

# Les enjeux matériaux pour la fabrication et le recyclage des éoliennes

*Frédéric PETIT est directeur Business Development de Siemens Gamesa France.*

La **Figure 1** est une usine d'éoliennes en mer mise en production par la société Siemens Gamesa Renewable Energy au Havre en mars 2022. C'est le plus gros projet industriel jamais réalisé en France dans les EnR<sup>1</sup>. Elle est couplée avec des infrastructures portuaires fournies par HAROPA<sup>2</sup> pour le port du Havre. Ce sera notre introduction de ce chapitre

1. EnR : Energies Renouvelables.  
2. HAROPA : complexe portuaire regroupant les ports de Rouen, de Paris et du Havre.

du thème « Chimie et matériaux stratégiques » pour la fabrication et le recyclage des éoliennes.

## ↑ Sobriété et besoins en nouveaux moyens de production électrique

La France s'est engagée à atteindre la neutralité carbone en 2050 afin de lutter efficacement contre le dérèglement climatique. Cela va l'amener à réduire sa consommation globale d'énergie d'environ



Figure 1

Usine Siemens Gamesa du Havre.

(Crédit photographie Vinci Construction – Photographe Jacques Basile)

### PRÉSENTATION DE LA SOCIÉTÉ SIEMENS GAMESA RENEWABLE ENERGY SAS

L'effectif de la société en France est d'un peu plus de 1 200 personnes dont plus de 900 sur l'usine du Havre. La société dispose d'un plan de recrutement actif de plus de 100 personnes. Les offres d'emploi se trouvent sur notre site corporate L'Usine d'éolienne en mer au Havre (siemensgamesa.com).

Dans l'éolien en mer, Siemens Gamesa Renewable Energy va mettre en production d'ici à 2026 cinq projets de 500 MW soit 2,5 gigawatts, ce qui correspond à l'alimentation d'électricité pour 4 millions de personnes environ. La société exploite une trentaine de centres de maintenance pour l'éolien terrestre au plus près des parcs d'éoliennes (**Figure 2**). Un centre de R&D installé à Rouen travaille notamment sur les effets de sillage sur les éoliennes en mer ou à terre.

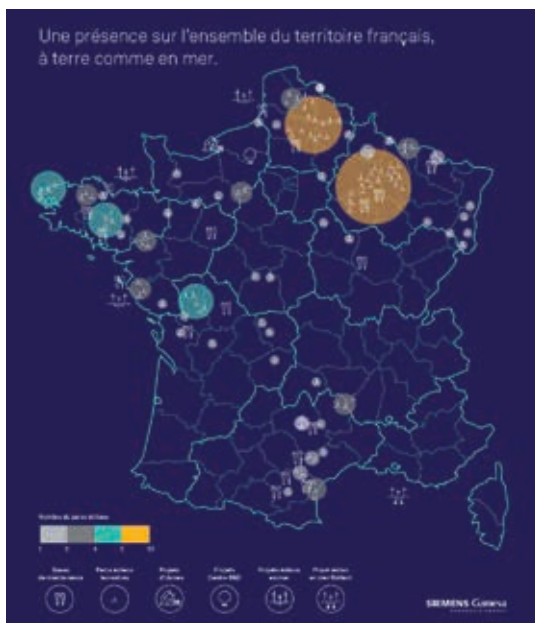


Figure 2

Présence de Siemens Gamesa Renewable Energy en France.

1 600 TWh aujourd'hui à une valeur comprise entre 900 et 1 200 TWh selon les scénarios RTE, soit une baisse pouvant aller jusqu'à 40 % (Figure 3). Ceci imposera une baisse de consommation des énergies fossiles alors que, dans le même temps, une croissance des besoins en électricité de 40 % d'ici à 2050 est à prévoir du fait notamment des nouveaux usages, véhicule électrique, hydrogène, pompes à chaleur, etc. Ces indications sont celles de la SNBC<sup>3</sup> ainsi que de RTE<sup>4</sup>, le gestionnaire de réseau.

Les maîtres-mots pour répondre à cette situation sont : sobriété et efficacité.

3. SNBC : Stratégie Nationale Bas-Carbone.

4. RTE : Gestionnaire de Réseau Transport Electricité.

## 2 Bénéfices sociétaux de l'éolien – Stratégie Développement durable Siemens Gamesa Renewable Energy

En termes d'émissions carbone, que fait Siemens Gamesa Renewable Energy ? L'entreprise est aujourd'hui déjà neutre en carbone depuis fin 2019. Elle sera « net-zéro » sur les scopes 1 et 2<sup>5</sup>, la partie directe et la partie indirecte d'ici à 2030. En 2040, elle sera également « net-zéro » sur le scope 3 (Figure 5).

5. Scopes 1, 2 ou 3 : dans le bilan de gaz à effets de serre, le scope désigne le périmètre 1 pour le plus près et 3 pour le plus éloigné. Ainsi, le scope 1 fait référence aux émissions directes, le scope 2 aux émissions indirectes liées à la consommation d'énergie et le scope 3 aux émissions de la chaîne de sous-traitance.

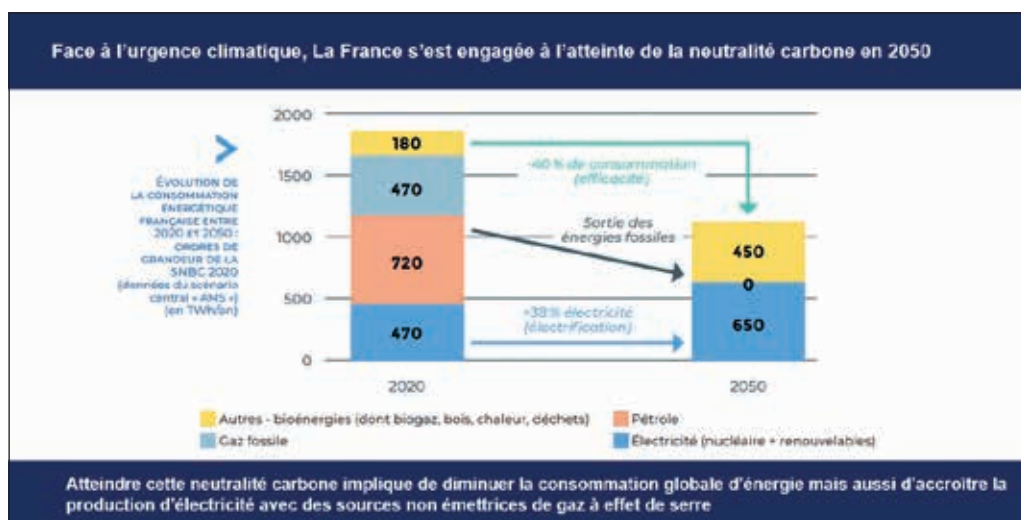


Figure 3

Évolution de la consommation d'énergies en France entre 2020 et 2050.

## POLITIQUE ÉNERGÉTIQUE À MOYEN TERME EN FRANCE

RTE a étudié une série de scénarios (**Figure 4**) en considérant divers équilibres entre les sources d'énergie accessibles, de l'éolien, du solaire, de l'hydraulique, du nucléaire, et évidemment en arrêtant tout ce qui est centrale à charbon et en réduisant le gaz et le pétrole.

Le travail de RTE montre qu'en 2050, il faut qu'on ait installé un minimum de 50 % d'énergies renouvelables en France, quel que soit le scénario. Les ambitions affichées officiellement par le président Macron en février 2022 reposent sur la construction de centrales nucléaires au niveau de 6 EPR2 et une trajectoire qui prévoit 40 GW d'éolien en mer et 40 GW d'éolien terrestre d'ici à 2050.

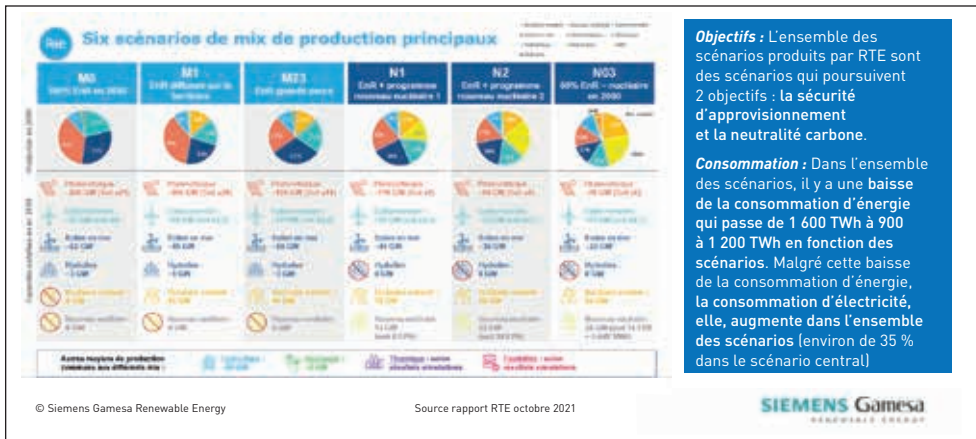


Figure 4

Scénarios RTE de la production d'énergie en 2050.

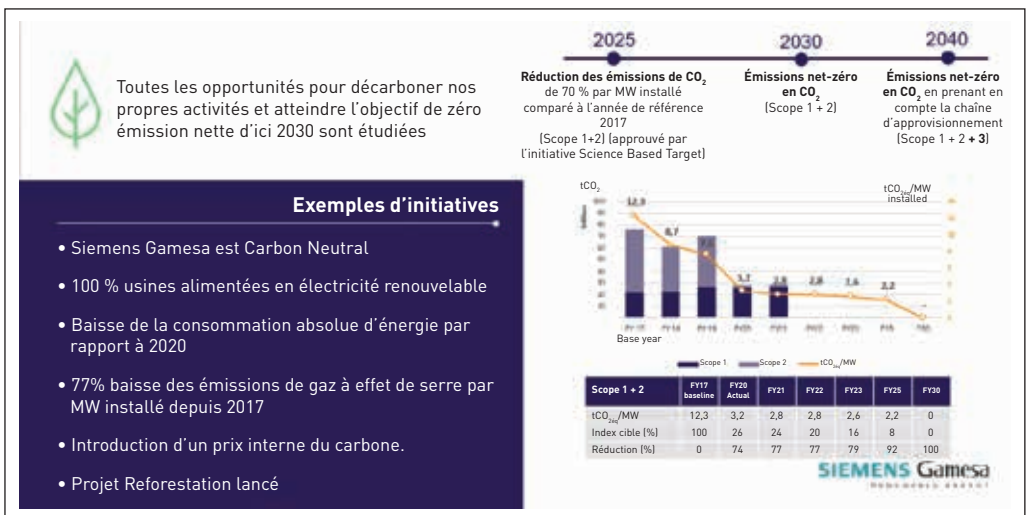


Figure 5

Objectifs de Siemens Gamesa en termes de neutralité carbone.

## BÉNÉFICES SOCIÉTAUX DE L'ÉOLIEN EN MER

Sur l'éolien en mer, cette source d'énergie est non seulement décarbonée mais également très compétitive. Pour le dernier appel d'offres de Dunkerque attribué en France en juin 2019, le prix de l'énergie était de 44 euros du mégawattheure, à comparer à l'état des prix sur le marché spot autour de 150-200 €/MWh.

On a eu cet hiver (**Figure 6**) des anticipations de prix jusqu'à 1 600 euros du mégawattheure alors que la filière éolienne terrestre ou en mer permet de défendre activement le pouvoir d'achat des Français. Aujourd'hui, l'éolien va rapporter en France à peu près 23 milliards d'euros (chiffres de la Commission de régulation de l'énergie).

L'énergie éolienne n'était certes pas encore aussi compétitive il y a quelques années, mais il y a eu depuis beaucoup d'investissements dont on a aujourd'hui les bénéfices en termes de compétitivité. Par ailleurs, l'éolien en mer est créateur d'emplois : il a déjà créé plus de 6 500 emplois en France et nous ne sommes qu'au début de l'aventure. 20 000 emplois sont prévus d'ici à 2035 sur la base de 18 GW raccordés à cet horizon.

L'éolien en mer est d'autre part une activité très européenne. L'Europe est techniquement à la pointe et le marché va s'accélérer, malgré une concurrence asiatique de plus en plus insistante. Au moment où l'activité s'accélère, il faut que l'Europe puisse continuer à récolter, également sur le plan de l'emploi, les fruits de son investissement initial pour préserver la compétitivité.

L'industrie éolienne européenne est cependant au milieu d'une grave crise, menaçant l'avenir de l'Europe en tant que leader des énergies renouvelables et la liberté de l'Europe à pouvoir prendre des décisions énergétiques souveraines. Toute l'industrie éolienne devrait investir, mais les fabricants d'éoliennes subissent actuellement des pertes massives. Siemens Gamesa suggère cinq étapes pour protéger l'industrie éolienne européenne :

1. Transformer les objectifs en projets réels et fournir une visibilité marché
2. Stabiliser les chaînes d'approvisionnement et gérer les risques de prix
3. Soutenir l'innovation et favoriser les compétences technologiques
4. Établir des règles du jeu équitables
5. Investir aujourd'hui dans l'avenir d'une industrie d'importance stratégique

La France, par ailleurs, est bien placée puisqu'un tiers des usines européennes de pales et de nacelles sont localisées sur son territoire. Siemens Gamesa et General Electric disposent en effet de 4 usines en France sur les 12 usines de pales et nacelles de la filière en Europe. La France dispose également de champions comme les Chantiers de l'Atlantique.

Autre point positif : le démantèlement aisé et le taux de recyclabilité de nos installations sont parmi les plus élevés.



**Figure 6**

*Bénéfices sociétaux de l'éolien en mer.*

Les consommations électriques des sites de l'entreprise sont aujourd'hui toutes d'origine EnR (Énergie Renouvelable). Siemens Gamesa Renewable Energy saisit également toute initiative permettant de réduire en permanence ses consommations : par exemple, à Courbevoie, on vient d'adopter l'éclairage LED pour l'ensemble des bureaux, une petite contribution mais un message important, ou au Havre où l'usine a été conçue pour réduire au maximum ses consommations en énergie.

### 3 Recyclage des éoliennes et des pales

Le cycle de vie (Figure 7) des éoliennes est pris en compte depuis la conception, les matériaux, la production, leur installation en mer, la maintenance (les éoliennes sont conçues pour durer un minimum de

25 ans) et jusqu'au démantèlement.

Aujourd'hui, en termes de CO<sub>2</sub>, le retour sur investissement (le payback<sup>6</sup>) est en un peu moins de 8 mois par rapport à l'énergie nécessaire pour produire l'éolienne, l'installer et la démanteler. La différence est spectaculaire : il s'agit de 6 g/kWh, comparé à plus de 800 grammes par kilowattheure pour une centrale charbon (Figure 8).

Sur la droite de la Figure 8 sont portés les équivalents d'émissions par composants. Une éolienne est constituée principalement d'acier, d'aluminium et de cuivre, matériaux que l'on sait recycler simplement puisqu'une éolienne se recycle déjà à plus de 90 %. Il y a néanmoins un défi sur les pales. Aujourd'hui on leur applique une « valorisation thermique » c'est-à-dire qu'on

6. Payback : retour sur investissement.

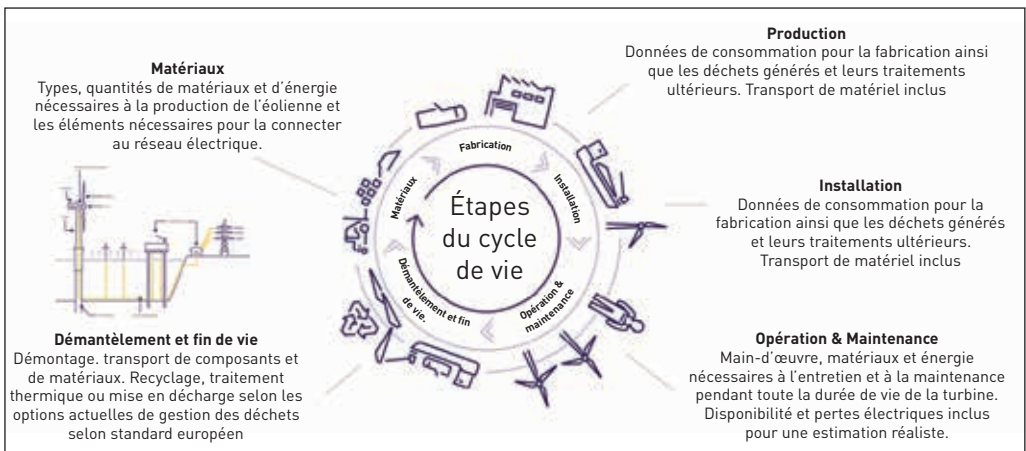
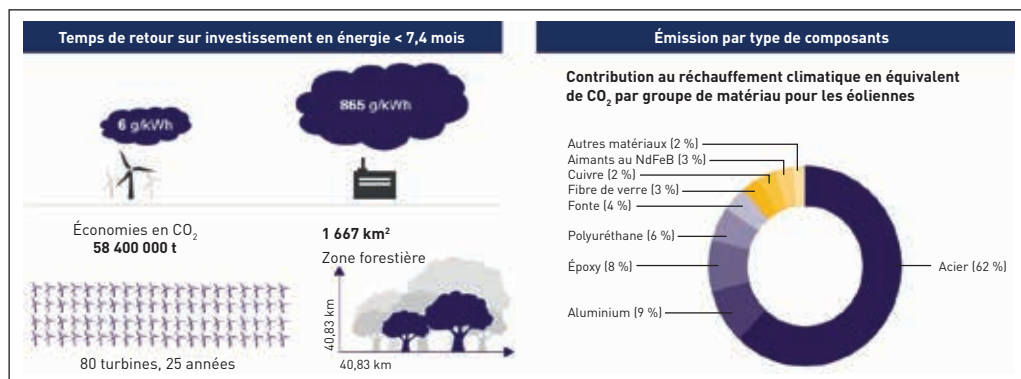


Figure 7

Cycle de vie d'une éolienne.



**Figure 8**

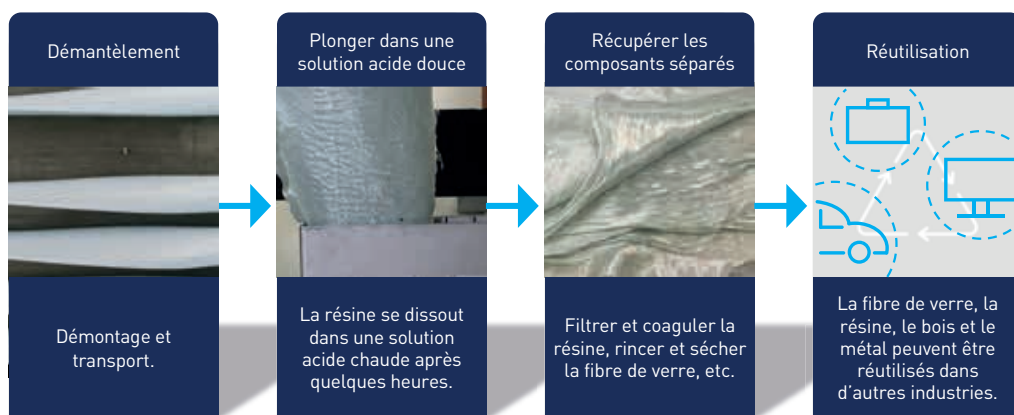
Émissions d'une éolienne.

les brûle dans des cimenteries par exemple, une technique admissible mais qu'il faut chercher à améliorer.

Pour l'éolien en mer, Siemens Gamesa propose à ses clients la solution RecyclableBlade depuis 2021 (Figure 9). Cette solution met en œuvre une nouvelle sorte de résine qui permet, en trempant la pale en fin de vie dans un bain

légèrement acide chauffé à environ 80 °C, de séparer la fibre de verre de la résine et de réutiliser celle-ci, par exemple pour l'industrie automobile (fabrication de tableaux de bord) ou chez les aviateurs (coffres à bagages) ou des coques de protection pour les écrans plats.

Depuis deux mois, Siemens Gamesa propose également



**Figure 9**

Technique de recyclage des pales d'éoliennes.



cette solution pour l'éolien terrestre.

En termes de caractéristiques techniques et de garantie de durabilité, ces nouvelles résines ne présentent pas d'inconvénients. Leur utilisation crée de la valeur pour nos clients et pour la société. Le critère de recyclabilité des pales a été introduit dans le quatrième appel d'offres pour l'éolien en mer (*Figure 10*).

Notre RecyclableBlade est une solution simple et robuste, développée grâce à l'ingéniosité technologique. Le seul changement apporté au processus de production des lames est notre nouvelle résine.

La première installation commerciale d'une technologie d'éolienne recyclable a récemment eu lieu sur le projet éolien offshore Kaskasi de RWE en Allemagne. Ce projet a été mis en production fin 2022. Cette solution sera également mise en œuvre sur le projet éolien en mer du Calvados d'EDF Renouvelables. Ces pales recyclables seront produites depuis l'usine du Havre et ce projet sera mis en production en 2025.

#### 4 Matériaux d'une éolienne et sources d'approvisionnement

En ce qui concerne les matériaux stratégiques ou les matières rares, notre principal souci, initié par la crise Covid, a été que tous les prix ont fortement augmenté (*Figure 11*) : l'acier, le cuivre, les aimants permanents et les coûts logistiques notamment. Et on ne parle pas de 20 ou 30 %, mais de facteurs 2, 3, ou plus.

Le contexte dans lequel Siemens Gamesa et les autres turbinières ont évolué, a complexifié leur rentabilité d'une manière radicale. Si l'on regarde les chiffres européens, tous les turbinières européens ont rencontré le même problème et sont en situation financière délicate. Cette situation était totalement imprévue ; les indexations des contrats étaient loin de prévoir des variations aussi anormales et sur un scope aussi étendu.

En même temps, le sujet de souveraineté industrielle doit revenir au cœur des préoccupations. Par exemple, sur les aimants permanents ou sur les terres rares, on maîtrisait



*Figure 10*

*Les avantages des pales recyclables.*



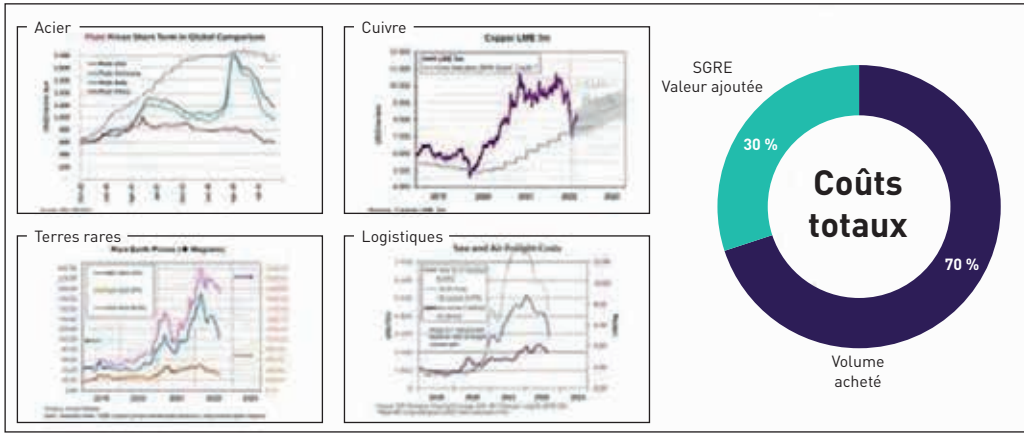


Figure 11

Volatilité des prix des matériaux depuis le Covid.

la fabrication en France ou en Europe il y a 25-30 ans, mais on a laissé partir cette industrie. Il faut la faire revenir, ne serait-ce que pour éviter des incertitudes aussi dangereuses sur les prix des matériels.

## 5 Croissance attendue du marché de l'éolien en mer

Les terres rares et les aimants permanents sont mis en œuvre sur les éoliennes en mer depuis 2015. Les terres rares n'ont de rare que le nom, il y en a en effet un peu partout sur la planète. Mais les seuls fournisseurs d'aimants permanents sont en Chine. Aujourd'hui l'industrie l'automobile est confrontée à cette même réalité. Avoir un système où l'on pourrait relocaliser des productions d'aimants permanents en Europe et en France pour regagner en souveraineté serait un choix politique extrêmement positif.

Une précision sur le recyclage : Siemens Gamesa a déjà su recycler les aimants permanents pour en produire de nouveaux pour des éoliennes plus puissantes. En même temps, c'est une question que l'on regarde avec une certaine sérénité car les échéances ne sont pas si proches. On va installer en France notre premier projet en mer en 2023 et il sera démantelé en 2050 au plus tôt. On a du temps devant nous pour mettre au point la meilleure solution, y compris sur un plan économique. Un autre avantage de l'éolien, c'est le caractère localisé et non diffus. Cette caractéristique va simplifier le démantèlement et le recyclage de leurs aimants permanents (Figure 12).

Sur le long terme, la France s'est engagée à attribuer 2 gigawatts par an à partir de 2025. La mise en œuvre de cet objectif va demander une planification spatiale et un choix des sites. L'État a décidé d'engager cette démarche lors


|   |   |  |
|---|---|--|
| <p><b>Fournisseurs (aimants)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Principalement en Chine (contrat long terme)</li> <li>• Recherche de nouveaux fournisseurs selon la stratégie de Global Sourcing</li> </ul> | <p><b>Responsabilité corporate</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Clauses de protection de l'environnement</li> <li>• Code de conduite</li> <li>• Audits</li> </ul>   |  |
| <p><b>Développement</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Réduction et élimination des terres rares lourdes (Dysprosium &amp; Terbium)</li> </ul>  | <p><b>Recyclage</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• À partir de 2040 pour les éoliennes installées en 2015</li> <li>• Solution déjà mise en œuvre sur les prototypes</li> <li>• Taux de recyclage proche de 100 %</li> </ul> |  |

Figure 12

Présence des terres rares dans de nombreux produits.

**Long terme (2050) : Le Président a précisé le 10 Février 2022 un objectif de 40 GW – 50 parcs**  
**Moyen terme (2035) : Signature le 14 mars 2022 du pacte éolien en mer avec l'État (2 GW/an à partir de 2025)**



**PACTE ÉOLIEN EN MER  
ENTRE L'ÉTAT ET LA FILIÈRE**

**Engagements du Pacte :**

L'État confirme son engagement pour un déploiement ambitieux de l'éolien en mer au large des côtes françaises.

Pour cela, l'État s'engage notamment à :

1. Viser un volume minimal d'attribution d'appels d'offres de 2 GW/an pour l'éolien en mer dès 2025 ;
2. Dans cette dynamique, fixer l'objectif de 20 GW attribués en 2030 pour atteindre une capacité de 18 GW en service en 2035 et de 40 GW en 2050 ;
3. Dans le cadre de l'élaboration de la PPE, réaliser des travaux de planification pour permettre l'atteinte de ces objectifs.

De son côté, la filière s'engage à concevoir et réaliser des projets exemplaires du point de vue technologique, social et environnemental et maximisant les retombées sociales et économiques.

Pour cela, la filière s'engage notamment à :

1. Viser un quadruplement du nombre d'emplois de la filière pour occuper, d'ici 2035, au moins 20 000 emplois (directs et indirects) sur le territoire ;
2. Engager plus de 40 milliards d'euros d'investissements pour la réalisation des projets, au cours des 15 prochaines années ;
3. D'ici à 2035, atteindre un contenu local à hauteur de 50 %, calculé sur l'ensemble des coûts du projet, au moment de sa mise en service, pour chacun des projets éoliens en mer ;
4. Mettre en œuvre des projets exemplaires en matière d'intégration à l'environnement, humain comme naturel, dans lesquels ils s'insèrent.

Figure 13

L'éolien en mer sur le long terme.

du CIMER de janvier 2021. Il y a urgence à échanger avec l'ensemble des parties prenantes, évidemment les pêcheurs, mais aussi les usagers maritimes, les militaires... pour trouver les sites les plus propices (Figure 13). En fait,

50 gigawatts d'éolien en mer en 2050, ce serait moins de 2,7 % de l'espace métropolitain français, à comparer aux 15 % que les Belges vont mobiliser. Cette concertation doit permettre d'identifier les zones les plus propices.

## **L'éolien : un parcours vers la compétitivité - gagné (et une souveraineté à défendre !)**

Plus encore que d'autres branches industrielles, l'éolien a placé une très forte priorité sur le respect de l'environnement. Ce n'est pas une surprise puisque la technique de base elle-même, l'utilisation du vent, est consubstantielle au climat, à la météorologie et à l'utilisation de l'espace, terrestre traditionnellement, mais aujourd'hui également maritime, où il doit se faire accepter.

La compétitivité était une des contraintes que cette industrie a su surmonter. Même en restant rigoureux sur le respect de l'environnement, il convient de continuer à produire à coûts contrôlés. Ceci nous conduit à adopter la politique de ramener en France et en Europe, des compétences récemment et partiellement émigrées en Asie.

L'éolien est une des sources énergétiques indispensables pour une transition énergétique et décarbonée réussie !