

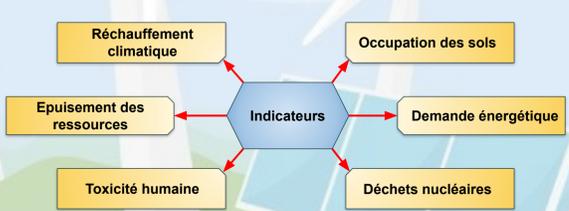
## Qu'est ce qu'une ACV ?

L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est une méthode évaluant les impacts environnementaux d'une activité ou d'un produit. Ici nous l'appliquons au secteur énergétique. C'est une méthode systémique qui s'intéresse à l'ensemble du cycle de vie de l'objet d'étude. Cette méthode permet notamment d'éviter le transfert d'impacts d'un acteur à un autre. Elle repose sur plusieurs étapes :

1	Définition des objectifs de l'ACV et du champ d'étude	→ Choix d'une unité fonctionnelle → Choix des limites du système
2	Inventaire du cycle de vie (ICV)	→ Recensement des flux entrants et sortants du système
3	Evaluation de l'impact	→ à l'aide de différents indicateurs
4	Interprétation et conclusion	→ Validation des résultats → Valorisation (prise de décision)

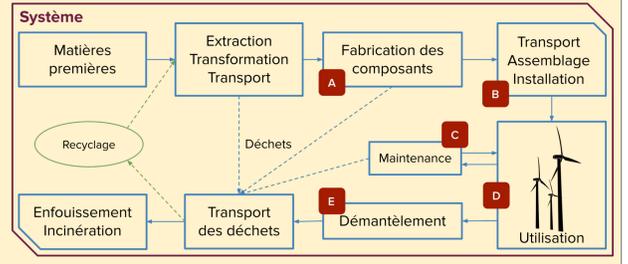
## Indicateurs d'impacts

Il existe deux catégories d'indicateurs : les indicateurs "endpoint", qui quantifient directement les dommages sur la santé humaine et sur les écosystèmes et les "midpoints", qui se trouvent davantage en amont de la chaîne causale. Parmi ces indicateurs figurent notamment :



## ACV de l'éolien terrestre français<sup>1</sup>

### 1. Champ d'étude



### 2. Inventaire de Cycle de Vie

**A Fabrication**

- Rotor (pale + moyeu)**: Epoxy, fibre de verre, fonte
- Nacelle (système mécanique + génératrice + cadre)**: Acier inoxydable, cuivre, fibre de carbone
- Mât**: Acier faiblement allié
- Fondations (type gravitaire)**: Béton en acier renforcé

**B Installation**

- 0,5 kWh / kg assemblé d'éolienne
- 10 km de routes d'accès / parc
- 1 km de câble électrique / éolienne

**C Maintenance**

- Taux de remplacement d'une éolienne sur 20 ans : 15% de la nacelle et 1 pale
- Transport agent de maintenance : 2160 km / an

**D Production électrique annuelle**

- 8760h \* FC \* Puissance nominale unitaire
- Facteur de charge (FC)**: rapport de l'énergie effectivement produite sur l'énergie théoriquement produite à puissance nominale

**E Démantèlement**

- Acier, fonte, Cu, Al : 90% recyclé 10% enfoui
- Plastiques, composites : incinérés
- Béton : recyclé
- Transport : routier 200 km

### 3. Evaluation d'impact

Indicateur	Impact / kWh
Changement climatique (g CO <sub>2</sub> e)	12,7
Demande énergétique DE (MJ)	0,19
Toxicité humaine (CTUH)	7,53.10 <sup>-9</sup>
Utilisation des sols (g C déficitaire)	100,3

**4. Interprétation**

Le taux d'émission de carbone du parc est **7 fois plus faible** que le mix français. La DE correspond à **12 mois de production d'énergie éolienne** : c'est le temps au bout duquel l'énergie investie est rentabilisée. C'est **5 fois moins** que le mix national.

**4. L'étape de fabrication est la plus grande contributrice à cause de la production d'acier à partir d'énergies fossiles.**

## Les facteurs de réduction du photovoltaïque

- Utiliser un **mix électrique** décarboné pour produire le silicium des panneaux (production en France plutôt qu'en Chine)
- **Amélioration du rendement** via des technologies en cours de développement
- Utilisation d'**aluminium secondaire** et de **cuivre** à la place de l'argent

- Réduction d'un tiers de l'impact climatique par rapport au mix chinois (de 37,8 à 25,3 g CO<sub>2</sub>e / kWh)
- Diminution de 15 g CO<sub>2</sub>e / kWh grâce aux technologies émergentes (technologie "tandem" par exemple)
- Réduction de 5 g CO<sub>2</sub>e / kWh grâce au recyclage de l'aluminium

## Les facteurs de réduction de l'éolien terrestre et maritime

- Utiliser un **mix électrique** décarboné pour produire l'acier (matériau principal)
- Développement de **technologies nouvelles** (fondations "treillis")
- Utilisation d'**acier de renforcement** plutôt que d'acier faiblement allié
- **Recyclage** des fibres de carbone et des métaux rares présents dans les aimants permanents

- Réduction de l'impact carbone
- Réduction de la toxicité humaine
- Diminution de l'occupation des sols
- Impacts difficilement quantifiables
- Marge de manoeuvre bien plus faible que pour le Photovoltaïque

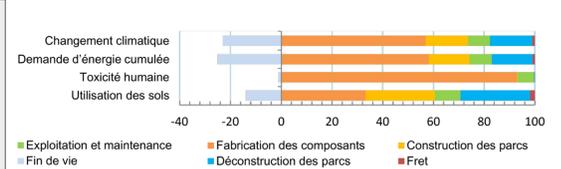
## ACV de l'éolien maritime français<sup>1</sup>

**Principales différences**

- Fondations**: type *monopieux* plus adaptées aux eaux profondes
- Génératrices**: synchrones à aimants permanents

Situées à plus de 10 km des côtes dans des zones plus ventées que sur terre, les éoliennes offshore, conçues plus grandes, ont un **facteur de charge plus élevé : 45%**.

Indicateur	Impact / kWh (Terrestre)	Impact / kWh (Maritime)
Changement climatique (g CO <sub>2</sub> e)	12,7	14,8
Demande énergétique DE (MJ)	0,19	0,22
Toxicité humaine (CTUH)	7,53.10 <sup>-9</sup>	6,97.10 <sup>-9</sup>
Utilisation des sols (g C déficitaire)	100	28



**Analyse d'impact**

La **fabrication** prédomine car les génératrices utilisées nécessitent des terres rares et les fondations monopieux de l'acier supplémentaire.

Mais les **étapes d'installation et de démantèlement** sont également impactantes car le transport des pièces en mer est consommateur de fioul.

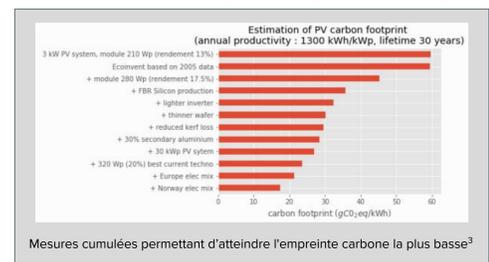
La surface maritime étant de toute façon inutilisée, l'impact sur l'**utilisation des sols** provient en majorité des forages pour obtenir le fioul utilisé par les navires.

## ACV et analyse de sensibilité du photovoltaïque<sup>2</sup>

Quelles technologies pour réduire au maximum l'impact du photovoltaïque ?

Evaluation d'impact sur technologie actuelle

Indicateur	Impact / kWh
Changement climatique (g CO <sub>2</sub> e)	37,8
Demande énergétique DE (MJ)	0,49
Toxicité humaine (CTUH)	1,16.10 <sup>-9</sup>
Utilisation des sols (kg sol)	2,54

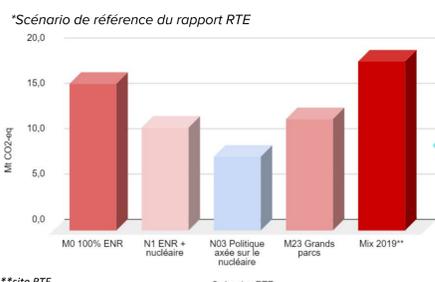


Les résultats d'analyses de sensibilité fournissent la liste des technologies à intégrer aux panneaux photovoltaïques afin de réduire au maximum leur empreinte carbone.

## Bilan carbone des différents mix énergétiques envisagés pour 2050

Le rapport RTE paru en octobre 2021 envisage plusieurs scénarios de **consommation énergétique** et de **puissance installée**. Pour un scénario de consommation de référence de 675 TWh, nous avons sélectionné quatre scénarios de mix énergétiques pour en calculer le **bilan carbone annuel**. La totalité de ces scénarios présentent un bilan carbone inférieur à celui de l'année 2019, et ce malgré la consommation accrue d'électricité due – entre autre – à l'**électrification** (voitures, industrie...) pour remplacer l'utilisation d'énergies fossiles.

2021	475 TWh	• Représente seulement 25% de l'énergie consommée
2050	675 TWh*	• Baisse de la consommation d'énergie totale
		• Electrification



Les scénarios favorisant l'usage du nucléaire présentent un meilleur bilan en ce qui concerne l'empreinte carbone. Cela ne doit pas occulter les autres impacts de l'énergie nucléaire (déchets...). De plus, l'empreinte carbone du démantèlement des centrales est encore peu connue.

## Quelles technologies privilégier ?

En raison d'un **facteur de charge** plus important (45% contre moins de 25% pour l'éolien terrestre et le photovoltaïque) l'éolien maritime est la technologie qui nécessite le moins de support de stockage ou de source secondaire pilotable. Cependant, d'autres facteurs entrent en compte. Les pertes par transport d'électricité rendent l'éolien maritime inutilisable à l'échelle de tout le territoire, d'où la nécessité d'un mix impliquant également le photovoltaïque et l'éolien terrestre.

Le **nucléaire** (même s'il n'est pas renouvelable) semble être également une technologie à prioriser en raison de son impact en sol et en carbone très faible (6 g CO<sub>2</sub>e / kWh) ce qui explique pourquoi les mix nucléarisés ont l'empreinte climatique la moins importante.

## Prise en compte du besoin de flexibilité

Si la part des nouvelles ENR (non-pilotables) devient élevée dans le mix électrique Français et qu'une importante **électrification des usages** a lieu, la prise en compte de la **flexibilité de la production énergétique** va être nécessaire dans les ACV.

En effet, d'une part, la consommation énergétique varie fortement en France à l'échelle quotidienne et saisonnière. D'autre part, la production énergétique moyenne des ENR est également variable à l'échelle quotidienne, mais pas à l'échelle saisonnière comme on pourrait le croire (l'éolien et le solaire étant complémentaires). Plusieurs solutions sont envisagées : des nouvelles **unités de pointe pilotables** (hydrogène, biogaz), des **installations de stockage** (batteries, STEP, gaz de synthèse), et l'**augmentation de l'interconnexion** des réseaux électriques à l'échelle régionale et internationale. L'ajout de ce besoin de flexibilité contribue nécessairement à la hausse de la valeur de plusieurs indicateurs de l'ACV du mix électrique Français, en particulier en ce qui concerne l'empreinte carbone.

<sup>1</sup>: ADEME (2015), ACV de la production d'électricité d'origine éolienne en France  
<sup>2</sup>: ADEME (2021), Rapport Incer-ACV  
<sup>3</sup>: R. Besseau (2020), Analyse de cycle de vie de scénarios énergétiques intégrant la contrainte d'adéquation temporelle production-consommation

