

Cycle de vie des éoliennes : tout sauf du vent

Élève de l'ENS Paris-Saclay, Louis Védrine, lors de sa première année en Sciences pour l'Ingénieur (année SAPHIRE) a suivi le parcours « Ingénierie civile ». Dans ce cadre les élèves ont, sur un thème imposé, à réaliser un état de l'art, un mémoire et à présenter une courte leçon. Cette ressource est issue de ce dossier.

L'éolien, par son indépendance face aux fluctuations des cours des énergies fossiles, mais aussi par son avantage écologique, s'est imposé dans le paysage des énergies renouvelables français. Au dernier semestre 2019, il représentait une part de 7% dans le MIX français (figure 1) [1]. L'éolien est une source d'énergie intermittente, ses fluctuations sont mensuelles et journalières, ainsi sa production varie au cours du temps (figure 2).

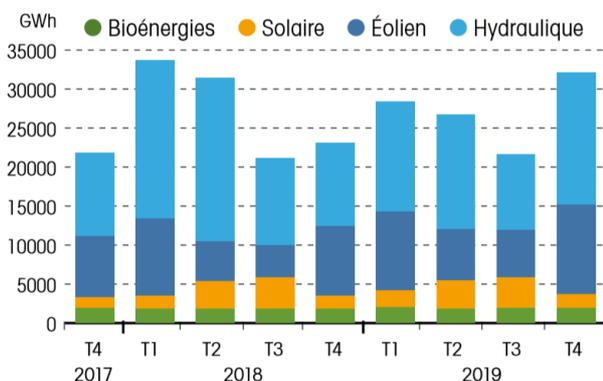


Figure 1 : Production renouvelables trimestrielles, source [1]

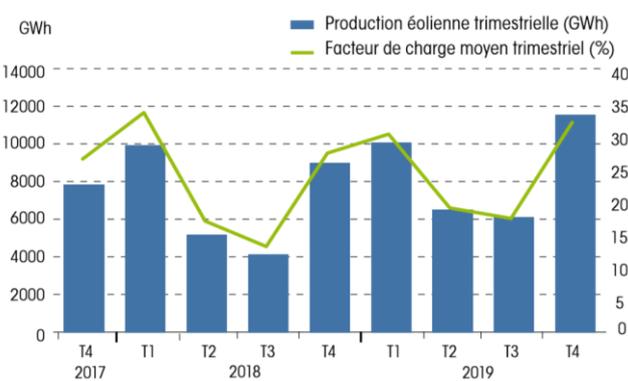


Figure 2 : Production éolienne et facteurs de charge trimestriels, source [1]

Depuis les années 2000, le parc éolien a constamment grandi, avec une accélération progressive entre 2004 et 2008 de la puissance raccordée par an (figure 3). Vingt ans après l'installation des premières éoliennes, les premiers démantèlements commencent, ce qui nous amène à analyser leurs cycles de vie.



Figure 3 : Évolution de la puissance éolienne raccordée [MW], source [1]

Cette ressource présente une étude de cycle de vie du parc éolien terrestre français en parcourant quatre points : définition du champ d'étude, analyse des flux entrants et sortants, évaluation des impacts potentiels et interprétation des résultats en fonction des objectifs retenus.

1 – Cycle de vie

L'analyse du cycle de vie (ACV), permet d'évaluer les impacts environnementaux d'un produit au cours de ses différentes phases de vie. Il tient compte de l'extraction des matières premières et de l'énergie mise en jeu, de la transformation des matières premières et de la fabrication, du transport, de la distribution, de l'utilisation et du recyclage en fin de vie (figure 4).

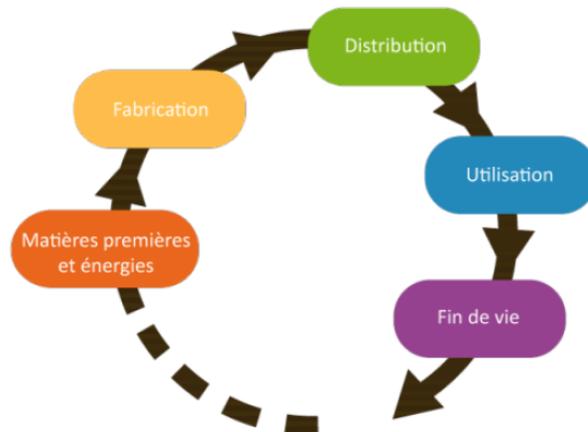


Figure 4 : Cycle de vie d'un produit, source [2]

La méthodologie de l'analyse du cycle de vie s'articule autour de quatre étapes [2]:

- Étape 1, définir la cible et les objectifs de l'ACV, le champ d'étude ;
- Étape 2, inventaire de cycle de vie (ICV), analyse des flux entrants et sortants ;
- Étape 3, évaluation des impacts potentiels à partir des analyses des flux ;
- Étape 4, interprétation des résultats obtenus en fonction des objectifs retenus.

Cette méthodologie est celle utilisée pour l'analyse présentée dans la suite de cette ressource.

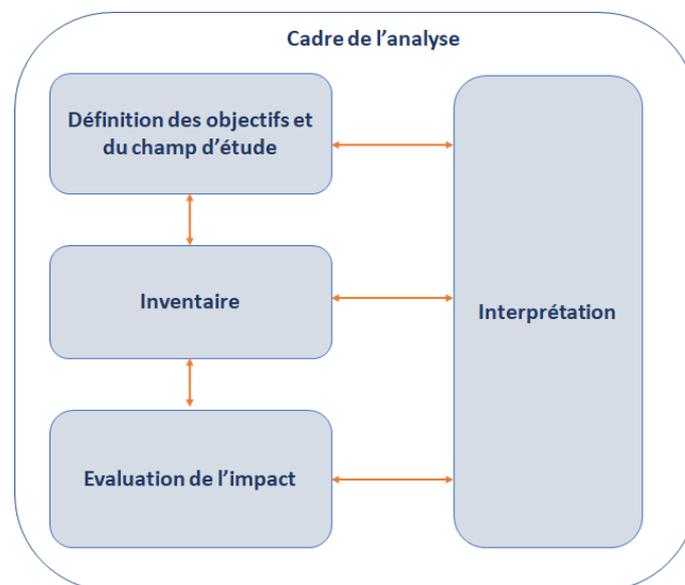


Figure 5 : Méthode de l'analyse du cycle de Vie (ACV)

2 – Facteurs d'étude

Cette étude porte sur l'analyse du parc éolien français existant. Nous nous intéresserons uniquement à l'éolien terrestre. Les chiffres exposés sont majoritairement tirés du rapport de l'ADEME sur l'ACV des éoliennes en 2015 [3].

Afin de voir l'impact de l'éolien sur son environnement extérieur, nous regarderons plusieurs facteurs répartis dans trois catégories : l'efficacité énergétique, l'indicateur de flux et la catégorie d'impact.

2.1 - Catégories d'impacts

- Changement climatique, émission de CO₂ :
 - Indicateur : les émissions des gaz à effet de serre (GES) sont données en kg équivalent CO₂/kWh ;
 - Effet : les GES absorbent les radiations infrarouges émises par la terre ce qui tend à augmenter la température terrestre, un des problèmes majeur de ce siècle.
- Acidification :
 - Indicateur : exprimée sur la base du nombre d'ions hydrogène H⁺ ;
 - Effet : elle peut impacter aussi bien l'eau que les sols, elle se manifeste par des pluies acides.
- Utilisation des sols :
 - Indicateur : mesure en kg carbone déficit, ce qui correspond au carbone qui ne sera pas capturé par le sol à cause de la transformation qu'il a subi ;
 - Effet : les sols jouent un rôle essentiel pour le climat (figure 6), en effet, ils sont la troisième zone de captage de carbone et cette zone est la plus impactée par les activités de l'homme. Ainsi les surfaces artificialisées ou imperméabilisées ne jouent plus leurs rôles. Mais c'est aussi une perte pour l'agriculture, essentielle pour l'alimentation [4].

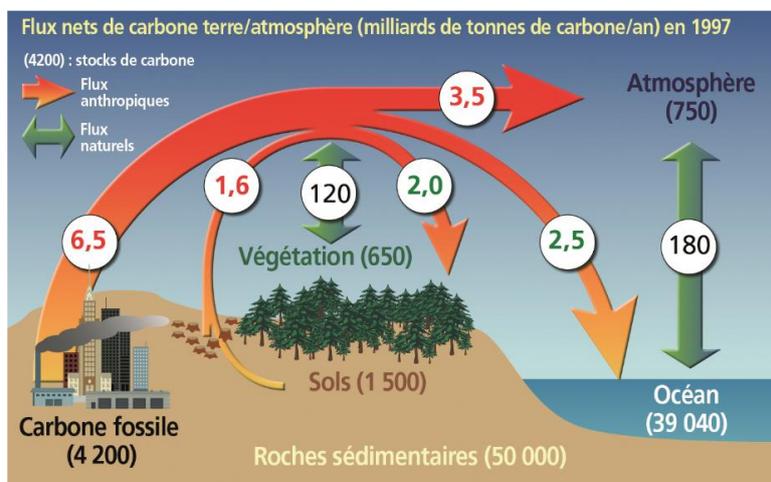


Figure 6 : Flux de carbone, source [4]

2.2 - Indicateurs de flux

- Consommation d'eau :
 - Indicateur : caractérise la consommation globale d'eau
 - Effet : la ressource en eau se raréfie dans certaines régions du monde et sa préservation est un enjeu.
- Indicateur de déchets :
 - Cet indicateur regroupe les déchets de type vrac, dangereux et radioactifs.
- Demande cumulée en énergie non renouvelable (DCE non renouvelable) :

- Quantité d'énergie non renouvelable utilisée, qui ne sera pas renouvelée à notre échelle de temps.

2.3 - Efficience énergétique

- Retour énergétique :

C'est le temps (en mois) que la turbine a mis pour produire la quantité d'énergie qu'elle a consommée au cours de son cycle de vie, indique en combien de temps l'installation est rentabilisée.

$$\frac{DCE}{\text{Energie produite en un mois}}$$

- Facteur de récolte :

Permet de savoir le nombre de fois où le système est amorti, i.e. le nombre de fois que la turbine produit la quantité d'énergie qu'elle a consommé au cours de son cycle de vie.

$$\frac{\text{Energie total produite}}{DCE}$$

3 – Description d'une éolienne

Une éolienne est composée de quatre éléments principaux (figure 7) :

- Le rotor composé de pales, qui permet de convertir l'énergie cinétique en énergie mécanique ;
- La nacelle, qui différencie le plus les constructeurs, est le lieu de la conversion électromécanique, on retrouve l'arbre-multiplicateur, la génératrice et le transformateur ;
- Le mât, qui supporte la nacelle et le rotor ;
- Les fondations, qui permettent d'ancrer l'éolienne au sol.

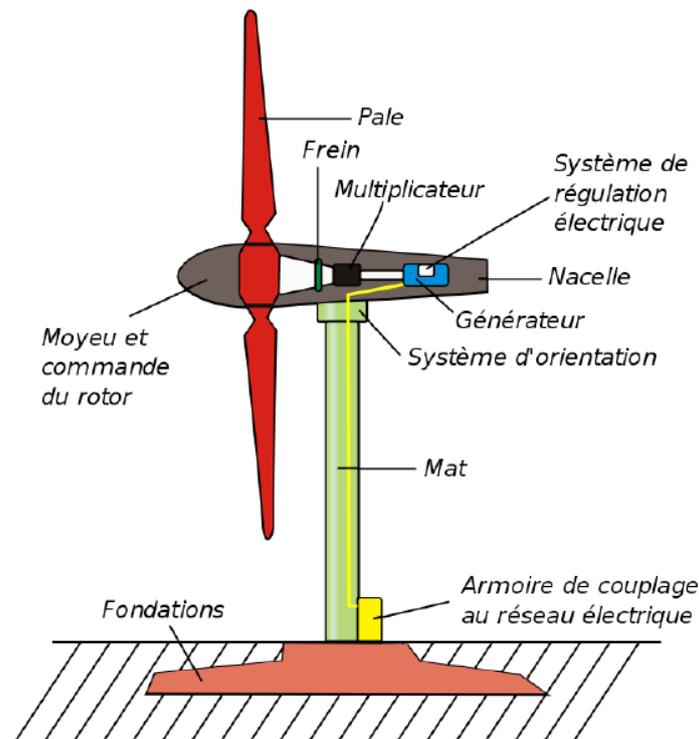


Figure 7 : Élément d'une éolienne, source [5]

4 – Production et fabrication des composants

En moyenne, pour chaque mégawatt de puissance installée, un aérogénérateur nécessite 169 tonnes de métaux divers et 455 tonnes de béton et de ferrailles pour les fondations [3]. Nous allons regarder la composition de chaque partie de l'éolienne.

4.1 - Rotor

Composants	Matériaux	Pourcentage massique du rotor
Pales	Fibre de verre ou de carbone	55%
Moyeu	Acier (fonte)	40%
Nez et éléments des pales	Acier et fibre de verre	Moins de 1%
Autres		4%

Tableau 1 : Composants dans le rotor, source [3]

4.2 - Nacelle

Composants	Matériaux	Pourcentage massique du rotor
Arbres, roulement principal frein mécanique, multiplicateur générateur	Acier, cuivre ou aimant permanent	55%
Ensemble cadre-châssis- carénage	Acier inoxydable ou fonte pour les parties du support métallique et plastique renforcé de fibre de verre pour les protections	30%
Système d'orientation	Acier	5%
Transformateur	Acier et cuivre	8%
Autres		2%

Tableau 2 : Composants dans la nacelle, source [3]

La génératrice est l'élément qui diffère le plus entre les diverses technologies d'éoliennes. La vitesse de rotation du rotor étant relativement faible, il y a deux grandes familles de chaîne de conversion électromécanique [6] :

- Celles à entraînement direct nécessitant une génératrice de plus grande taille et coûteuse, dans ce cas la machine utilisée est obligatoirement synchrone avec un grand nombre de paires de pôles ;
- Celles à multiplicateur de vitesse, permettant d'utiliser des génératrices électriques peu coûteuses et légères, grâce à une vitesse de rotation beaucoup plus élevée que celle de la turbine.

Les machines synchrones peuvent être à rotor bobiné ou à aimants permanents.

Les aimants actuellement utilisés sont de type néodyme-fer-bore (NdFeB) qui utilise deux terres rares¹ : le néodyme et le dysprosium.

¹ Les terres rares désignent 17 métaux : le scandium, l'yttrium et les quinze lanthanides. Ces matières minérales aux propriétés exceptionnelles sont utilisées dans la fabrication de produits de haute technologie [7]

4.3 - Mât

Il y a deux types de mâts :

- En acier dans 88% des modèles ;
- En béton (figure 8), on retrouve cette technologie sur un type de modèle. La fin du mât est obligatoirement en acier pour simplifier la liaison avec la nacelle [8]. Les avantages sont :
 - mécaniques, pour les mâts de très grande hauteur ;
 - logistiques, car les unités de production nécessitent des techniques moins complexes et sont plus proches des parcs éoliens, ce qui facilite le transport jusqu'au site.



Figure 8 : Éolienne avec un mât en béton, source Enercon

4.4 - Les fondations

Pour une éolienne d'une puissance de 3MW, les fondations ont un diamètre de 20 mètres et une profondeur d'environ 3 mètres. On retrouve ainsi 800 tonnes de béton armé, 40 tonnes d'acier et 400 tonnes de terre recouvrant le radier (figure 9), ce qui correspond à la consommation en béton d'un immeuble de 12 appartements. Les fondations dépendent énormément de la nature du sol, du vent et de la présence de nappe d'eau [8].



Figure 9 : Fondations d'éolienne, source [8]

5 – Phase chantier et installation de la centrale

5.1 - Le transport : de l'usine de fabrication jusqu'au site d'installation

L'impact du transport varie beaucoup car il dépend du site de fabrication du constructeur. Le transport des composants jusqu'à l'usine d'assemblage correspond en moyenne à une distance de 600km et l'acheminement jusqu'au site correspond aussi à une distance en moyenne de 600 km [3].

5.2 - Consommation énergétique liée à l'assemblage de l'éolienne

Une part de l'énergie est utilisée pour assembler l'éolienne sur ses fondations et pour fixer à l'aide de grues les pales sur le rotor.

5.3 - Consommation de terre

Les pistes d'accès représentent une part importante de la consommation de terres.

Les sites éoliens sont souvent éloignés des infrastructures existantes, dû à l'obligation d'une distance de 500 m des habitations et l'interdiction de surplomber les espaces publics tels que les routes.

La création de voies d'accès dédiées est souvent essentielle. Pour transporter des mâts pesant jusqu'à 150 tonnes et des pales de plus de 50 m de long [8], il faut une piste de 5m de largeur et d'une faible courbure dans les virages (figure 10). Ces pistes sont réalisées avec un mélange de graves concassées.

Les aires d'assemblage et de hissage des pales représentent aussi une part de la consommation de terre. Cependant, il existe des solutions comme assembler en l'air les pales du rotor, ce qui permet la réduction de l'emprise au sol.



Figure 10 : Voies d'accès et aires de levage, source [16]

La consommation de terre est donc de 0,5 hectare par éolienne [8].

6 – Phase de vie

6.1 - Production

Production annuelle en énergie [kWh] = $N \times L \times P$

Avec :

- $N = 8760$ h, le nombre d'heures en une année ;
- L , le facteur de charge, c'est l'énergie effectivement produite divisée par l'énergie correspondant à la production maximale possible ;
- P , la puissance nominale de l'éolienne, en kilowatt.

6.2 - Maintenance

Selon le rapport de l'ADEME [3], au cours de la vie de l'éolienne, en moyenne 15% de la nacelle et une pale sont changées. Le transport pour la maintenance reste le même que lors de la phase de construction.

7 – Recyclage des éoliennes

Le recyclage devient un enjeu important et crucial, un pic de démantèlement sera atteint en 2030 en raison de la durée de vie de 20 ans des installations.

7.1 - Garanties et responsabilités

Lors du démantèlement d'un site la loi impose l'enlèvement des câbles enfouis, la remise en place du terrain et l'excavation du terrain sur 1m dans le cas de terrain agricole. Sauf avis contraire du propriétaire des lieux, les chemins et les aires devront être déconstruits [9].

La loi impose aussi des garanties financières de la part du constructeur, afin d'éviter d'avoir des éoliennes désaffectées dans la campagne française.

L'état estime à 50 000 € le coût par éolienne, confirmé par les premiers démantèlements. La revalorisation et la vente de l'acier des mâts, des câbles d'aluminium et de cuivre apportent un soutien financier au prestataire, l'acier est vendu à 140 €/tonne [10].

7.2 - Matériaux

Le mât

Étant composés de ferrailles de fer, ils sont très bien revendus en vue d'un recyclage car l'acier et l'aluminium se recyclent entièrement et indéfiniment.

La génératrice

Comme vu précédemment 3% du parc éolien français est à entraînement direct et utilise des terres rares présentes dans les aimants. Pour l'instant, aucune usine de traitement des aimants permanents n'existe à cause du faible volume.

Les pales, le rotor, la nacelle et le moyeu

Ils sont constitués de composites de résine de fibres de verre et de carbone difficiles à recycler, et pourtant de plus en plus utilisés dans l'aéronautique et les loisirs nautiques. Ces matières représentent 8% du poids total de l'éolienne [10].

Ce sont les pales qui ont les plus grandes quantités de fibre, elles sont soit :

- En fibre de verre, elles peuvent être broyées et valorisées sous forme de combustible dans l'industrie du ciment en remplacement des carburants fossiles et les cendres peuvent ensuite être utilisées dans la fabrication du ciment, il n'y donc pas de production de déchets. L'Université de Washington a mis au point un nouveau matériau composite fabriqué à partir de broyat de pale, nommé Ecopolycrete. Ce produit très résistant pourrait avoir beaucoup d'applications ;
- En fibre de carbone, elles peuvent être valorisées par des procédés tels que la pyrolyse ou la solvololyse.

D'autres vies sont aussi possibles pour les pales. Elles prennent parfois le chemin de la Pologne ou de la Russie pour y poursuivre une seconde vie, ou comme aux Pays-Bas être réutilisées dans l'espace public (figure 11 et 12).



Figure 11 : Pales utilisées dans un jardin d'enfants, source [9]



Figure 12 : Pales utilisées dans l'espace public, source [9]

Le point noir est que le recyclage s'avère aujourd'hui peu existant, la filière a du mal à se mettre en place (figure 13).



Figure 13 : Pales d'éolienne enterrées sur place, source [17]

Les fondations

Les fondations sont détruites en multiples blocs au brise-roche afin d'être évacués. Le béton démolé sera transporté vers un centre de traitement adapté pour être ensuite concassé et séparé de la ferraille.

Le plus souvent, le béton est valorisé en sous-couches routières et en remblais dans les travaux publics, en effet, contrairement aux centrales nucléaires le béton est sain et peut être utilisé sans danger. La terre recouvrant les fondations servira à combler l'excavation de terre végétale [11].

Des pistes d'amélioration

- Fondations innovantes

Le gain de masse avec une optimisation semble marginal, il reste deux solutions [8] :

- Des fondations en étoile : cela permet d'augmenter la surface de contact avec le sol mais le coût du coffrage et de la mise en place des armatures sont plus élevés ;
 - Des fondations pieu : ce type de fondation permet de réduire l'excavation et de diminuer de 40% les besoins en béton, mais ce type de fondation reste plus coûteux.
- Réutilisation des fondations et optimisation des sites d'implantation

Actuellement, cette solution n'est pas possible, les éoliennes de première génération n'ont pas été conçues pour. Il est très difficile d'évaluer l'endommagement des installations, de plus la taille des rotors a énormément augmenté avec la multiplication par trois des puissances installées ces dernières années.

Cependant, la hauteur actuelle des éoliennes a plafonné ces dernières années, ainsi il serait possible de concevoir des fondations et des mâts pouvant durer une quarantaine d'années. Pour encourager cette démarche, l'obligation d'excavation complète des massifs d'ancrage est demandée par les associations.

7.3 - Perspectives et solutions

Sous le constat qu'il n'y a pas de filière actuellement en place, il y a une nécessité de créer une filière pour le recyclage des pales d'éoliennes, du démontage au traitement en passant par la collecte et le transport. La recherche dans le recyclage des pales paraît essentielle, avec peut être la création de nouvelles résines [11].

Dans cette voie, Veolia a mis au point une scie à pales d'éoliennes, qui découpe en petits morceaux les pales sur place, afin de rendre leur transport plus aisé.

8 – Évaluation des impacts

8.1 - Changement climatique, émission de CO₂

D'après le rapport de l'ADEME [3], le taux d'émission du parc Éolien Français est de 12,7gCO_{2,eq}/kWh (figure 14). Il affiche les émissions les plus faibles avec l'énergie hydro-électrique, ce qui conforte l'éolien comme une filière de production d'énergie fortement décarbonée.

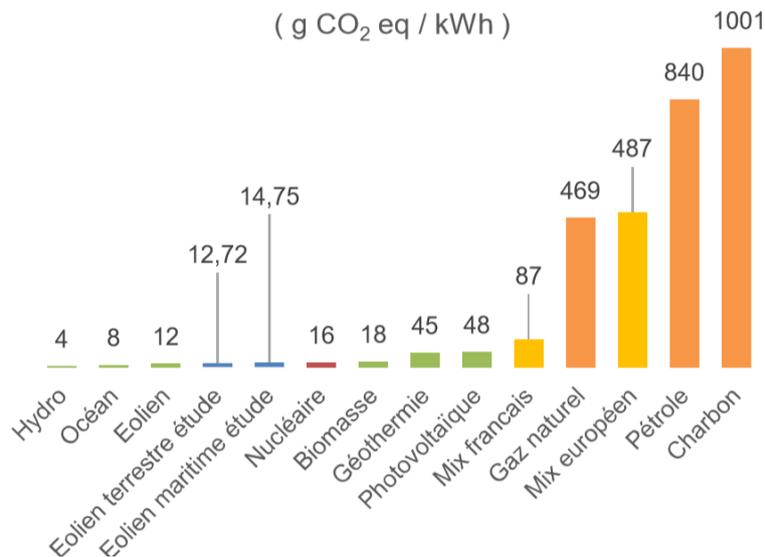
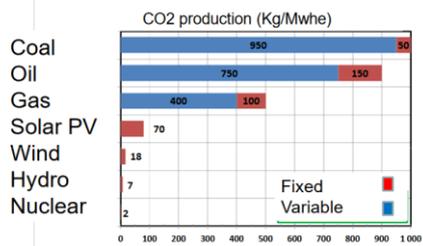


Figure 14 : Émissions de CO₂ par kilowattheure des différentes énergies, source [3]

Sur les (figures 15 et 16), on peut voir la décomposition des émissions fixes et variables de dioxyde de carbone des différentes filières d'énergie française. Ces deux schémas nous montrent que l'éolien n'émet pas de CO₂ directement lié à la production d'énergie mais juste des émissions fixes d'une dizaine de CO_{2,eq}/kWh liées à sa phase de vie.



Ref. H. Safa, CEA.

Same formalism fixed-variable for CO2 production.

Figure 15 : Bilan carbone des sources d'énergie d'après le CEA

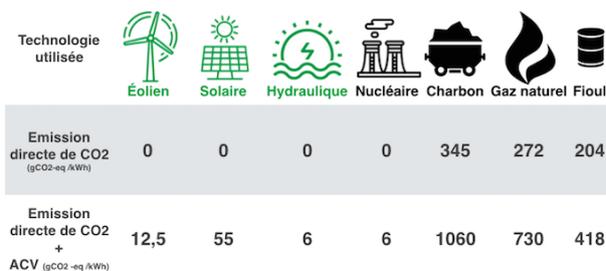


Figure 16 : Bilan carbone des sources d'énergie d'après Reporterre

8.2 - Catégories d'impacts et indicateurs de flux

Sol et acidification

L'éolien est responsable de très peu d'acidification des sols, cependant l'utilisation de la surface de sols est élevée, à cause des routes d'accès (figure 19).

Impacts de la consommation des terres

83% du parc éolien étant installé en zone agricole, la construction d'éoliennes peut entrer en concurrence avec l'agriculture. Cependant, selon le ministère de l'écologie sur la période 2006-2012, le développement de l'éolien a contribué à environ 1,5% de l'artificialisation des terres en France (figure 17), ce qui est très loin du secteur du logement.

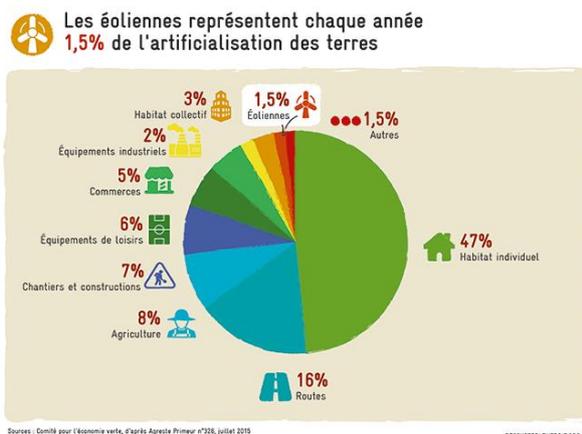


Figure 17 : Artificialisation des sols par secteurs, source [8]

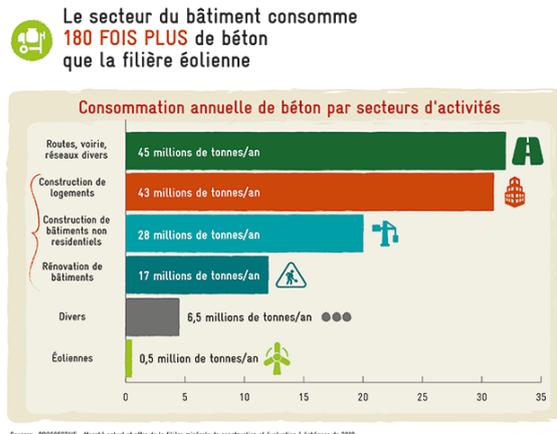


Figure 18 : Consommation en béton par secteurs, source [8]

Impacts de la bétonisation

Le béton a un impact négatif, surtout sur les phases de fabrication et de transport avec les émissions de dioxyde de carbone. L'impact du béton sur le milieu environnant est faible, car sa présence est très localisée et c'est un matériau inerte.

L'éolien représente 0,5% de la production nationale de béton (figure 18), ce qui est peu par rapport aux autres secteurs.

Cependant, il est difficile de comparer la consommation de béton de la filière éolienne à celle du nucléaire car en plus de la construction de la centrale, une quantité importante de béton est utilisée pour l'enfouissement des déchets radioactifs.

Consommation d'eau

L'éolien est aussi remarquable par sa faible consommation d'eau, il est nettement moins consommateur que la moyenne du mix mondiale (figure 19).

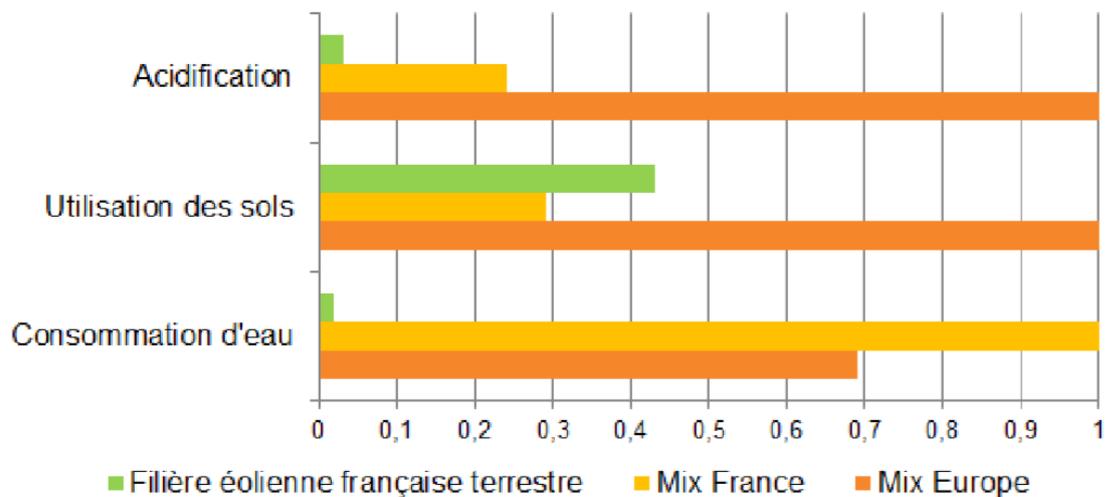


Figure 19 : Valeurs relatives pour 1kWh d'électricité produite, source [3]

Étapes du cycle de vie

D'après le graphique figure 20, la demande cumulée en énergie non renouvelable et les déchets sont liés à la fabrication des composants. C'est même l'étape la plus impactante sur tous les indicateurs sauf celui de l'utilisation des sols. Ainsi, la diminution de l'impact de l'éolien passe par l'amélioration de la transformation des matières premières.

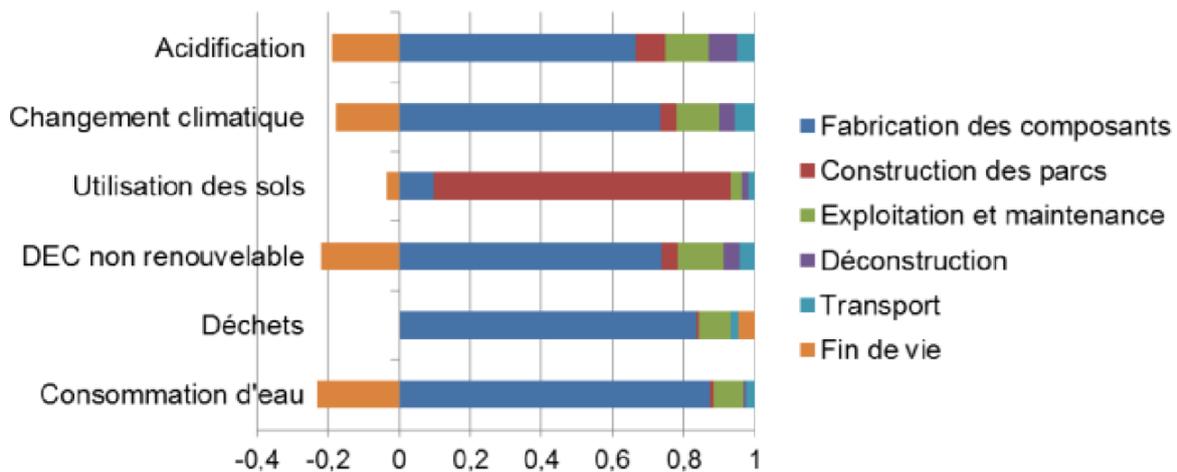


Figure 20 : Impacts environnementaux d'1kWh d'électricité issu de la filière éolienne française, source [3]

8.3 - Efficacité énergétique

Le temps de retour est de 12 mois et le facteur de récolte est de 19. Ainsi, le secteur éolien est nettement plus efficace que le secteur solaire et la biomasse avec un facteur de récolte de 19 (figure 21), mais moins performante que l'hydraulique.

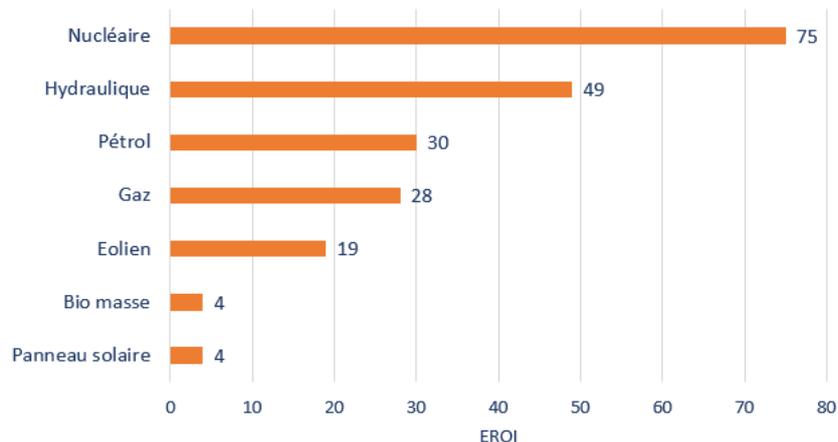


Figure 21 : Taux de retour énergétique (EROI) pour les différents moyens de production d'énergie, source d'après Forbes et ADEME

Il faut noter que le taux de retour énergétique aussi appelé EROI (Energy Return On Investment) ne prend pas en compte la nature éventuellement non renouvelable des ressources consommées durant tout le cycle de vie. On introduit donc EROI soutenable qui permet de comptabiliser la part non renouvelable consommée sur la vie [12] :

$$EROI_{sust} = \frac{\text{Energie récupérée sur la vie}}{\text{Part renouvelable de l'énergie investie dur le cycle de vie}}$$

Pour l'énergie nucléaire, en prenant en compte l'énergie primaire utilisée, on obtient un $EROI_{sust} = 0,327$ tandis que celui de l'éolien est de 19. Avec cette vision on voit que l'énergie éolienne est bien plus soutenable que l'énergie nucléaire.

De plus on remarque que les énergies fossiles ont le meilleur rendement énergétique, mais ces réserves ne sont pas inépuisables. Avec la consommation actuelle, les ressources en pétrole seront épuisées, en l'état des technologies actuelles, d'ici 54 ans, le gaz d'ici 63 ans, le charbon d'ici 112 ans et l'uranium d'ici 100 ans. Le graphique figure 21 est donc à relativiser [13].

8.4 - Pression économique sur les matériaux

Pour atteindre une puissance installée de 6000 GW mondiale en 2050, ce qui signifie un des scénarios les plus ambitieux pour la filière éolienne, 200 GW devraient être installés chaque année.

Le tableau 3 nous montre les besoins en matières premières nécessaire pour ce scénario. On remarque que les besoins en matériaux sont faibles par rapport aux besoins des autres domaines. Seule la part de fibre de verre est importante par rapport aux consommations actuelles, il faut cependant noter que cette filière est très peu développée [6].

Matériaux	Besoins fermes de référence 50MW	Con. mondiale annuelle 2018 (mines et recyclage)	Besoins pour 50GW/an et % de la cons. 2018	Besoins pour 200GW/an et % de la cons. 2018	Réserves minières mondiales	Ressources minières mondiales
Béton	23 kt	50 Gt	23 Mt - 0,05%	92 Mt - 0,2%	---	---
Acier et fer	6 kt	1,6 Gt	6 Mt - 0,37%	24 Mt - 1,5%	50 Gt	230 Gt
Fibre de verre	370 kt	6 Mt ??	370 kt - 6%	1,5 Mt - 24%	---	---
Aluminium	170 kt	75 Mt	170 kt	680 kt - 0,9%	7,5 Gt	18 Gt
Cuivre	24 Mt	24 Mt	87 kt	350 kt - 1,5%	790 Gt	2,1 Gt

Tableau 3 : Évaluations des besoins de quelques-uns des matériaux essentiels, source [6]

9 – Interprétation des résultats

D'après le chapitre 6, nous avons vu que la fabrication est le point noir sauf pour la consommation d'énergie. L'acier utilisé pour les mâts et la nacelle est l'une des principales raisons. Ainsi le recyclage souvent épinglé n'est pas l'aspect le plus négatif et nécessitant le plus d'amélioration.

Les résultats obtenus dépendent énormément de la durée d'exploitation et du facteur de charge qui peuvent évoluer en fonction des politiques publiques. On peut se poser la question sur la possible prolongation de durée de vie pour les prochaines années.

Mais on peut aussi se poser la question du stockage de l'énergie. En effet l'énergie éolienne étant intermittente, le stockage du surplus d'énergie produite pourrait permettre de la réinjecter lors des périodes de hautes consommations d'énergie. Plusieurs solutions de stockage existent tel que le stockage hydraulique gravitaire, les accumulateurs électrochimiques et d'hydrogène [14]. À l'exception du stockage hydraulique gravitaire qui est la solution la plus courante, l'utilisation des autres technologies de stockage nécessite d'être améliorée d'un point de vue économique et écologique. Le développement couplé des énergies renouvelables et du stockage pourrait changer la donne.

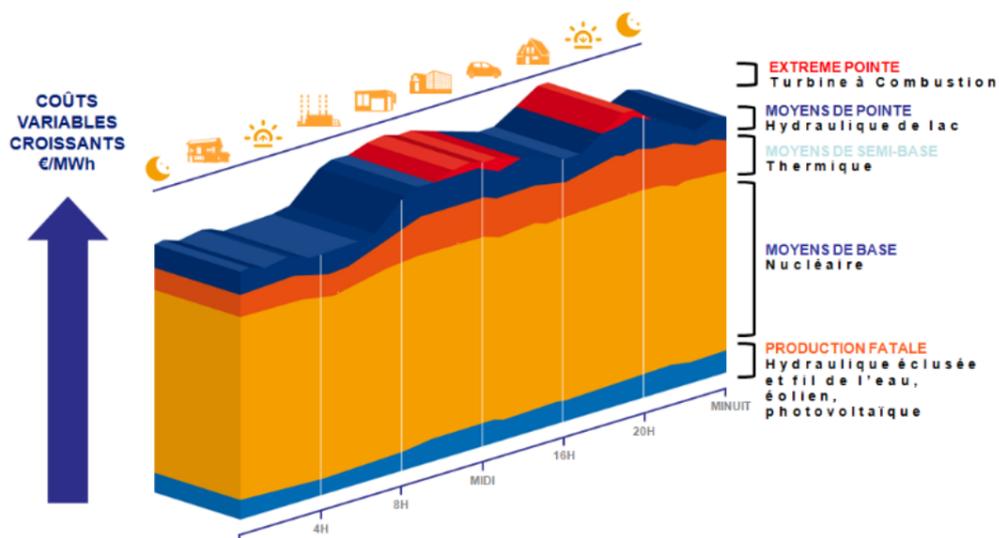


Figure 22 : Mix énergétique français sur une journée, source [18]

Actuellement, le facteur de charge est de 21%, mais il dépend de la considération de l'éolien dans le mix énergétique. En effet, l'éolien français est classé comme une production fatale², ainsi toute l'énergie produite est injectée sur le réseau. Le passage au tout éolien pourrait énormément modifier les résultats obtenus.

Il faut noter que nous ne pouvons pas comparer directement l'impact des différentes sources d'énergie, car l'énergie pilotée et l'énergie fatale sont deux types de productions complémentaires et non concurrentes. Il faut intégrer les sources fatales et les sources pilotées dans le mix et évaluer le coût global de l'ensemble du mix.

Faites votre propre mix sur [MIXOPTIM](#) !!

² Une énergie fatale est une énergie qui ne peut pas être commandée : l'électricité éolienne dépend des vitesses de vent sur le territoire, ce sont donc aux autres moyens de production de s'ajuster pour assurer l'équilibre entre l'offre et la demande [15]

Références :

- [1]: RTE, Panorama de l'électricité renouvelable au 31 décembre 2019, 2020, https://www.rte-france.com/sites/default/_les/panorama2019-t4-bd2.pdf
- [2]: Université de Valenciennes, Méthodologie de l'analyse de cycle de vie, <http://stockage.univ-valenciennes.fr/MenetACVBAT20120704/acvbat/chap03/co/ch03o10acv3.html>
- [3]: ADEME, Analyse du cycle de vie de la production d'électricité d'origine éolienne en France, décembre 2015, https://www.ademe.fr/sites/default/_les/assets/documents/impacts-environnementaux-eolien-francais-2015-rapport.pdf
- [4]: Rana JREICH, Modélisation de la dynamique verticale de carbone dans les sols profonds, mars 2016, https://www6.inrae.fr/mia-paris/content/download/4237/40459/version/1/_le/JREICH.pdf
- [5]: Mathieu.clabaut – File:Schema Windenergieanlage.png, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=635875>
- [6]: Encyclopédie énergie, Développement mondial de l'éolien et criticité des matières premières, juin 2019, <https://www.echosciences-grenoble.fr/articles/xcx>
- [7]: Les terres rares, qu'est-ce que c'est ?, septembre 2014, https://www.geo.fr/environnement/de_nition-terres-rares-scandium-yttrium-et-lanthanides-124433
- [8]: Énergie Partagée et Terre de liens Enercoop, Bétonisation et artificialisation des terres : quelle contribution de l'éolien ? mars 2020, <https://decrypterlenergie.org/betonisation-et-artificialisation-des-terres-quelle-contribution-de-leolien>
- [9]: Bernard Deboyer, Le démantèlement et le recyclage des éoliennes, février 2019, <https://www.revolution-energetique.com/le-demantelement-et-le-recyclage-des-eoliennes/>
- [10]: Volskwind, Mémoire en réponse aux observations émises lors de l'enquête publique, avril 2019, <http://www.vienne.gouv.fr/Politiques-publiques/Environnement-risques-naturels-et-technologiques/Installations-classees/Eoliennes/Ferme-eolienne-Volskwind-Blanzay>
- [11]: Stéphanie Senet, Le recyclage des éoliennes terrestres tourne en rond, octobre 2019, <http://www.journaldelenvironnement.net/article/le-recyclage-des-eoliennes-terrestres-tourne-en-rond,100366>
- [12]: Hélène Horsin Molinaro, Bernard Multon, Conversion d'énergie et efficacité énergétique, septembre 2018, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/ressources-energetiques-et-energie-electrique
- [13] L'épuisement des ressources. <https://www.edf.fr>
- [14]: Hélène Horsin Molinaro, Bernard Multon, Technologies des systèmes de stockage de l'énergie électrique, avril 2019, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/technologies-des-systemes-de-stockage-de-lenergie-electrique
- [15]: Vincent Le Biez, L'éolien ne répond pas à un besoin, novembre 2008, <https://www.lemoniteur.fr/article/l-eolien-ne-repond-pas-a-un-besoin.1975381>
- [16]: <http://www.parc-eolien-de-sainte-rose.fr/>
- [17]: <https://www.ventdesnoues.org/2020/02/10/enfouissement-des-pales-deoliennes-bloomberg-5-fevrier-2020>
- [18]: https://www.edf.fr/sites/default/_les/contrib/groupe-edf/producteur-industriel/carte-des-implantations/centrale-bouchain/edf_bouchain_dossierde_presse.pdf
- Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : <https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>