes selon la phase du cycle de vie du parc éolien :

- **Avant la phase de construction,** la prospection sismique produit des bruits impulsifs, de basses fréquences, avec un niveau sonore très élevé en cône sous le navire.

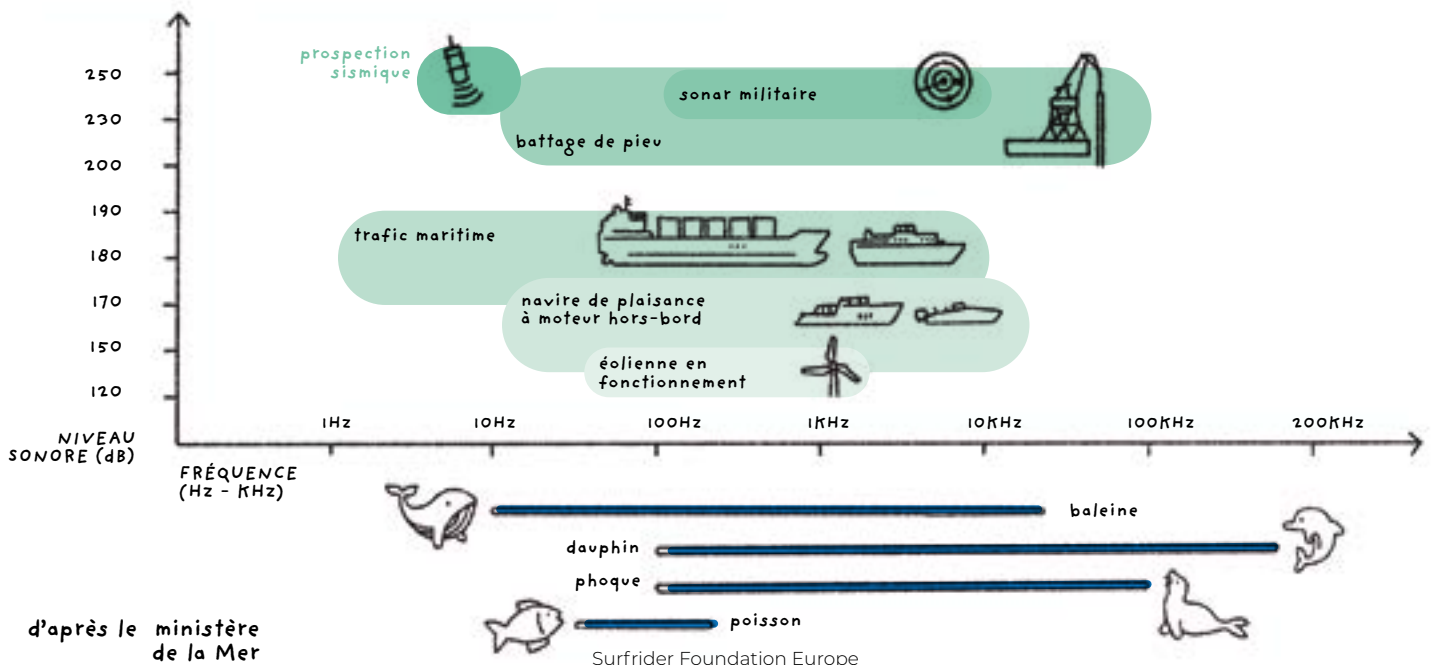
- **Pendant la phase de construction,** les opérations de forage et de battage de pieux pour l'éolien posé, d'enrochement, d'ensouillage de câbles et de l'ancrage pour l'éolien flottant, sont des bruits impulsifs ou continus de moyenne à forte intensité, qui sont émis dans une large bande de fréquence. C'est à ce moment-là que les risques pour la faune marine sont les plus élevés. La propulsion des navires de travaux sur zone induit un bruit continu qui s'ajoute au bruit ambiant déjà existant.

- **Pendant la phase de construction** particulièrement, et de fonctionnement également, le trafic maritime augmente : les navires induisent un bruit continu qui s'ajoute au trafic maritime déjà existant.

- **Pendant la phase de fonctionnement,** les vibrations produites par les éoliennes, la mise sous tension des lignes d'ancrage en conditions extrêmes, le bruit des chaînes en mouvement génèrent également un bruit continu qui vient s'ajouter au bruit ambiant. Cependant, ces niveaux sonores sont assez faibles comparativement au paysage sonore, et ont donc un impact minime.

- **Pendant la phase de démantèlement,** les travaux, selon les méthodes et moyens utilisés et le trafic maritime accru pourront produire un impact similaire à la phase de construction.

NIVEAU SONORE ET FRÉQUENCES D'ÉMISSION DES ACTIVITÉS ANTHROPIQUES EN MER, COMPARÉS AUX FRÉQUENCES UTILISÉES PAR LES ANIMAUX MARINS



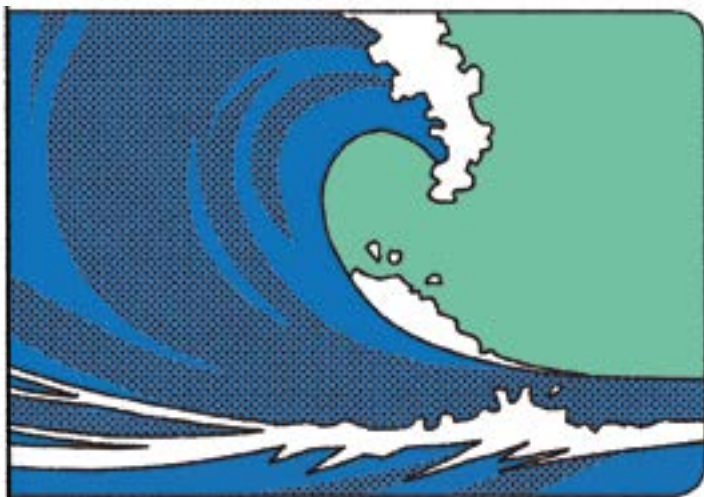
QUELS EFFETS POUR LA FAUNE MARINE ?

Le bruit sous-marin peut produire plusieurs effets sur la faune marine, la phase de battage de pieux et de déroctage par minage étant les plus critiques :

- **Mortalité** : au-delà d'un certain seuil, notamment pour les poissons,
- **Désorientation et masquage** : diminution des espaces de communication et d'écoute des mammifères marins,
- **Lésions physiologiques du système auditif** : baisse ou perte de la sensibilité au son, diminution de l'évaluation du risque et perte d'efficacité dans la capture des proies,
- **Ralentissement de la croissance et baisse de la reproduction** : pour les crustacés principalement,
- **Augmentation du niveau de stress**,
- **Désertion d'habitats et fuite des proies** : jusqu'à 30km du foyer d'émission.

QUE PEUT-ON Y FAIRE ? ÉVITER, RÉDUIRE, COMPENSER...

- 1) **Éviter** : Adapter le planning du projet en fonction des saisons et de l'utilisation de la zone par les espèces critiques.
- 2) **Réduire** : Utiliser des techniques, moyens et méthodes moins bruyantes. Utiliser des méthodes d'atténuation du niveau sonore (barrières physiques : rideaux de bulles, chaussettes, ou protocoles de réduction avec une augmentation progressive du niveau sonore).
- 3) Il n'y a **pas de compensation existante** pour les dommages causés par le bruit sous-marin. Des actions de restauration, de conservation, de sensibilisation et d'acquisition de connaissances peuvent être mises en place, mais ce n'est pas de la compensation à proprement parler. Cela reste nécessaire et obligatoire de proposer des mesures.



Ce qu'en pense Surfrider

Encourager l'éolien flottant : Les impacts de la phase de construction sont nettement moindres que pour l'éolien posé.

Vraiment considérer les impacts du bruit sous-marin comme une pollution : Nous souhaitons que le bruit sous-marin soit systématiquement considéré et perçu comme une pollution environnementale : à éviter le plus sérieusement possible.

Encourager la production et le partage des données : Il existe peu d'études sur les oiseaux marins et les tortues marines et leur sensibilité au bruit, et ce d'autant moins en Méditerranée, et les effets du changement climatique n'est pas pris en compte dans les études d'impact sur la biodiversité.

Questions à poser

- Quel est le niveau acoustique ambiant ?
- Quels sont les contributeurs principaux de ce paysage sonore ?
- Quelles seront les niveaux sonores et les fréquences lors des phases les plus critiques ?
- Quelles sont les distances d'impacts associés ?
- Quelles sont les zones définies comme d'exclusion dans lesquelles des mesures de réduction doivent être entreprises ?
- Comment évitez-vous ou réduisez-vous les impacts ?

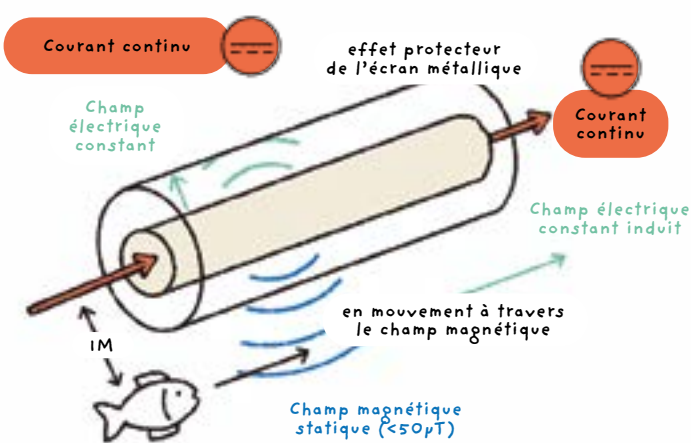
CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Faits & informations

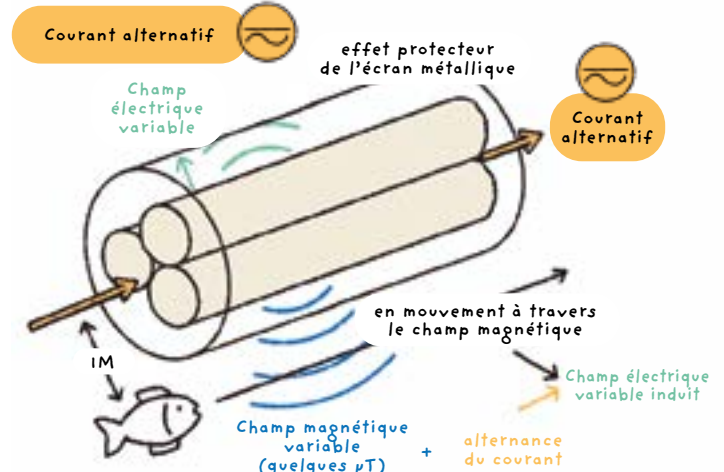
Quand un courant électrique circule dans un conducteur, un champ électromagnétique est généré : il est composé d'un **champ électrique** et d'un **champ magnétique**. Ce sont des rayonnements non ionisants : ils ne modifient pas la composition des atomes et molécules qui y sont exposés (contrairement aux rayonnements radioactifs par exemple).

Les câbles électriques des éoliennes en mer vont donc créer des champs électromagnétiques. Les champs électriques générés directement par le courant électrique sont contenus par l'écran métallique qui entoure les câbles, mais pas les champs magnétiques. Ceux-ci induisent des champs électriques dans les corps conducteurs qui le traversent, ce qui s'applique aux

espèces marines mais aussi au masse d'eau en mouvement. Leur intensité et leur nature dépend des caractéristiques du parc éolien et du courant (puissance, intensité, continu ou alternatif). On ne s'intéresse dans cette fiche qu'aux champs magnétiques et aux champs électriques induits qui leur sont intrinsèquement liés.



d'après Ifremer



On distingue les champs magnétiques **statiques**, créés lorsque le courant électrique* est continu* (qui va toujours dans la même direction), aux champs magnétiques **variables**, créés par des courants électriques alternatifs* (dont la direction change à une certaine fréquence) tels que les magnets sur les portes de frigo ou les casques d'ordinateur (champ statique local de $500 \mu T$), ou encore la Terre : le champ magnétique **terrestre** est statique et vaut à peu près $50 \mu T$ en France.

QUELS RISQUES POUR LA SANTÉ HUMAINE ?

Tout ce qui produit, transporte ou consomme de l'électricité produit des champs électromagnétiques. Nous sommes donc **quotidiennement** exposés à ces champs.

Les champs électromagnétiques extrêmement basse fréquence sont classés potentiellement cancérogènes pour l'homme depuis 2001. Ceci est lié à certaines études épidémiologiques mais n'est pas étayé par les études en laboratoire et en particulier aucun mécanisme biophysique n'a été identifié qui pourrait expliquer les résultats⁴. En France, le réseau de transport d'électricité ne doit pas générer de champ magnétique 50Hz supérieur à $100 \mu T$ ⁵ pour limiter les phénomènes électriques induits.

Les champs magnétiques statiques, eux, entraînent des effets type vertiges ou nausées quand ils atteignent des valeurs de l'ordre du Tesla³, soit **20 000 fois plus élevés** que le champ magnétique terrestre (à l'occasion d'un IRM par exemple).

IMPACT DES CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES SUR LA FAUNE MARINE

Certains animaux marins **utilisent le champ magnétique** terrestre pour s'orienter dans leurs déplacements et leurs migrations. Par ailleurs, les élasmobranches (requins et raies) perçoivent grâce à un organe spécifique le champ électrique. Ils l'utilisent notamment pour détecter des proies et/ou des prédateurs. En toute logique, ils peuvent donc **percevoir le champ électrique** induit par les câbles électriques.

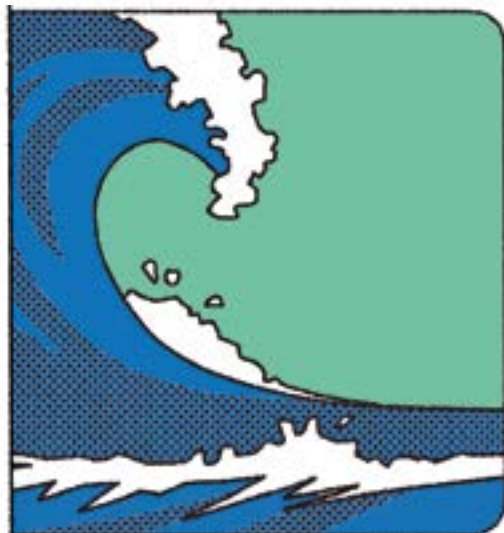
L'intensité d'un champ magnétique **décroit très vite avec la distance**. Les impacts les plus forts potentiellement concernent les espèces qui vivent ou évoluent à **proximité du câble**, c'est-à-dire dans ou sur les fonds marins, comme les crustacés, mais aussi les raies et certains requins. Les autres espèces se déplaçant dans la colonne d'eau, notamment les cétacés, détectant eux aussi les champs magnétiques, évoluent suffisamment loin pour ne pas être significativement impactés par le champ magnétique émis par le câble⁶. Le peu d'études de l'impact des champs électromagnétiques sur ces espèces ne montre pas de modification significative de comportement, ni d'obstacle à leur déplacement (ce qui constituerait un effet barrière).

Des études en laboratoire et à des intensités de champ magnétique plus élevées de plusieurs ordres de grandeurs que celles que l'on retrouvera dans des parcs éoliens en mer ont observé différents impacts sur les crustacés et les espèces enfouies dans le sable : retard de croissance des larves, déformation lors de la croissance, modification des comportements (diminution de la vitesse de déplacement par exemple) et plus faible taux de reproduction⁷. **La survie des individus semble cependant peu impactée**, comme le montrent les résultats d'une étude sur les homards, espèce particulièrement sédentaire, et donc exposée, et qui conclut qu'« aucun impact négatif drastique des câbles électriques sous-marins n'a été mis en évidence »⁸. La transposition en milieu naturel reste très compliquée⁷.

EVITER, RÉDUIRE, COMPENSER

La base de l'évitement est d'éviter les habitats marins vulnérables et les zones fonctionnelles (notamment halieutiques), classés ou non au titre de la préservation du milieu marin.

L'enfouissement des câbles est une mesure de réduction de l'impact efficace en dehors des habitats vulnérables, car cela augmente la distance entre le câble et le fond marin.



Ce qu'en pense Surfrider

Surfrider encourage l'**acquisition et le partage de données** sur ces effets qui ne font pas l'objet de suffisamment d'études. Idéalement, ces suivis seront faits par des instituts de recherche neutres et indépendants.

Surfrider considère que les résultats disponibles sont cependant **rassurants** : si des impacts existent, ils restent très localisés et ne semblent pas impacter la survie des espèces marines, ni les mettre en danger.

Surfrider encourage plutôt le **courant continu**, dont la nature est plus proche du champ magnétique terrestre.

Questions à poser

- Est-il possible de privilégier du courant continu ?
- Quelles sont les modélisations effectuées sur les valeurs du champ électromagnétique ?
- Quelles mesures de suivi prévoyez-vous ? Comment allez-vous partager cette connaissance ? Qui va effectuer ces suivis ?

Définitions (ordre alphabétique)

Courant alternatif

Courant qui oscille dans un sens puis dans l'autre. Il génère un champ magnétique variable qui décroît avec le carré de la distance au câble. La majorité du réseau de transport et de distribution d'électricité est en courant alternatif. Il y a trois câbles : deux phases, et la terre. L'intérêt du courant alternatif est que sa tension peut facilement être transformée (par des transformateurs).

Courant continu

Courant qui va dans un seul sens. Le champ magnétique généré est statique, et il décroît avec le carré de la distance au câble. Il y a deux câbles : le pôle positif, et le pôle négatif. L'intérêt du courant continu est de limiter les pertes pendant le transport de l'électricité très haute tension.

Effet Récif

Augmentation de la capacité du milieu marin à accueillir des organismes sédentaires et affectionnant les milieux rocheux ou assimilés suite à l'introduction d'une structure artificielle dans le milieu marin.

Effet Réserve

Survient lorsque la modification d'usages humains augmente les abondances, la quantité, et la diversité en taille des espèces présentes, et qui a des conséquences à l'échelle d'une population d'une espèce, voire d'un écosystème complet.

Espèces envahissantes

Espèces non naturellement présentes dans le milieu marin, qui une fois introduite, s'y plaisent au point de remplacer les espèces initialement et naturellement présentes. Les espèces envahissantes remplissent souvent plusieurs fonctions dans le milieu (généralistes), alors que certaines espèces locales sont plutôt spécifiques.

Espèce endémique

Espèce présente uniquement sur une aire géographique restreinte, et nulle part ailleurs.

Maîtrise d'ouvrage (MO ou MOUV)

Ce sont les décideurs du projet. Pour les parcs éoliens, c'est l'Etat pour la partie Parc, RTE pour la partie raccordement. La notion de MO peut également être élargie aux entités responsables de la planification, du financement, de la construction et de l'exploitation de ces parcs.

Partie prenante

Tout acteur (individu, organisation, groupe, public ou privé) concerné par le projet.

Producteur ou Développeur

C'est le consortium d'entreprises qui va être responsable de l'installation du parc éolien, de sa maintenance, qui va gérer la production électrique et qui va démanteler le parc.

Technologie mature

Une technologie est mature si elle est rentable d'un point de vue commercial (activité rentable), que les difficultés techniques sont levées, et que la filière et ses chaînes de valeurs sont fonctionnelles.

Pour aller plus loin

(bibliographie et ressources diverses)

GÉNÉRAL SUR L'ÉOLIEN EN MER

- Site de l'éolien en mer en France : <https://www.eoliennesenmer.fr/>
- Vidéo du Réveilleur sur l'éolien en mer
- Page de « connaissance des énergies »

FICHE 1 - CONCERTATION

- Site de la CNDP
- Site de l'enquête publique
- Document commun CNDP / commissaires enquêteurs

FICHE 2 - ENJEUX TECHNIQUES

- Fiche 31 du débat public « La mer en débat » pour la façade Méditerranée

FICHE 3 - DESCRIPTION TECHNIQUE

- Technologie éolienne (site du gouvernement)
- Arrêté du 20 novembre 2020 réglementant le balisage maritime

FICHE 4 - ÉOLIEN POSÉ

- (1) [anglais] [Des turbines de 16 MW pour l'éolien offshore](#) (Offshore Wind)
- (2) [Fiche 35 de « La mer en débat », façade NAMO, les caractéristiques de l'éolien en mer](#)
- (3) [anglais] [Global Wind report 2024](#)
- (4) [anglais] [Fixed Offshore Wind](#) (Tethys)
- (5) [Bilan carbone du parc de Saint-Brieuc](#)
- (6) [Bilan carbone du parc de Fécamp](#)
- (7) [Bilan carbone du parc de Saint-Nazaire](#)
- (8) [Fiche 14 du débat public du projet au large de la Normandie sur le bilan carbone](#)

FICHE 5 - ÉOLIEN FLOTTANT

- (1) [Premier parc éolien flottant au monde \(Hywind\)](#)
- (2) (Anglais) [projets flottants en Ecosse](#)
- (3) [Démonstrateur FLOatgen en France](#)
- (4) [Rapport de la commission de régulation de l'énergie sur les énergies marines](#)
- (5) [Fiche n°15 du débat sur la Méditerranée \(EOS\) sur les caractéristiques d'un parc flottant](#)
- (6) [Analyse bibliographique des bilans carbone de l'éolien flottant, 2021](#)
- (7) [Fiche n°17 du débat sur la Méditerranée \(EOS\) et le démantèlement de l'éolien flottant e \(EOS\) et le démantèlement de l'éolien flottant](#)

FICHE 6 - RACCORDEMENT DES PARCS ÉOLIENS EN MER

- Description du raccordement sur le site de l'éolien en mer en France
- Motion design sur les travaux de raccordement (RTE)
- Fiche n°33 de « La mer en débat », façade SA, sur le raccordement

FICHE 7 - MATÉRIAUX ET RECYCLABILITÉ

- (1) [Bilan carbone du parc de Saint-Nazaire](#)
- (2) [Bilan carbone du parc de Fécamp](#)
- (3) [Les futurs énergétiques, Chapitre 12, analyse environnementale \(RTE\)](#)
- (4) [Fiche synthèse criticité du cuivre, BRGM, 2018](#)
- (5) [Vidéo du Réveilleur sur l'éolien en mer](#)
- (6) [Avec quels matériaux sont fabriquées les éoliennes et comment les recycler ? \(Mediachimie\)](#)
- (7) [anglais] [Impact of the Establishment of US Offshore Wind Power on Neodymium Flows. Nat. Sustain. 2019, 2 \(4\), 332–338.](#)
- (8) [anglais] [The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions \(IEA\)](#)
- (9) [Bilan carbone du parc de Saint-Brieuc](#)
- (10) [Question/Réponse du SER sur l'éolien en mer](#)

FICHE 8 _ ÉTUDES ENVIRONNEMENTALES

- (1) Étude d'impact (OFB)
- (2) [Guide de l'étude d'impact pour l'éolien en mer, 2017, Ministère de l'environnement](#)
- (3) [La compensation en mer, nité mixte de recherche AMURE](#)

FICHE 9 _ ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX

- [Autosaisine du Conseil National pour la protection de la nature](#)
- [Vidéo de « Sciences de comptoir » sur l'éolien en mer](#)
- [Fiches du SER sur les impacts environnementaux](#)
- Projet COMET de France énergies marines : [COME3T](#)
- [Note sur les impacts cumulés](#)
- [anglais] [le site du SEER \(États-Unis\)](#)

FICHE 10 _ BRUIT SOUS-MARIN

- Fiche synthétique «[Le bruit sous-marin de l'éolien en mer](#)», Ifaw, OFB
- [Synthèse de l'expertise scientifique collective sur le bruit sous-marin \(CNRS\)](#)
- [Bulletin COMET sur le bruit sous-marin de France-Energies marines](#)
- [Guide pour limiter l'impact des bruits anthropiques \(MTES, 2020\)](#)

FICHE 11 _ CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES

- [anglais] [site internet de « renewable grids initiative »](#)
- (1) Lignes Directrices Relatives Aux Limites d'exposition Aux champs Magnétiques Statiques.
 - (2) Les ondes électromagnétiques. Actions et effets sur le corps humain (INRS)
 - (3) [Champs électromagnétiques. Effets sur la santé - Risques \(INRS\)](#)
 - (4) [Page de l'OMS sur les champs électromagnétiques](#)
 - (5) [Qu'est-ce qu'un champ électromagnétique ? \(RTE\)](#)
 - (6) [Podcast «Parlons bleu, parlons bleu» sur la thèse de Bastien Taormina](#)
 - (7) [Rapport de L'ifremer sur les impacts des câbles électriques sous-marins.](#)
 - (8) [rapport du projet «SPECIES»](#)