

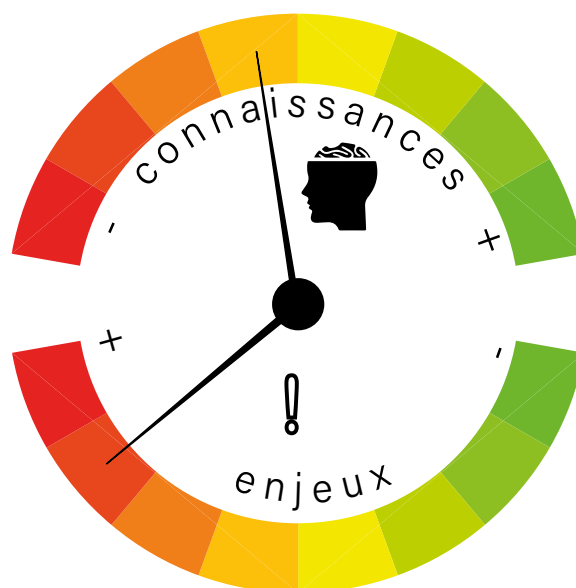


© Dennis P. / Pixabay, FEM

Comment l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) évalue et contribue à réduire les impacts environnementaux des parcs éoliens en mer ?

Bulletin n°13
Septembre 2025





Problématique jugée comme « à enjeu élevé au regard de la nécessité de mener une ACV environnementale pour les projets de parcs éoliens en mer avec un niveau de connaissance encore limité considérant la difficulté d'accès aux données de la chaîne d'approvisionnement des matières premières et aux inventaires »

Tous droits réservés.

Les textes de ce bulletin sont la propriété de France Energies Marines.

Ils ne peuvent être reproduits ou utilisés sans citer la source et sans autorisation préalable. Les photos, les schémas et les tableaux (sauf indication contraire) sont protégés par le droit d'auteur.

Ils restent la propriété de France Energies Marines et ne peuvent être reproduits sous quelque forme ou par quelque moyen que ce soit, sans l'autorisation écrite préalable de France Energies Marines.

Citer le document comme ci-dessous :

Henry S., Creus J., Nunes M., Rincé L., Rousseaux P. et Schlesinger-Martinat J.

Comment l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) évalue et contribue à réduire les impacts environnementaux des parcs éoliens en mer ?

Bulletin COME3T n°13

Plouzané : France Energies Marines, 2025, 24 pages

Edition : Septembre 2025

Dépôt légal à parution.

Maquettage : France Energies Marines

Conception graphique des figures : Siegrid Design

COME3T, COMité d'Expertise pour les Enjeux Environnementaux des énergies marines renouvelables, réunit des experts neutres et indépendants pour apporter des éléments de connaissances scientifiques et des recommandations en réponse à un enjeu environnemental en lien avec les énergies marines renouvelables.



Expertise scientifique

Stéphanie Bonnet, Professeure des universités

Nantes Université

Juan Creus, Professeur des universités

La Rochelle Université

Mike Nunes, Chef de projet ACV et écoconception

Evea

Laurélène Rincé, Responsable d'études EMR

Cerema

Patrick Rousseaux, Professeur des universités

Université de Poitiers

Joanna Schlesinger-Martinat, Ingénieure de recherche en ACV

École des Mines de Paris, PSL

Coordination, synthèse et rédaction

Sybill Henry

France Energies Marines

Introduction

Dans le contexte actuel de changement climatique, la France a pour ambition d'atteindre la neutralité carbone d'ici à 2050 et de diversifier son mix énergétique. L'un des objectifs de la transition énergétique est de décarboner la production d'énergie en diminuant notamment la part d'énergies fossiles. 64,7 % de l'électricité produite en France en 2023 est déjà décarbonée et résulte notamment de la forte proportion d'énergie nucléaire dans le mix électrique français [20]. Cependant, pour répondre au besoin de diversification du mix énergétique, la loi Énergie Climat (2019) fixe un objectif de production d'électricité issu du nucléaire à 50 %, induisant la fermeture de 14 réacteurs d'ici à 2035 [18]. C'est en ce sens que le développement de l'éolien en mer est encouragé au sein du mix énergétique français. Si l'éolien en mer ne peut couvrir à lui seul l'ensemble des besoins en électricité, c'est un moyen de production d'énergie à faible émissions de gaz à effet de serre (GES).

L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) d'un parc éolien en mer permet d'évaluer sa performance environnementale en prenant en compte toutes les étapes du cycle de vie et en étudiant plusieurs catégories d'impacts environnementaux. En accord avec les principes du développement durable, une analyse du cycle de vie peut être menée sur trois aspects : environnemental, social et économique. Seule l'analyse du cycle de vie environnementale sera détaillée dans ce bulletin.

Les notions clés inhérentes à une analyse environnementale du cycle de vie sont présentées dans la première partie de ce bulletin. Elle détaille notamment le cadre normatif de l'analyse du cycle de vie et les aspects méthodologiques associés. Dans une seconde partie, un exemple d'analyse du cycle de vie d'un parc éolien en mer est présenté. Un focus particulier sur la fin de vie et le recyclage des matériaux est également proposé. Enfin, les limites de cette approche et les recommandations inhérentes à l'utilisation d'une analyse du cycle de vie pour l'éolien en mer sont présentées en dernière partie¹.

● En bref

L'ACV environnementale est un outil d'évaluation qui permet de quantifier les impacts environnementaux potentiels pour chaque étape du cycle de vie d'un système. Elle permet d'identifier quelles sont les étapes du cycle de vie les plus impactantes pour l'environnement afin (i) d'évaluer l'impact environnemental d'un système, (ii) de proposer des systèmes plus respectueux de l'environnement en travaillant sur les principales sources d'impact, (iii) en informant sur les impacts environnementaux d'un système et (iv) en orientant les politiques publiques et les entreprises dans leur stratégie de réduction des impacts environnementaux (stratégie bas carbone, etc.). C'est un processus normé qui peut être appliqué à tous types de systèmes, comme les parcs éoliens.

¹ Pour plus de lisibilité, les schémas présentés dans ce bulletin ne tiennent pas compte de la diversité des fondations et flotteurs pouvant être utilisés pour le développement des parcs éoliens en mer posés et flottants.

Notions clés

Qu'est-ce qu'une Analyse du Cycle de Vie ou ACV environnementale ?

L'**analyse du cycle de vie** (ACV) est un outil d'évaluation qui permet de quantifier les **impacts environnementaux potentiels** pour les différentes étapes du cycle de vie d'un système (**Fig. 1**) [10, 21]. L'ACV est une méthode **normalisée** (ISO 14040 et ISO 14044) [12, 13] qui repose sur une double approche : **multi-étapes** (considération des différentes étapes du cycle de vie) et **multicritères** (considération de plusieurs impacts environnementaux). En effet, à chaque étape du cycle de vie préalablement identifiée, des matières premières et de l'énergie vont être utilisées (eau, pétrole, gaz, minerais, carburants, électricité, etc.) et sont appelés « **flux entrants** » (**Fig. 1, en bleu ciel**). A l'inverse tout ce qui va sortir du système (résidus de matières, déchets de production, eaux usées, pollutions, etc.) est qualifié de **flux sortants** (**Fig. 1, en bleu foncé**). C'est l'étude de ces différents flux qui va permettre de **quantifier les potentiels impacts environnementaux** d'un système [21].

Ces impacts environnementaux sont quantifiés grâce à des **indicateurs d'impact** [7] dont 16 sont recommandés par l'Union Européenne (**Fig. 1, en vert**) [22]. Parmi eux, l'indicateur « changement climatique » permet, par exemple, de considérer la contribution d'un système aux émissions de gaz à effet de serre (notamment du CO₂) exprimé en kgCO₂ eq. [7].

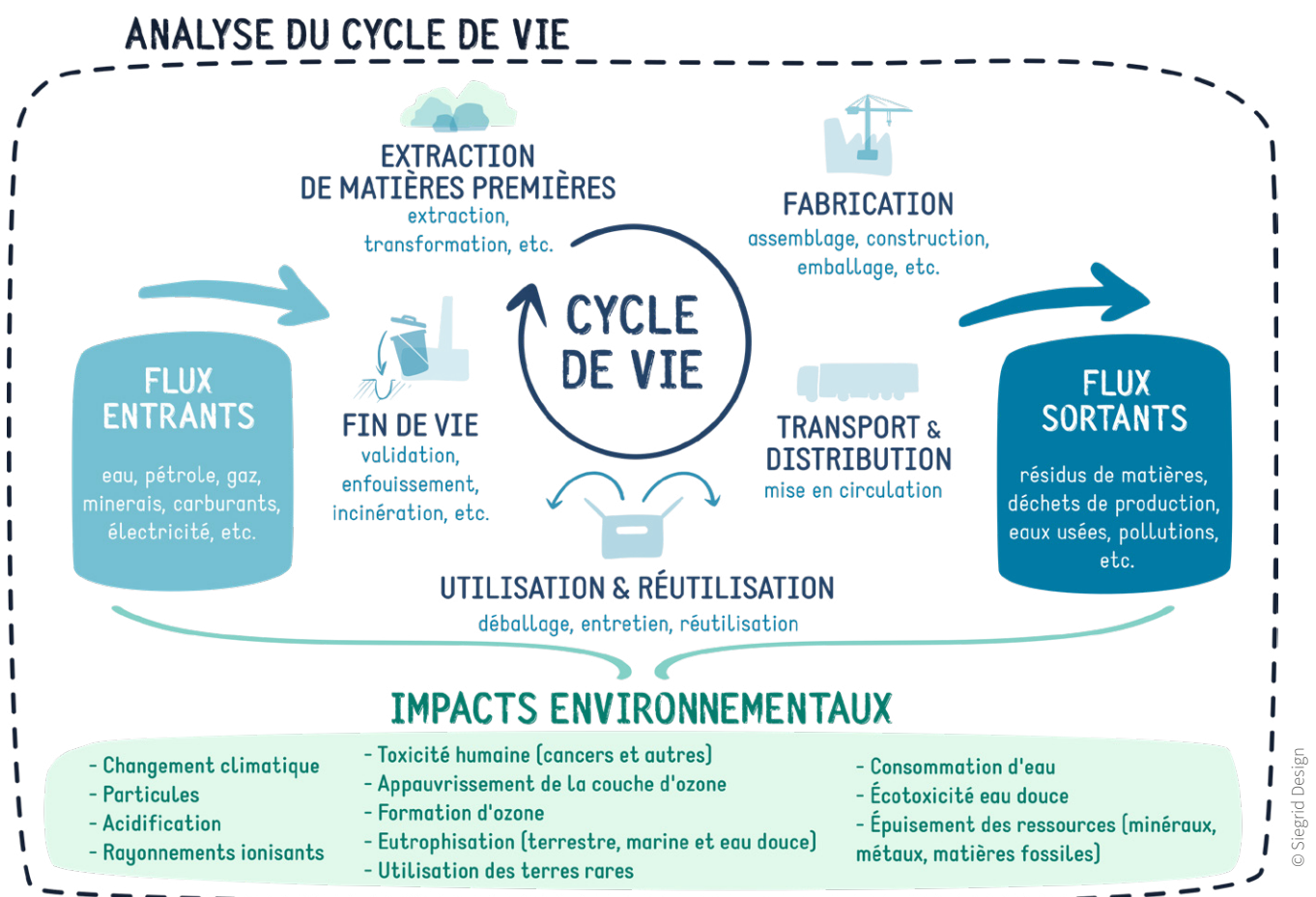


Fig. 1 Méthode d'évaluation des impacts environnementaux par analyse du cycle de vie présentant l'approche multi-étapes et multicritères. D'après [1]

Pourquoi faire une ACV environnementale ?

L'intérêt principal de réaliser une ACV est de fournir une vision **globale** des impacts environnementaux. En considérant l'ensemble des étapes du cycle de vie d'un système et des flux associés (entrants et sortants), l'ACV permet de visualiser les **étapes du cycle de vie les plus impactantes** pour l'environnement. Cela permet de proposer des **axes d'amélioration** et éventuellement de **diminuer les impacts environnementaux** d'un système donné, mais surtout d'identifier les éventuels **transferts d'impacts** [1].

On parle de **transfert d'impacts** (ou de transfert de pollution) lorsque des impacts environnementaux sont transférés d'une étape du cycle de vie à une autre ou d'un indicateur environnemental à un autre. Par exemple, l'emploi d'une voiture électrique permet de réduire l'impact de la consommation d'une source d'énergie fossile lors de la phase d'utilisation. En revanche, lors de la phase de fabrication, cette même voiture électrique va nécessiter davantage de ressources en matières premières notamment pour la production de ses batteries. Pour le système "voiture électrique", il y a donc un transfert d'impact entre deux étapes du cycle de vie (utilisation vers fabrication) et deux indicateurs environnementaux (« changement climatique » vers « épuisement des ressources minérales »).

L'autre intérêt de l'ACV est qu'elle s'applique à tous types de systèmes : produit (voiture électrique, panneau photovoltaïque, stylo à bille, ordinateur, etc.) et service (réparation de matériel électronique, exploitation de parc éolien, etc.) [1]. L'ACV peut être utilisée afin de réduire l'impact environnemental d'un système en choisissant les options les plus vertueuses pour l'environnement dès la **conception du système étudié** [27]. C'est un **outil complémentaire** à d'autres méthodes et études d'impacts environnementales, qui prennent notamment mieux en compte les enjeux locaux [1].

Comment faire une ACV environnementale ?

Il existe un cadre normalisé en quatre étapes pour la réalisation d'une ACV (**Fig. 2**).

Les normes ISO 14040 et 14044 recommandent la réalisation d'une revue critique pour vérifier l'objectivité et la transparence de la méthode et des données utilisées. L'interprétation qui est faite des résultats doit également être en cohérence avec les objectifs et les limites identifiés. Sa vocation n'est pas de vérifier ou de valider le cadrage ou les résultats, ni de commenter l'utilisation faite des résultats. Il s'agit d'une critique objective de l'ACV par rapport au cadre normatif ISO. Cette expertise est réalisée indépendamment du commanditaire et de l'exécutant de l'étude [21, 27].

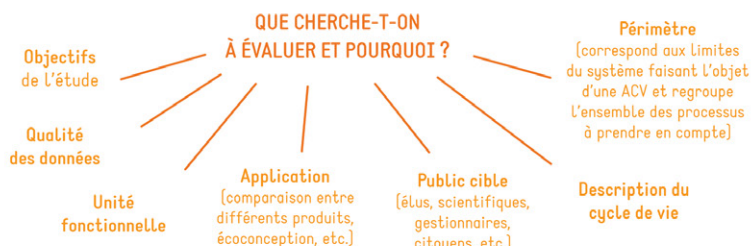
ÉTAPES DE L'ANALYSE DU CYCLE DE VIE

1 DÉFINITION des OBJECTIFS, CHAMP et FINALITÉ de L'ÉTUDE

Cette première étape permet de fixer les objectifs, la finalité de l'ACV d'un système, et de réaliser le cadrage méthodologique de l'évaluation.

L'**unité fonctionnelle** correspond à l'unité de mesure utilisée pour **évaluer la fonction d'un système** et **permettre la comparaison** entre les systèmes ayant la même fonction. Elle doit être **cohérente** avec le périmètre établi et définie selon : la fonction principale, la durée de vie du produit, la performance, le nombre et la fréquence d'utilisation.

Exemple : La fonction d'un parc éolien en mer est de produire de l'électricité. L'unité fonctionnelle du système parc éolien en mer pourrait donc être de 1 kWh d'électricité fourni au réseau par un parc éolien en mer de xx MW et d'une durée d'exploitation de xx années.



2 INVENTAIRE de CYCLE DE VIE

L'inventaire permet d'identifier et de quantifier l'ensemble des flux entrants et sortants du système à chaque étape du cycle de vie.

Exemple : L'inventaire va identifier toutes les ressources matérielles et énergétiques nécessaires à la production d'1kWh d'électricité. Il s'agira par exemple de considérer l'ensemble des ressources nécessaires à la conception d'une éolienne et de sa fondation, incluant les pertes de matériaux inhérentes à la production et aux diverses émissions associées aux procédés de fabrication et de transport. En fonction du périmètre préalablement défini, l'exercice sera réalisé pour l'ensemble des éléments du parc : câbles de transport et d'export d'électricité, sous-station électrique en mer, etc.) et pour toutes les étapes de la vie du parc (fabrication des composants, transport, installation, opération et maintenance, démantèlement, fin de vie).



3 ÉVALUATION des IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Au cours de cette étape, les impacts environnementaux sont estimés par modélisation et dépendent de la qualité des données d'inventaire.

DEUX SOUS-ÉTAPES SONT NÉCESSAIRES POUR CONFRONTER LES DONNÉES DE L'INVENTAIRE AUX INDICATEURS D'IMPACTS

COMMENT ÉVALUER LES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ?

Classification
chaque émission vers l'environnement ou extraction depuis l'environnement est affectée à un ou plusieurs indicateurs d'impact : changement climatique, épuisement des ressources, etc.

Exemple : Les émissions de GES (comme le CO₂) émises pour la conception d'une fondation d'éolienne en béton seront associées à l'indicateur changement climatique.

Caractérisation
chaque émission vers l'environnement ou extraction depuis l'environnement est quantifiée au regard d'un ou plusieurs indicateurs d'impact : changement climatique, épuisement des ressources, etc.

Exemple : Les émissions de GES émises pour la conception d'une fondation d'éolienne en béton sont quantifiées grâce à l'indicateur changement climatique et exprimées en kgCO₂ eq.

SOUS-ÉTAPES FACULTATIVES

Normalisation
recherche d'une valeur normée à des fins de comparaison – production électrique en eq. Habitant ou eq. CO₂ par exemple

Pondération / Agrégation
recherche d'un score unique d'évaluation

4 INTERPRÉTATIONS des RÉSULTATS

Au regard des résultats obtenus, les principales sources d'impacts pour l'environnement à chaque étape du cycle de vie sont interprétées.

QUE FAIRE DES RÉSULTATS D'UNE ACV ?

Exploiter les résultats au regard de l'objectif fixé
comparer les différents impacts entre plusieurs hypothèses d'un même système ou de plusieurs systèmes (ACV comparative)

Identifier les axes d'optimisation du système

Critiquer la démarche
recherche des lacunes et des limites de l'étude – hypothèses, choix méthodologiques, etc.)

Exemple : Les résultats de l'ACV peuvent être utilisés pour comparer plusieurs voies de production d'énergie selon différentes catégories d'impacts environnementaux (changement climatique, épuisement des ressources naturelles, etc.).

Fig. 2 Représentation des quatre étapes de réalisation d'une analyse du cycle de vie d'un système selon les normes ISO 14040 et 14044, d'après [12, 13]

A quoi sert l'ACV environnementale ?

Une ACV environnementale permet notamment d' :

- **Evaluer un produit d'un point de vue environnemental**

En considérant l'ensemble des étapes du cycle de vie d'un système, elle permet d'évaluer les impacts environnementaux à large échelle et de mettre en avant la (ou les) étape(s) potentiellement la (ou les) plus impactante(s) pour l'environnement [1], mais aussi d'identifier et de quantifier les transferts d'impacts en vue de les réduire, voire de les supprimer. Des mesures pour tenter de réduire ces impacts peuvent alors être mises en œuvre (diminution ou substitution à l'utilisation de certaines ressources pour des ressources moins impactantes, etc.) [21].

- **Ecoconcevoir**

L'écoconception consiste à concevoir des systèmes qui réduisent leur empreinte environnementale à chaque étape du cycle de vie en travaillant notamment sur les principales sources d'impact. Elle permet de tendre vers l'élaboration de système plus respectueux de l'environnement, et ce en se concentrant sur l'économie des ressources naturelles et la réduction des impacts tout au long du cycle de vie. C'est une démarche préventive, qui peut s'avérer stratégique quand elle est utilisée à des fins commerciales, environnementales, stratégiques (sécurité d'approvisionnement, etc.) [1].

- **Informier et communiquer**

L'information et la communication des résultats de l'ACV font partie intégrante de la norme (ISO 14040 et 14044) qui explicite la nécessité de définir les objectifs et les principales raisons qui motivent à la réalisation d'une ACV. En communiquant sur les impacts environnementaux potentiels et en facilitant la compréhension des impacts, l'ACV permet de sensibiliser et d'informer sur les enjeux environnementaux du cycle de vie [1]. Les résultats peuvent également être utilisés pour définir des systèmes d'homologation environnementale de type écolabel afin d'aider les consommateurs à identifier les produits les plus respectueux de l'environnement [21].

- **Aider à la prise de décision**

Enfin, l'utilisation concrète des résultats peut contribuer à nourrir et orienter les politiques publiques, comme la stratégie nationale bas carbone ou les stratégies environnementales des entreprises [1].

L'ACV pour évaluer les impacts environnementaux des parcs éoliens en mer

Dans cette partie, les quatre étapes nécessaires à l'évaluation des impacts environnementaux d'un parc éolien en mer sont présentés en s'appuyant sur les résultats de deux études et projets :

- L'étude « Vestas » qui propose une ACV environnementale de la production électrique d'un parc éolien en mer de 990 MW équipé de turbines Vestas V236 d'une puissance unitaire de 15 MW sur fondation posée en monopieux [5] ;
- Le projet LIF-OWI dont l'objectif principal était d'élaborer un cadre méthodologique pour l'ACV environnementale et sociétale appliqué à l'éolien en mer [19].

Si les résultats de l'étude « Vestas » ne peuvent être directement transposés aux parcs éoliens en mer français et leurs raccordements, ils donnent des éléments d'informations sur la répartition des matériaux utilisés par étapes du cycle de vie et par composants d'un parc éolien (fondation, mât, pale d'éolienne, etc.).

Définition des objectifs, du champ et de la finalité de l'étude

Chaque parc éolien présente des spécificités en lien avec :

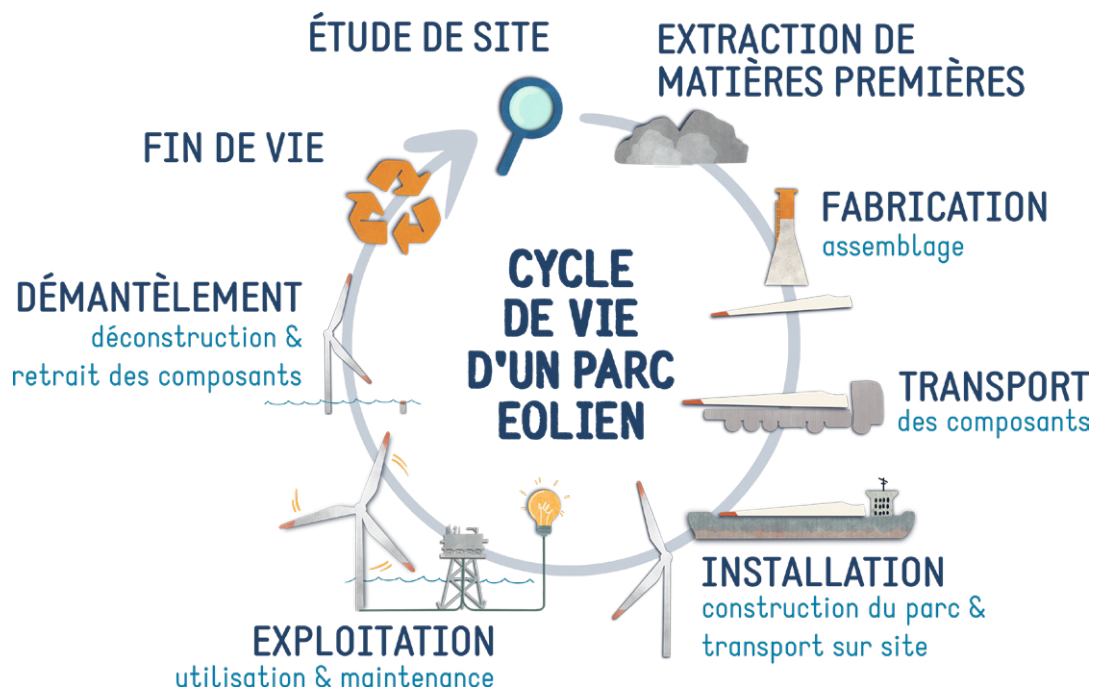
- La technologie et le dimensionnement du parc : nombre, type et taille des éoliennes, fondations ou flotteurs, raccordement en courant continu ou alternatif, technique d'installation, durée de vie, etc. ;
- Le site d'implantation : profondeur de l'eau, distance à la côte, vitesse du vent, etc.

Les **résultats seront donc spécifiques aux choix technologiques** faits pour le parc et aux **caractéristiques géographiques locales**. De plus, chaque étude d'ACV implique des spécificités méthodologiques et des hypothèses qui lui sont propres et qui ont également une influence sur les résultats [1].

Les différentes étapes du **cycle de vie** d'un parc éolien en mer et son raccordement (**Fig. 3**) retenues dans ce bulletin sont issues du projet « LIF-OWI » qui propose une version adaptée des cinq étapes classiquement proposées par les normes ISO 14040 et 14044. Le périmètre d'étude, la fonction et l'unité fonctionnelle sont étroitement liés et peuvent varier en fonction des objectifs de l'étude. Le tableau ci-après propose quelques exemples de configurations pour une ACV environnementale relative à l'éolien en mer (**Tab. 1**).

Périmètres d'étude	Fonction	Unité fonctionnelle
Eolienne	Produire de l'électricité	1 kWh d'électricité produit par une éolienne
Parc éolien	Produire de l'électricité	1 kWh d'électricité produit par un parc éolien de xx MW
Parc éolien + raccordement	Produire de l'électricité et l'acheminer au réseau électrique	1 kWh d'électricité fourni au réseau par un parc éolien de xx MW

Tab. 1 Exemple de configurations de périmètre, fonction et unité fonctionnelle pour réaliser une ACV environnementale d'un parc éolien en mer. D'après [1]



© Siegrid Design

Fig. 3 Etapes du cycle de vie d'un parc éolien posé en mer. D'après les résultats du projet LIF-OWI [19]

Inventaire

Pour réaliser une ACV environnementale, il est nécessaire d'identifier et de quantifier l'ensemble des flux entrants et sortants du système. Cela se traduit par un inventaire qui permet d'identifier et de quantifier l'ensemble des matériaux et sources d'énergies requis pour tous les composants d'un parc éolien en mer (éolienne, fondations, etc.) à toutes les étapes du cycle de vie (de l'extraction des matières premières jusqu'au démantèlement).

L'inventaire des flux entrants (matériaux et énergies hors pièces de rechange et logistique associée - transport, maintenance, etc.) de l'étude Vestas est présenté, comme exemple, dans la **figure 4** [5]. Si la nature des flux varie peu d'un parc à l'autre, **chaque inventaire est spécifique et peut fortement varier en fonction des caractéristiques du parc** : type de fondation, taille des éoliennes, profondeur, etc.

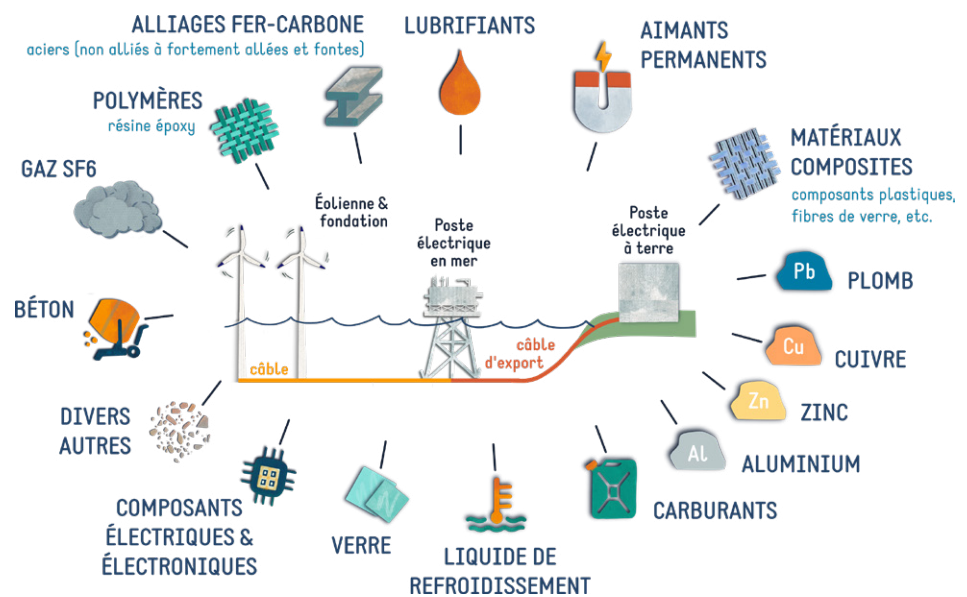


Fig. 4 Synthèse des matériaux utilisés tout au long du cycle de vie du parc éolien en mer de 990 MW sur fondations posées monopieux en mer du Nord et son raccordement. Le gaz SF6 est un gaz artificiel utilisé comme gaz isolant dans les équipements électriques haute tension. D'après les données de l'étude Vestas [5]

En fournissant des données quantifiées, l'inventaire permet de donner un aperçu de la quantité de matière utilisée pour chaque composant (et sous-composant) d'un parc éolien en mer et son raccordement (**Fig. 5**) [1, 5].

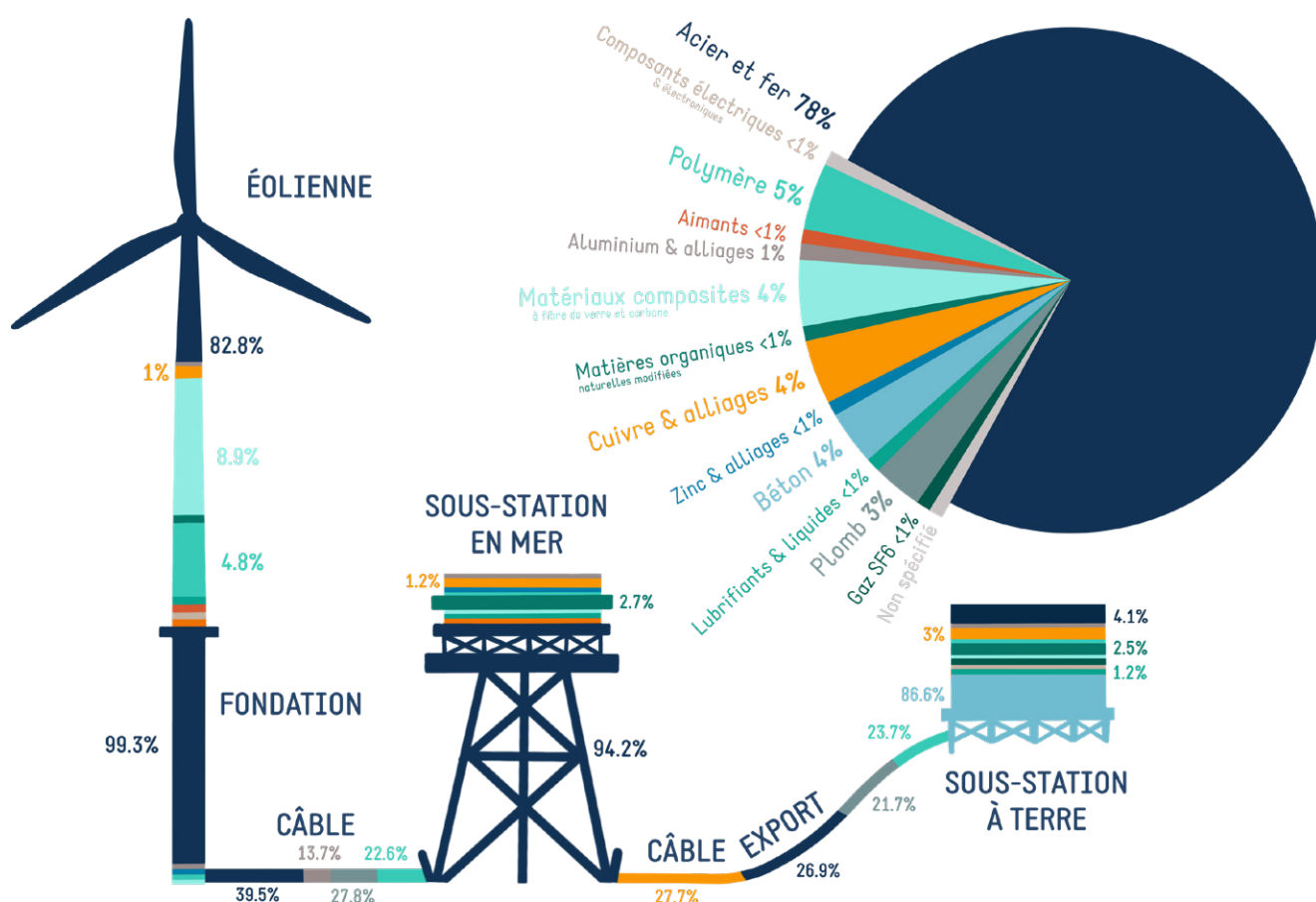


Fig. 5 Exemple de répartition massique des matériaux utilisés par composants et sous-composants du parc éolien en mer posé (fondation monopieux) de 990 MW et son raccordement présenté dans l'étude Vestas. A gauche, la répartition des matériaux par composant (pour l'éolienne par exemple, la répartition des matériaux est donnée à l'échelle de l'éolienne, et non des sous-composants - pales, nacelle, etc.) ; A droite, la répartition massique des matériaux. D'après les données de l'étude Vestas [5]

Qu'en est-il des terres rares utilisées pour les aimants permanents des éoliennes ?

Malgré leurs noms, les terres rares sont relativement abondantes dans la croûte terrestre. Elles ont été nommées ainsi à la fin du 18^e siècle en raison de la difficulté à extraire les minerais à une époque où on les pensait présentes en faible quantité [2, 6, 10]. Les terres rares regroupent 17 éléments métalliques aux propriétés chimiques voisines et aux applications multiples : réduction du volume/poids des moteurs et générateurs électriques, batterie, alliage métallurgique, imagerie médicale, etc. [2]. Très utilisées par les nouvelles technologies (environ 3 g de terres rares dans un smartphone [6]), les terres rares sont utilisées dans les aimants permanents de certains générateurs éoliens pour (i) améliorer les rendements de conversion d'électricité, (ii) réduire le poids des infrastructures et les besoins de maintenance, (iii) allonger la durée de vie des systèmes. Ils sont typiquement composés de trois terres rares (pour 1kg d'aimant permanent) : 29-32 % de néodyme, 3-6 % de dysprosium, <1 % de praséodyme [16]. En moyenne et en fonction des technologies, les générateurs (assurant la transformation de l'énergie mécanique du vent en électricité) utilisés au sein des parcs éoliens contiennent 150 à 650 kg d'aimants permanents par MW de puissance installée [16].

Evaluer les impacts environnementaux

L'évaluation des impacts environnementaux rend compte des catégories d'impacts retenues et évaluées dans le cadre de l'ACV. A cette étape de l'ACV, les outils de modélisation des impacts et les limites associées aux choix méthodologiques et aux conditions d'accès aux données sont également présentés. En France, la réalisation d'une ACV pour les parcs éoliens en mer et leur raccordement est obligatoire dans le processus d'évaluation des impacts sur l'environnement, même si elle n'est pas nécessairement rendue public.

Dans le cas de l'étude Vestas, dont les résultats sont présentés ci-après, la méthode de modélisation est la méthode d'ACV du Centre for Environmental Science de l'Université de Leiden et repose sur l'utilisation du logiciel de traitement Sphera LCA for Experts [5].

Parmi les indicateurs d'impacts retenus dans cette étude, un focus sera fait sur les indicateurs du « changement climatique » et de « l'épuisement des ressources minérales et métalliques » [5].

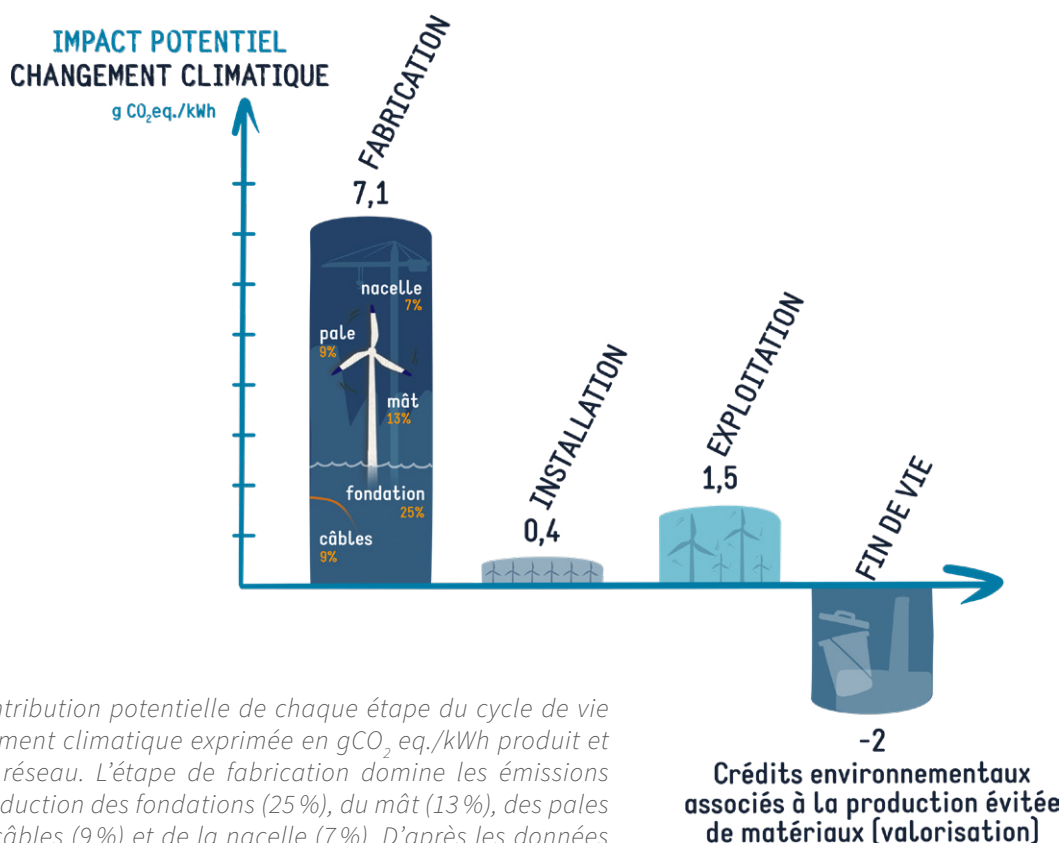
Pour chaque indicateur, les résultats présentés ci-après sont ceux de l'étude Vestas et synthétisent les impacts environnementaux potentiels du parc éolien en mer et de son raccordement estimés pour l'ensemble du cycle de vie par KWh d'électricité livré au réseau.

• Indicateur pour le « changement climatique »

Cet indicateur évalue les impacts potentiels sur le changement climatique en s'intéressant aux effets de réchauffement de la surface de la Terre résultant de l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère. Les impacts sont ainsi mesurés en grammes d'équivalents CO_2 émis ($\text{gCO}_2 \text{ eq.}$). Le parc éolien en mer étudié émet $7 \text{ gCO}_2 \text{ eq./kWh}$ d'électricité produite. L'étape de fabrication domine le cycle de vie. Ces émissions sont majoritairement issues de la fabrication des fondations et du mât de l'éolienne (respectivement 25% et 13%). La phase de fin de vie a également une contribution significative mais négative au résultat final (-22 %) résultant de la production évitée de métaux (fer, acier, cuivre et aluminium notamment) grâce au recyclage (Fig. 6).

7 $\text{gCO}_2 \text{ eq./kWh}$, mais qu'est-ce cela représente ?

Le parc éolien étudié ici contribue au réchauffement climatique à un niveau équivalent à celui d'une centrale nucléaire ($6 \text{ gCO}_2 \text{ eq./kWh}$) [3]. Ces facteurs d'émission varient en fonction des caractéristiques du parc éolien en mer (nombre d'éoliennes, puissance unitaire, durée d'exploitation, etc.). Les émissions de GES des parcs éoliens en mer français varient entre 14 et $18 \text{ gCO}_2 \text{ eq./kWh}$ [17]. Cela reste plus faible en termes d'émissions de GES que des panneaux photovoltaïques ($43,9 \text{ gCO}_2 \text{ eq./kWh}$), qu'une centrale à gaz ($418 \text{ gCO}_2 \text{ eq./kWh}$) ou qu'une centrale à charbon $1058 \text{ gCO}_2 \text{ eq./kWh}$ [3].



© Siegrid Design

Fig. 6 Contribution potentielle de chaque étape du cycle de vie au changement climatique exprimée en $\text{gCO}_2 \text{ eq./kWh}$ produit et injecté au réseau. L'étape de fabrication domine les émissions avec la production des fondations (25%), du mât (13%), des pales (9%), des câbles (9%) et de la nacelle (7%). D'après les données de l'étude Vestas [5]

- **Indicateur pour « l'épuisement des ressources minérales et métalliques »**

Cet indicateur fournit des informations sur la rareté (ou l'épuisement potentiel) des ressources naturelles non énergétiques utilisées au cours du cycle de vie : minerais de fer, aluminium, métaux précieux, etc. Exprimé en masse d'équivalent antimoine (kg.eq.Sb), cet indicateur représente les réserves ultimes de minerais (et non les réserves économiquement mobilisables). Une fois encore, l'étape de fabrication domine l'impact sur le cycle de vie. Cet impact est majoritairement dû à l'utilisation de plomb (55%), d'argent (21%), de cuivre (10%), de zinc (7%) et d'or (5%) principalement utilisés dans les câbles de transport d'électricité. L'étude supposant que les câbles ne seront pas démantelés en fin d'exploitation, ces derniers contribuent assez peu à la phase de recyclage de métaux en fin de vie [5].

Qu'est-ce que l'antimoine ?

L'antimoine est un semi-métal considéré comme épuisable à l'échelle humaine. L'indicateur associé exprime la quantité de matière rare (métaux, minerais, etc.) ou d'énergie (gaz, pétrole, etc.) consommée au cours des différentes étapes du cycle de vie. Si la valeur obtenue est supérieure à 1 (valeur attribuée à l'antimoine par convention), cela signifie que la ressource consommée est plus rare que l'antimoine. C'est le cas de l'or par exemple estimé à 52 kg. eq.Sb (contre 0,0000000524 kg. eq.Sb pour le fer).

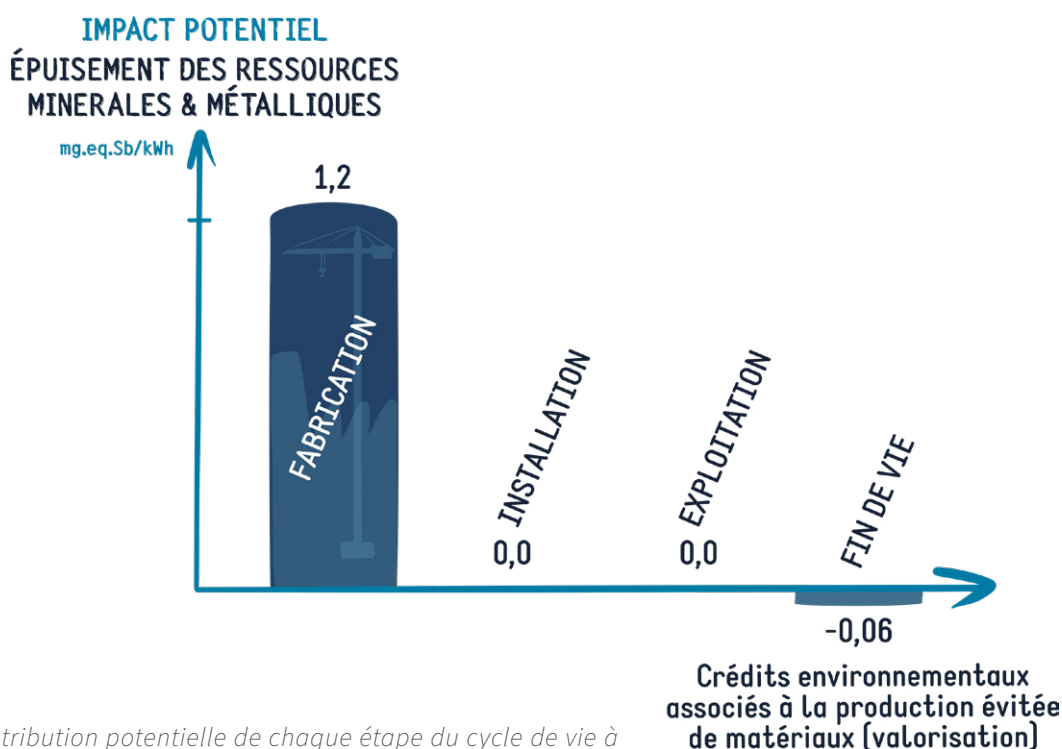


Fig. 7 Contribution potentielle de chaque étape du cycle de vie à l'épuisement des ressources minérales et métalliques exprimée en mg.eq.Sb/kWh produit et injecté au réseau.

Focus sur la valorisation des matériaux

La fiabilité des résultats d'une ACV dépendent de la qualité des données de l'inventaire et des indicateurs utilisés. Pour garantir cette fiabilité, il est important de réaliser des études de sensibilité et de robustesse ainsi qu'une revue critique indépendante. La robustesse de l'estimation des impacts environnementaux de la fin de vie peut pâtir : du manque de connaissances et de données, des difficultés de calculs des impacts potentiels, et des hypothèses concernant l'utilisation des matériaux recyclés pour la fabrication et le degrés de recyclage des matériaux [1].

Les matériaux, produits, infrastructures qui ne remplissent plus la fonction pour laquelle ils ont été produits, sont considérés comme « déchets ». Leur valorisation en fin de vie est donc un enjeu important. Si le recyclage est souvent encouragé, il n'est pas toujours vertueux pour l'environnement si l'on considère l'ensemble du cycle de vie et des impacts environnementaux associés.

Différentes filières de valorisation existent :

- La valorisation énergétique : les matériaux non recyclables sont incinérés
- La valorisation matière : les matériaux en fin de vie sont revalorisés et limitent la consommation de ressources. Il existe plusieurs formes de valorisation matière. Le **réemploi** consiste en la réutilisation sans modification de l'usage initial de ce matériau. La **réutilisation** permet d'utiliser à nouveau ce matériau, mais sans que cela ne corresponde à son usage initial. Enfin, le **recyclage** permet d'utiliser la matière première d'un objet pour en fabriquer un nouveau [8].

• Le cas particulier de la valorisation en fin de vie des parcs éoliens en mer

Le démantèlement est une obligation réglementaire qui impose aux développeurs de parcs et de réseaux de démanteler les infrastructures. En fonction des parcs éoliens, ce démantèlement pourra être total (cas du parc éolien de Fécamp et de ses fondations gravitaires) ou partiel (cas du parc éolien de Courseulles dont seule la partie supérieure des fondations –du fond jusqu'à la surface de l'eau, sera démantelée). Si l'étude environnementale préalable démontre que le démantèlement des câbles aurait des effets négatifs plus importants que leur maintien en place, l'État peut accorder une dérogation [15].

La valorisation énergétique de certains matériaux provenant des parcs éoliens en mer est possible comme les pales en composite par exemple. Ces dernières bénéficient en effet d'un pouvoir calorifique intéressant (environ 15 000 à 25 000 kJ/kg de composite broyé, contre 13 000 à 18 000 kJ/kg pour le bois par exemple) [4].

La valorisation matière est généralement privilégiée et il existe différents retours d'expérience de ce type de valorisation :

• **Réemploi :**

Après démantèlement de deux éoliennes du parc de Blyth en Angleterre, certaines pièces des turbines ont été conservées pour être « réemployées » comme pièces de rechange [9].

• **Réutilisation :**

Plusieurs initiatives et projets de recherche ont été mis en œuvre pour réutiliser les matériaux composites. Le projet RE-Wind a notamment réutilisé des morceaux de pales pour en faire des abris à vélos [25] dans la ville d'Aalborg (Danemark). D'autres proposent de réutiliser les pales comme éléments structuraux de géotechniques – fondations, murs de soutènement, etc. [11].

- **Recyclage en fin de vie :**

On distingue le recyclage en fin de vie de celui qui est mené en amont, dès la phase de construction et se traduit par l'utilisation de matériaux recyclés. Pour de nombreux matériaux utilisés au sein des parcs éoliens en mer, comme le cuivre ou l'aluminium, les modalités de recyclage sont maîtrisées et les filières associées bien connues. En revanche, pour certains matériaux comme le béton ou l'acier, le contexte marin rend le recyclage des matériaux plus complexe. Le recyclage du béton terrestre [24] et de l'acier est couramment utilisé. Ce n'est pas le cas du recyclage du béton chloré ou de l'acier corrodé par l'eau de mer, dont la problématique de recyclage est différente. Dans certains cas, laisser les fondations (béton et acier) déjà colonisées par les espèces marines peut être une solution acceptable et moins impactante pour l'environnement qu'une décontamination suivie d'un recyclage. De plus, pour les matériaux composites (époxy, fibre de verre, etc.) les procédés de recyclage ne sont pas encore totalement maîtrisés [1].

- **Utilisation de matériaux recyclés :**

Le recyclage peut également être considéré par le prisme des matériaux recyclés qui, eux, vont être pris en compte dans l'ACV dès l'étape de fabrication. Cette possibilité varie en fonction des matériaux et requiert une qualité équivalente au matériau qui aurait été utilisé par défaut. Dans le cas des ressources minérales et métalliques comme le cuivre par exemple, l'utilisation de matériaux recyclés permet de réduire fortement les impacts de l'étape de fabrication (en particulier sur les émissions de GES) et modifie de façon significative les résultats d'une ACV. Si les processus de recyclage peuvent avoir des impacts environnementaux importants (notamment une augmentation des résultats des indicateurs liés aux pollutions atmosphériques, à l'acidification ou à l'eutrophisation des milieux aquatiques), ils restent généralement inférieurs aux impacts générés par la fabrication d'un matériau vierge, en particulier dans le cas des ressources minérales et métalliques. Pour certains matériaux, notamment ceux issus d'une ressource épuisable, l'utilisation de matériaux recyclés est une nécessité. C'est le cas par exemple de l'or, de l'argent ou du cuivre qui présentent des enjeux de criticité élevés ou du sable et de l'eau pour le béton. Le recyclage permet alors de préserver les ressources et d'éviter l'exploitation de gisements potentiellement plus difficiles d'accès induisant des coûts non négligeables d'un point de vue économique, social et environnemental [1]. Par ailleurs, certains développeurs sont en mesure de proposer des pales recyclables comme les modèles Siemens Gamesa [26] utilisées notamment pour le parc éolien en mer de Courseulles-sur-mer [23].

Limites

L'ACV est un bon outil pour identifier les impacts potentiels d'un système et tenter de les réduire au travers notamment de l'écoconception. Cependant, comme tout exercice de modélisation, la réalisation d'une ACV environnementale présente des limites :

- **Incertitudes et manque de données :**

Malgré l'existence de bases de données dédiées à l'ACV (comme Ecoinvent, Exiobase, Impacts ou ELCD à l'échelle européenne), l'accès à l'ensemble des données requises pour l'ACV reste compliqué, en particulier lorsqu'il s'agit de données d'origine industrielle (souvent confidentielles) ou de données déjà agrégées. Le manque de données disponibles oblige à formuler des hypothèses et à effectuer des simplifications, ce qui peut accentuer les incertitudes liées à l'utilisation de l'ACV [21].

- **Robustesse des hypothèses et des choix méthodologiques :**

Chaque ACV environnementale est assortie d'une présentation de la méthode employée qui détaille l'ensemble des choix et des hypothèses retenues pour réaliser l'analyse (logiciel utilisé, indicateurs retenus, etc.) [1]. Il s'agit d'un exercice qui doit tenir compte de la complexité des systèmes étudiés et qui requiert de nombreuses données [1, 21]. L'exploitation des résultats d'une ACV, même si elle a été soumise à une revue critique, est donc limitée par les hypothèses émises et les choix méthodologiques effectués.

- **Faible prise en compte de la spatialisation des impacts et de la biodiversité :**

L'ACV environnementale est un bon outil pour estimer les impacts potentiels dits « globaux ». En revanche, elle est peu adaptée à la prise en compte des impacts potentiels à petite échelle (impacts locaux). Faute d'indicateurs scientifiquement robustes, elle ne considère pas encore l'ensemble des impacts environnementaux potentiellement identifiés sur la biodiversité. Elle ne tient pas compte des effets du bruit ou de la pollution lumineuse, par exemple [1, 5]. Par ailleurs, les impacts potentiels sont plus difficiles à modéliser à certaines étapes du cycle de vie que d'autres. C'est notamment le cas de l'étape « fin de vie » pour laquelle le manque de connaissances précises ou de filières clairement définies complique l'évaluation des impacts potentiels [1].

D'une manière générale, l'ACV propose une comparaison entre le système évalué et une situation de référence (un autre système équivalent, un système similaire mais éco-conçu, etc.). Appliqué à la production d'énergie, elle permet de comparer différentes technologies de production (parcs éoliens vs nucléaire par exemple, ou parc éolien posé vs flottant). L'approche multicritère et multi-étape de l'ACV environnementale ne dispense pas d'une analyse critique des résultats pour la prise de décision [14]

Conclusion

L'ACV environnementale permet d'étudier les impacts environnementaux potentiels d'un système de façon globale. En considérant l'ensemble des étapes du cycle de vie d'un système, elle permet :

- D'évaluer un système d'un point de vue environnementale en identifiant les étapes les plus impactantes pour l'environnement et les potentiels transferts d'impacts quelles que soient leurs natures (d'une étape du cycle de vie à une autre, d'un indicateur d'impact à un autre).
- D'informer et d'aider à la prise de décision en apportant notamment des informations utiles pour la comparaison de deux systèmes à finalité identique (deux modes de production d'énergie ayant la même unité fonctionnelle par exemple).
- D'écoconcevoir en encourageant l'introduction de matériaux recyclés ou le remplacement de certains matériaux par d'autres moins impactants à différentes étapes du cycle de vie.

L'ACV environnementale est un outil normé (ISO 14040 et 14044) dont les résultats sont à considérer dans les limites exposées dans ce bulletin (cadre de l'étude, hypothèses et choix méthodologiques opérés, qualité et accessibilité des données, etc.) mais reste le meilleur outil pour évaluer les impacts environnementaux d'un système sur l'ensemble de son cycle de vie. Pour réduire les impacts de la production d'énergie sur l'environnement, l'utilisation de matériaux plus vertueux et la mise en œuvre de mesures de sobriété énergétique sont à encourager.

Bibliographie

- [1] Paroles d'experts, (2024) : Ateliers COME3T du 04/06/2024, 14/06/2024, 10/07/2024 et du 18/09/2024 en présence de Stéphanie Bonnet (Nantes Université), Juan Creus (Univ. de La Rochelle), Mike Nunes (Evea), Laurélène Rincé (Cerema), Patrick Rousseaux (Univ. de Poitiers), Joanna Schlesinger-Martinat (École des mines de Paris). Coord. S. Henry (FEM).
- [2] ADEME, (2019) : Terres rares, énergies renouvelables et stockage d'énergie. Fiche technique de l'ADEME., 12p
- [3] ADEME, (2024) : Base Carbone. Documentation des facteurs d'émissions de la Base Carbone®. Version 23.4.0. 16/11/2024, 426p.
- [4] Alexandre S., Follenfant P., Legait B., (2019) : Economie circulaire dans la filière éolienne terrestre en France. Rapport à Monsieur le ministre d'Etat, ministre de la transition écologique et solidaire. Conseil général de l'environnement et du développement durable et Conseil général de l'économie, de l'industrie, de l'énergie et des technologies. 88p.
- [5] Allekotte L., Garrett P., (2024) : Life Cycle Assessment of electricity production from an offshore V236-15 MWTM wind plant. Vesta, V1 :1, 124p.
- [6] BRGM, (2022) : Les terres rares. Dossier Enjeux des géosciences, 12p.
- [7] Cycléco, (2015) : Analyse du cycle de vie de la production d'électricité d'origine éolienne en France. Rapport final. ADEME, 93p.
- [8] Desqueyroux H., André J., (2018) : Recyclage et réutilisation. Environnement, Risques & Santé, Vol. 17(2), 189-190.
- [9] DGEC, (2023) : Bilan carbone et recyclage d'un parc éolien en mer. Fiche 41. Dossier du maître d'ouvrage, débat public relatif à la planification de l'espace maritime. 5p.
- [10] Guilhaudis, J.F., Fontanel, J., (2021) : Les " terres rares " et autres matériaux critiques et stratégiques, au cœur des conflits de demain ? Paix et sécurité européenne et internationale, 2021, 16, 10.61953/psei.1365. hal-03294026.
- [11] Halicka A., Buda-Ozog L., Jablonki L., Jurek M., Jakubiak N., Jablonski W., (2024) : Concepts of reusing wind turbine blades in civil engineering constructions. In. Civil and environmental engineering reports. E-ISSN 2450-8594, 10p.
- [12] ISO, (2006). ISO 14040. Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework (Second edition, 2006-07-01). Geneva, Switzerland / ISO, (2006a). ISO 14044. Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines (First edition, 2006-07-01). Geneva, Switzerland.
- [13] ISO, (2014a). ISO/TS 14071:2014. Environmental management -- Life cycle assessment -- Critical review processes and reviewer competencies: Additional requirements and guidelines to ISO 14044:2006. Geneva, Switzerland.
- [14] Larrieu C., (coord.) (2023) : La France face aux neuf limites planétaires. Guide THEMA du Service des Données et Etudes Statistiques (SDES) du Ministère de la Transition Ecologique et de la Cohésion des Territoires., 86p.
- [15] Ministère de la Transition écologique et solidaire, (2019) : Le démantèlement d'un parc éolien en mer - Fiche technique n°10. Débat public, Dossier du maître d'ouvrage, 4p.
- [16] Ministère de la Transition écologique, (2021) : Cycle de vie d'une éolienne en mer posée : de la construction au recyclage - Fiche technique n°11. Débat public, Dossier du maître d'ouvrage. Sept2021-Jan2022, 4p.
- [17] Ministère de la Transition écologique, (2021) : Quel est le bilan carbone d'un parc éolien flottant - Fiche technique n°11. Débat public « éoliennes flottantes en Méditerranée et leur raccordement », Dossier du maître d'ouvrage, 4p.
- [18] Ministère de la Transition écologique et solidaire, (2023) : Stratégie française pour l'énergie et le climat, Programmation pluriannuelle de l'énergie 2019-2023 ; 2024-2028, 400p.
- [19] Pérès-Lopez P., Jolivet R., Schlesinger J., Sansa M., (2023) : Definition of a methodological framework for the environmental analysis of Offshore Wind Farm projects (Final version). LIF-OWI – WP2, Task2.4-D4.2.1., 25p.

[20] RTE, (2023) : Bilan électrique 2023, rapport complet, 157p.

[21] Rousseaux P., (2022) : Analyse du cycle de vie (ACV) : Présentation, méthodologie, applications et limites. Techniques de l'Ingénieur, G5500V2, 2022, pp. 1-14.

Sitographie

[22] Commission Européenne, Méthodes d'empreinte environnementale – Calcul de l'impact environnemental des produits et services : https://green-business.ec.europa.eu/environmental-footprint-methods_en [consulté en octobre 2024].

[23] Parc éolien du Calvados : <https://www.parc-eolien-en-mer-du-calvados.fr/> [consulté en octobre 2024].

[24] RecyBeton, Le recyclage complet des bétons : <https://www.pnrecybeton.fr> [consulté en novembre 2024].

[25] Repurposing Wind Blades project, Re-Wind : <https://www.re-wind.info/> [consulté en octobre 2024].

[26] Siemens Gamesa, Renewable energy : <https://www.siemensgamesa.com/global/en/home/explore/journal/recyclable-blade.html> [consulté en octobre 2024].

[27] UVED, Méthodologie de l'analyse du cycle de vie (ACV) : https://acvbat.uphf.fr/chap03/co/ch03_010_acv.html [consulté en octobre 2024].



COME3T est une initiative qui réunit un ensemble d'acteurs nationaux et régionaux (universités, industriels, bureaux d'études, régions, services de l'État, etc.) au sein d'un comité de pilotage qui soumet des questions, issues des interrogations du public et des principaux enjeux environnementaux et socio-économiques identifiés par les acteurs, à des comités d'experts neutres et indépendants. Pour chaque thématique, un comité d'experts est constitué suite à un appel à candidature et apporte des éléments d'information, de synthèse et de recommandation sur les enjeux environnementaux et socio-économiques des énergies marines renouvelables.

<https://www.france-energies-marines.org/projets/come3t/>

Une initiative coordonnée par France Energies Marines.



France Energies Marines est un centre de recherche et d'innovation sur l'éolien en mer à l'impact industriel, économique et sociétal reconnu en France et à l'international. Sa mission ? Lever les verrous auxquels est confronté le secteur de l'éolien offshore. Soutenu par l'Etat, porté par une équipe multidisciplinaire de plus de 90 collaborateurs, un réseau d'experts internationaux et des infrastructures uniques, l'Institut mène des projets de recherche multi-partenariaux guidés par l'excellence. Les résultats qui en découlent sont transférés à la filière sous la forme de prestations de recherche et d'expertise, de licences d'exploitation, de transfert de savoir-faire, ainsi que de participation à des comités d'experts et des réseaux. L'un des quatre programmes de recherche structurant ses activités est dédié à l'intégration environnementale et sociétale des parcs éoliens en mer.



Bâtiment Cap Océan
Technopôle Brest Iroise
525, Avenue Alexis De Rochon
29280 Plouzané
02 98 49 98 69
www.france-energies-marines.org

ISSN 2743-6896



9 782493 115461

© France Energies Marines - 2025