



MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉNERGÉTIQUE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

PLAN DE PROGRAMMATION
DES RESSOURCES MINÉRALES DE
LA TRANSITION BAS-CARBONE



L'éolien et les moteurs pour véhicules électriques :

choix technologiques, enjeux matières
et opportunités industrielles

Document édité par :

Commissariat général au développement durable

Juillet 2022

Présidence du groupe de travail

Dominique VIEL

Expert matières premières de l'Ademe

Alain GELDRON

Rédacteur principal

Michael WALKOWIAK (CGDD/Service de l'économie verte et solidaire)

Co-rédactrice

Hélène GAUBERT (CGDD/Service de l'économie verte et solidaire)

Coordinateur

Julien HARDELIN (CGDD/Service de l'économie verte et solidaire)

Avec l'expertise du BRGM et de l'Ifpen

Remerciements

Ce rapport a été réalisé sous le pilotage conjoint du Commissariat général au développement durable (CGDD) et de la Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature (DGALN), avec en appui, l'expertise technique de Gaétan Lefèvre et d'Antoine Beylot du Bureau des recherches géologiques et minières (BRGM) et de l'IFP Énergies Nouvelles (Ifpen).

Il a été réalisé dans le cadre d'un groupe de travail présidé par Dominique Viel avec l'appui technique d'Alain Geldron, anciennement expert matières premières de l'Ademe. Des auditions ont également été réalisées.

Les auteurs de ce rapport remercient l'ensemble des participants au groupe de travail, les structures auditionnées pour le temps qu'elles ont consacré à ces travaux et la qualité de leurs interventions, l'entreprise POMA Industrie pour la visite de ses installations éoliennes et ses informations relatives au marché de l'éolien et des moteurs électriques à aimants permanents.

Liste des participants au groupe de travail

Antoine Loïc	Ademe
Autret Yannick	Ministère de la Transition écologique / CGDD (Commissariat Général au Développement Durable)
Averbuch Daniel	IFP Energies nouvelles (Ifpen)
Bacry Hugo	Ministère de la Transition écologique / CGDD (en stage au moment de la rédaction du rapport)
Bain Pascal	Agence nationale pour la recherche (ANR)
Bazzuchi Pierre	Ministère de la Transition écologique / direction générale de l'énergie et du climat (DGEC)
Beelmeon Julie	Ministère de la Transition écologique / DGEC
Berger Stéphane	Ministère de l'Économie et des Finances / direction générale des entreprises (DGE)
Béroud Loïc	Ministère de la Transition écologique / direction générale de la prévention des risques (DGPR)
Beylot Antoine	Bureau des recherches géologiques et minières (BRGM)
Bialkowski Anne	BRGM
Biscaglia Stéphane	Ademe
Bollenot Martin	Ministère de l'Économie et des Finances / direction générale des entreprises (DGE)
Brossard Jean Luc	PFA (plateforme filière automobiles)
Buchet Marie	Syndicat des énergies renouvelables (SER)
Buisson Eric	Ministère de la Transition écologique / DGALN
Burlet Hélène	CEA-EA
Charpiat Camille	SER
Cheverry Marc	Ademe
Courtine Thierry	Ministère de la Transition écologique / CGDD
Danino-Perraud Raphael	Ministère des Armées
Delporte Vincent	Ministère de la Transition écologique / DGEC
Delprat-Jannaud Florence	ANCRE-GP2
D'Hugues Patrick	BRGM
Dion Axel	Ministère de l'Economie et des Finances / DGE
Domergue Silvano	Ministère de la Transition écologique / CGDD
Ducréux Bertrand-Olivier	Ademe
Franc Paul	Ademe
Ferran Ghislain	Ministère de la Transition écologique / DGEC
Florea Tudor	Ministère de la Transition écologique / DGEC
Force Christine	Ministère de la Transition écologique / DGEC
Gaillaud Jean-François	Ministère de la Transition écologique / DGALN
Gaubert Hélène	Ministère de la Transition écologique / CGDD
Gavaud Olivier	Ministère de la Transition écologique / DGITM (direction générale des infrastructures, des transports et de la mer)
Geldron Alain	Anciennement expert matières premières de l'Ademe
Georgelin Anne	SER
Guénard Vincent	Ademe
Hache Emmanuel	Ifpen
Hardelin Julien	Ministère de la Transition écologique / CGDD
Jakomulski Hugo	Ministère de la Transition écologique / DGALN

Lambert Florence	CEA-EA
Lasfargues Sylène	Ministère de la Transition écologique / DGEC
Laurent Faustine	BRGM
Lefebvre Gaétan	BRGM
Leclerc Nicolas	PFA
Lécureuil Aurélie	Ministère de la Transition écologique / DGALN (en poste au moment de la rédaction du rapport)
Leguérinel Mathieu	BRGM
Marcus Vincent	Ministère de la Transition écologique / CGDD
Marfaing Olivier	Ministère de l'Economie et des Finances / DGE
Marquer Didier	Ministère de l'Enseignement supérieur
Mesqui Bérengère	France Stratégie (en poste au moment de la rédaction du rapport)
Miffand Héloïse	PFA
Nicklaus Doris	Ministère de la Transition écologique / DGPR
Picciani Massimiliano	BPI France
Pochez Rémi	Ministère de la Transition écologique / DGITM
Pommeret Aude	France Stratégie
Prévors Lionel	Ministère de la Transition écologique / DGEC
Raimbault Louis	ANCRE-GP2
Risler Ophélie	Ministère de la Transition écologique / DGEC
Rosini Sébastien	CEA-EA
Ruffenach Coralie	Ministère de la Transition écologique / DGEC
Sabathier Jérôme	Ifpen
Seck Gondia-Sokhna	Ifpen
Simon Jérémy	SER
Stojkovic Sandra	Ministère de la Transition écologique / DGEC
Tardieu Bernard	Académie des sciences et des technologies
Tarrizo Violaine	Ministère de la Transition écologique / DGEC
Tromeur Eric	Ministère de la Transition écologique / CGDD
Vavasseur Sean	Syndicat des énergie renouvelables (SER)
Vergez Antonin	Ministère de la Transition écologique / CGDD (en poste au moment de la rédaction du rapport)
Vidal Olivier	Centre national de la recherche scientifique (CNRS)
Viel Dominique	Présidente des travaux en vue de l'élaboration d'un « plan des ressources minérales de la transition bas-carbone »
Vieillefosse Alice	Ministère de la Transition écologique / DGEC
Viktorovitch Michel	Ministère de la Transition écologique / DGEC
Volard Amandine	Ademe
Walkowiak Michael	Ministère de la Transition écologique / CGDD
Wallard Isabelle	Comité pour les métaux stratégiques (Comes) - (en poste au moment de la rédaction du rapport)

Liste des entreprises et organismes auditionnés

ARKEMA
Bouygues
Carester
David Rovere
Eiffage
ENERCON
Extracthive
FEE
IRT Jules Verne
Jeumont Electric
MagReesource
Nordex
POMA
SAIPEM
SER
Siemens Gamesa
Fernand Vial - Vial Consulting

SOMMAIRE

RAPPEL DU CONTEXTE.....	8
SYNTHÈSE	9
INTRODUCTION.....	12
I. LES MACHINES ÉLECTRIQUES ET LES PRINCIPES DE L'ÉOLIEN	13
II. LE MARCHÉ DE L'ÉOLIEN, LA DEMANDE EN MATIÈRES DE LA FILIÈRE ET LA DEMANDE EN TERRES RARES POUR LA PROPULSION ÉLECTRIQUE.....	35
III. ANALYSE DES VULNÉRABILITÉS LE LONG DE LA CHAÎNE DE VALEUR DES AIMANTS PERMANENTS : APPLICATION À L'ÉOLIEN	55
IV. LES OPPORTUNITÉS INDUSTRIELLES.....	89
V. RECOMMANDATIONS.....	103
BIBLIOGRAPHIE	111
ABRÉVIATIONS ET SIGLES.....	113

Rappel du contexte

L'action 5 de la feuille de route sur l'économie circulaire d'avril 2018 prévoit que le ministère chargé de l'écologie « engagera sur la base des travaux du comité pour les métaux stratégiques (Comes) et du premier plan national des ressources, un plan de programmation des ressources jugées les plus stratégiques en l'accompagnant d'une politique industrielle ambitieuse de valorisation du stock de matières, en particulier pour les métaux critiques, contenues dans les déchets ».

C'est dans ce cadre que la secrétaire d'État à l'Écologie, Madame Brune Poirson, a lancé, le 22 février 2019, les travaux d'élaboration d'un plan de programmation des ressources minérales de la transition bas-carbone. En effet, pour construire les infrastructures énergétiques indispensables à l'atteinte des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre qu'elle s'est fixés, la France est amenée à mobiliser davantage de ressources minérales, dont certaines peuvent être critiques. Ce constat est aujourd'hui largement partagé comme l'attestent les travaux de l'agence internationale de l'énergie, du groupe international des experts sur les ressources, de la Banque mondiale, de la Commission européenne, et, en France, les travaux de l'Alliance Ancre, du Comité des métaux stratégiques, des académies des technologies et des sciences ou les projets de recherche financés par l'Ademe ou l'Agence nationale de la recherche (ANR).

Ce plan de programmation des ressources minérales s'inscrit dans la continuité du plan ressources pour la France publié en juillet 2018, inscrit dans la loi de transition énergétique pour la croissance verte. Celui-ci recommande d'améliorer les connaissances sur les besoins en ressources minérales induits par les politiques publiques et tout particulièrement par les politiques climatiques.

Les travaux du plan de programmation des ressources minérales de la transition bas-carbone portent sur quatre grandes familles de technologies bas-carbone : le photovoltaïque, le stockage stationnaire et réseaux (y compris les réseaux intelligents), la mobilité bas-carbone et l'éolien. Ces familles ont été retenues car la transition bas-carbone va se traduire par une électrification massive de notre économie. Les familles de technologies dans le domaine de la chaleur (solaire thermique, pompes à chaleur, biomasse, géothermie) ne seront ainsi pas étudiées dans ce plan, même si ces technologies concernent des domaines à fort potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Pour chacune des quatre familles de technologies retenues, les travaux ont comme objectif d'identifier et d'apporter des éléments de comparaison des technologies matures ou susceptibles de l'être dans les dix ans à venir au regard :

- des besoins en ressources minérales qu'elles mobilisent et des enjeux associés, économiques, géopolitiques, environnementaux, sanitaires et sociaux ;
- des opportunités industrielles qu'elles peuvent présenter pour les entreprises françaises sur l'ensemble de leur chaîne de valeur.

Ce plan a vocation à éclairer les pouvoirs publics et les décideurs sur les choix technologiques et industriels pertinents pour réussir la transition bas-carbone, en identifiant des leviers d'actions permettant de réduire les risques associés aux ressources à mobiliser d'une part, et de mieux exploiter les opportunités industrielles d'autre part.

Ces travaux s'appuient sur l'expertise de l'IFP Énergies nouvelles (Ifpen) et du Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM). Ils associent les experts de différentes structures de recherche et de directions générales des ministères de la Transition écologique, de l'Économie et des finances, de la Recherche et de l'innovation, porteuses des politiques industrielles et bas-carbone. Ils sont enrichis par des auditions d'entreprises impliquées aux différentes étapes de la chaîne de valeur des technologies bas-carbone objet des travaux.

Le présent document constitue le dernier d'une série de quatre rapports thématiques (un rapport pour chacune des quatre grandes familles citées). Il sera complété d'un rapport de synthèse sur les besoins en ressources minérales de la transition bas-carbone. Ce rapport porte sur la filière de l'éolien dans le cadre de la transition énergétique française, et complète le rapport précédent sur la mobilité bas-carbone en présentant la filière des moteurs électriques.

Synthèse

La transition bas-carbone entraîne une électrification de l'économie pour réduire la consommation de combustibles fossiles, fortement émetteurs de CO₂. Cela nécessite de produire de l'électricité à partir de sources décarbonées et renouvelables, et pour le secteur du transport, de pouvoir convertir cette électricité en énergie mécanique pour mettre en mouvement des véhicules électriques.

Génératerices éoliennes et moteurs électriques sont justement les machines électriques qui permettent la conversion entre énergie mécanique et énergie électrique. Ces machines diffèrent par le sens de la conversion d'énergie, mécanique vers électrique pour une génératrice et inversement pour les moteurs. Leurs principes de fonctionnement et leur composition en matières sont toutefois similaires. Si de nombreuses technologies de machines électriques existent, toutes utilisent des bobinages en cuivre. Dans certains cas une partie de ces bobines est remplacée par **des aimants permanents à terres rares, qui permettent par leurs propriétés magnétiques de réduire le poids et la complexité des machines électriques et d'améliorer leurs performances**, ce qui explique leur usage dans les technologies de pointe.

L'éolien et la mobilité bas-carbone sont d'ores et déjà d'importants consommateurs d'aimants permanents à terres rares, avec respectivement 10 % et 25 % du total du marché mondial. La forte croissance de ces marchés, de plus de 10 % par an au niveau mondial, est indispensable à la transition bas-carbone, mais va augmenter considérablement la demande pour les terres rares qui sont nécessaires à leur production et risque de se heurter à une offre limitée en terres rares. La demande mondiale en terres rares pour les moteurs de véhicules électriques pourrait ainsi être multipliée par dix d'ici à 2030. Pour l'éolien, la demande pourrait être multipliée par trois, en raison notamment du recours à des éoliennes toujours plus grandes qui rendent plus profitable le recours aux aimants permanents. Les autres ressources minérales dont la consommation augmentera pour l'éolien et les moteurs électriques sont le béton, le cuivre et l'acier. Ces ressources ont été étudiées dans le rapport d'étape n°2 sur les réseaux électriques.

Les aimants permanents à terres rares utilisés pour l'éolien et la mobilité électrique, appelés aimants néodyme-fer-bore ou NdFeB, sont constitués de néodyme, de praséodyme, de dysprosium et de terbium. Néodyme et praséodyme sont des terres rares légères utilisées pour leurs propriétés magnétiques, tandis que dysprosium et terbium sont des terres rares lourdes et sont utilisées pour étendre la plage thermique de ces propriétés magnétiques. Il n'existe actuellement pas d'alternatives ou de produits de substitution à performances équivalentes, mais des améliorations incrémentales permettent de réduire l'usage de terbium et de dysprosium, qui sont les terres rares les plus rares et chères.

La chaîne de valeur de la production des aimants se décompose en plusieurs étapes, qui sont étudiées dans le rapport. La première est l'extraction des terres rares dans des mines. Suivent ensuite le raffinage, la production de métaux de terres rares, la métallurgie d'alliages magnétiques et enfin la production d'aimants permanents.

La Chine est l'acteur dominant sur chacune de ces étapes, mais sa domination est la plus forte à partir de l'étape de raffinage. Plus de 85 % des capacités mondiales de raffinage puis de production d'aimants permanents sont ainsi situées en République populaire de Chine. Les centres industriels sont dominés par des entreprises publiques largement intégrées verticalement, de la mine de terres rares à la production d'aimants permanents. Le marché des terres rares et les industries qui en dépendent sont donc fortement sensibles aux décisions des acteurs publics et industriels chinois.

Depuis la fin des années 2010, des projets de mines de terres rares et d'usines de raffinage sont lancés dans plusieurs pays occidentaux, notamment en Australie et en Amérique du Nord. Si de nombreux sites contiennent des terres rares, avec une proportion variable de terres rares lourdes mais souvent faible, peu d'entre eux peuvent être exploités de façon viable économiquement. En effet, la concentration en terres rares est très variable, et parmi les dix-sept éléments constitutifs du groupe des terres rares, ce sont les terres rares lourdes ainsi que le néodyme et le praséodyme qui ont le plus de valeur. Les impacts environnementaux de l'extraction des terres rares sont principalement causés par les étapes de raffinage et les traitements engendrent parfois le rejet de composés radioactifs. Néanmoins, les tonnages traités annuellement sont faibles et contraints par des quotas en Chine.

En Europe, plusieurs sites prometteurs sont identifiés en Scandinavie et au Groenland, mais leur éventuelle exploitation n'interviendra pas avant plusieurs années. C'est pourquoi le recyclage des aimants usagés est à court terme la principale piste afin de développer une industrie européenne de production d'aimants permanents qui permettrait de réduire la dépendance de l'Union européenne aux importations.

La France n'a pas de potentiel minier pour les terres rares, mais bénéficie d'autres atouts, puisque plusieurs entreprises françaises développent de nouveaux procédés de recyclage d'aimants permanents qui réduisent les impacts environnementaux des traitements. Ces entreprises s'appuient sur les compétences des entreprises françaises qui ont dominé la métallurgie des terres rares dans les années 1970 et 1980. Le développement de cette filière du recyclage dépend de la capacité à orienter les aimants permanents usagés vers les recycleurs, et ainsi éviter leur export.

Ce constat est également vrai au niveau européen. Les acteurs français doivent donc saisir les opportunités de s'intégrer dans des chaînes de valeur européennes qui se constituent sous l'impulsion du cluster *Rare Earth Magnets and Motors* de l'*European Raw Materials Alliance*. Cette association regroupe plus de quatre cent cinquante membres, notamment industriels, académiques et gouvernementaux, et cherche à sécuriser une partie des besoins européens en terres rares et en aimants permanents à partir du recyclage d'abord, puis des projets miniers émergents sur le continent.

La croissance exponentielle du marché de l'éolien et de la mobilité bas-carbone doit s'accompagner d'un horizon d'investissement le plus stable et le plus prévisible possible pour les industriels utilisateurs d'aimants permanents, notamment les fabricants de turbines et les entreprises du secteur automobile. En effet, les fortes opportunités offertes par les politiques publiques volontaristes de soutien à ces technologies ont incité les industriels à investir dans de nouvelles capacités de production. Cependant, la viabilité de ces investissements, qui repose sur le déploiement de forts volumes au cours des prochaines années, pourrait être fragilisée en cas de retournement de marché ou de retards par rapport aux scénarios établis par les pouvoirs publics.

L'éolien en mer, particulièrement l'éolien flottant, concentre les principales opportunités de retombées industrielles dans ce domaine sur le territoire français. De nombreuses entreprises françaises peuvent ainsi valoriser leur expertise du milieu marin, héritée des projets d'aménagement portuaires et de l'extraction pétrolière et gazière, et faire de la France un acteur majeur de la filière émergente de l'éolien flottant. Le démantèlement des éoliennes en fin de vie constitue également un marché émergent qui offre des opportunités en France. Par ailleurs, les changements profonds qu'implique l'électrification de la mobilité vont bouleverser l'ensemble des acteurs de l'industrie automobile. Ces bouleversements peuvent permettre la réinternalisation et la relocalisation de certaines étapes de production, mais également menacer les emplois dans la chaîne de valeur des moteurs thermiques.

L'ensemble de ces constats conduit à formuler les recommandations qui figurent dans le tableau ci-après.

Recommandations

Sécuriser l'approvisionnement en aimants permanents et en terres rares	
Recommandation 1	Renforcer la coopération européenne des acteurs de la chaîne de valeur des aimants permanents au sein du cluster <i>Rare Earth Magnets and Motors</i> de l' <i>European Raw Materials Alliance</i> .
Recommandation 2	Intensifier les efforts de R&D et de collecte de connaissances sur le marché des aimants permanents.
Recommandation 3	Sécuriser le gisement des aimants permanents usagés en Europe pour son recyclage.
Recommandation 4	Encourager l'écoconception dans les industries utilisatrices d'aimants permanents.
Limiter les risques et exploiter les opportunités de la croissance de l'éolien	
Recommandation 5	Faciliter et accompagner la structuration de la filière éolienne en mer en France.
Recommandation 6	Sécuriser la filière de l'éolien par le cadre réglementaire.
Recommandation 7	Réduire l'impact matière de l'éolien par le recyclage, le repowering et le revamping.
Améliorer la connaissance de l'industrie des terres rares et anticiper les besoins en formation	
Recommandation 8	Améliorer la connaissance des autres filières consommatrices de terres rares.
Recommandation 9	Identifier et répondre aux besoins en formation des industries des terres rares, des aimants permanents, de l'éolien, de l'automobile et du recyclage.

Introduction

Chaque année, la Terre reçoit sous forme de rayonnement solaire l'équivalent de plus de 8 000 fois la consommation énergétique mondiale annuelle. Entre 1 et 2 % de cette énergie reçue se transforme en vents, provoqués par les mouvements d'air entre zones chaudes et froides de l'atmosphère.

Cette énergie éolienne est utilisée depuis plusieurs siècles, d'abord par des moulins qui la transforment en énergie mécanique puis aujourd'hui par des éoliennes qui produisent de l'électricité. Cette source d'énergie renouvelable est déjà la troisième plus importante filière productrice d'électricité en France, derrière le nucléaire et l'hydroélectricité. Son importance va s'accroître puisque la programmation pluriannuelle de l'énergie de 2019 prévoit de presque doubler la puissance éolienne installée en France entre 2021 et 2028. De nombreux autres pays européens prévoient des évolutions similaires, l'éolien sera donc une technologie capitale dans le cadre de la transition bas-carbone.

Un composant central des éoliennes est la génératrice, machine électrique qui permet la production d'électricité à partir de l'énergie du vent. Cet élément fonctionne selon des principes similaires à ceux des autres machines électriques, et notamment les moteurs utilisés dans les véhicules électriques, qu'ils soient hybrides ou à batteries. Ces machines électriques sont par ailleurs les principaux composants utilisateurs d'aimants permanents contenant des terres rares parmi les technologies de la transition bas-carbone, même si une part minoritaire des éoliennes en France contient actuellement de tels aimants.

Ce quatrième rapport thématique étudie la filière de l'éolien et les moteurs électriques de traction utilisés par les véhicules électriques, complétant ainsi les travaux menés dans le cadre du rapport n°3 sur la mobilité bas-carbone qui avait abordé les batteries et leurs matériaux. Ce rapport se concentrera particulièrement sur les terres rares et la chaîne de valeur des aimants permanents et ne reviendra pas sur les autres matières mobilisées pour l'éolien et les moteurs électriques comme le cuivre, l'aluminium et le béton, qui ont été étudiés dans le rapport d'étape n°2 sur les réseaux électriques et le stockage.

Après avoir exposé les grands types de machines électriques, la partie I présente les principes de fonctionnement de l'éolien, les différentes technologies éoliennes, ainsi que les systèmes de propulsion des véhicules électriques.

La partie II présente le marché de l'éolien et les matières sollicitées par la filière lors de l'installation de nouvelles capacités. Des scénarios de développement de l'éolien sont ensuite étudiés, afin d'évaluer la demande en ressources minérales au cours des prochaines années de la filière éolienne. Des prévisions de marché du véhicule électrique et du besoin en terres rares pour la motorisation électrique sont également présentées.

La partie III étudie les vulnérabilités des chaînes de valeurs qui vont de l'extraction des terres rares à l'utilisation des aimants permanents. Les risques spécifiques à la filière de l'éolien sont ensuite étudiés. Les vulnérabilités exposées sont de plusieurs ordres et diffèrent selon le positionnement dans la chaîne de valeur. L'amont est caractérisé par la concentration des industriels en Chine et les impacts sociaux et environnementaux sont typiques de l'exploitation minière. Plus en aval, la forte croissance de l'industrie éolienne, l'émergence d'acteurs chinois ainsi que les problématiques d'acceptabilité des nouvelles installations compliquent l'atteinte des objectifs fixés par les politiques publiques en matière de puissance installée et de retombées économiques.

La partie IV présente les opportunités industrielles qu'ouvrent l'industrie des terres rares, l'industrie éolienne et le marché des moteurs électriques de traction.

La partie V présente sous forme de recommandations des leviers pour réduire les risques et saisir les opportunités identifiées.

I.

Les machines électriques et les principes de l'éolien

A. Les différents types de machines électriques

Les machines électriques ont pour fonction la conversion d'énergie électrique en énergie mécanique et réciproquement. Lorsque la conversion se fait d'une énergie électrique vers une énergie mécanique, nous parlerons d'un moteur électrique. Lorsque la conversion se fait au contraire à partir d'une énergie mécanique vers une énergie électrique, nous parlerons d'une génératrice (ou d'un alternateur lorsque l'énergie produite est sous forme d'un courant alternatif).

De nombreux types de machines électriques existent. Nous nous intéresserons ici aux machines tournantes qui sont au fondement des génératrices présentes dans les éoliennes et des moteurs électriques présents dans les voitures électriques. Ces machines sont caractérisées par la présence d'un rotor, pièce mécanique mobile par rapport au stator qui est la pièce fixe de la machine.

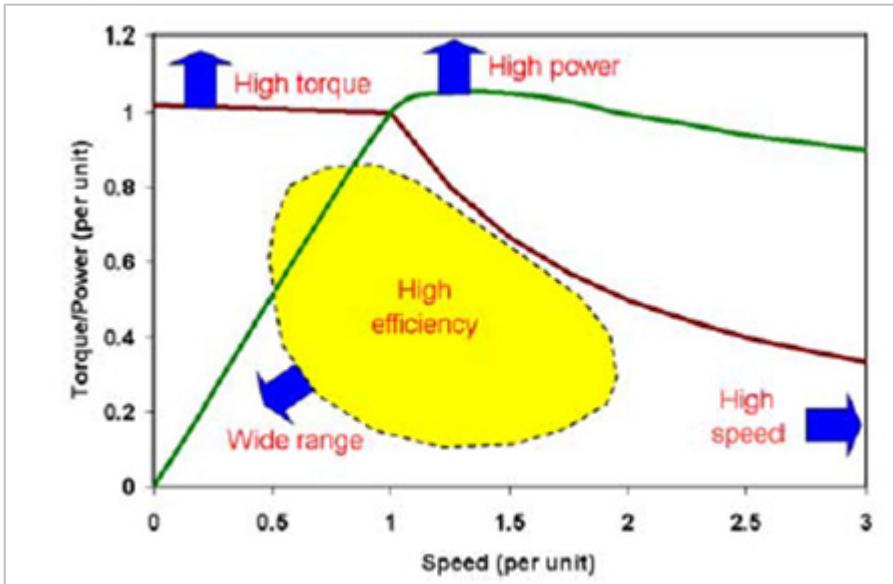
Ces machines sont souvent dites réversibles, ce qui signifie que leurs principes de fonctionnement sont similaires selon qu'elles sont utilisées comme moteurs ou comme génératrices. Par exemple, de nombreux moteurs de voitures électriques peuvent fonctionner en génératrices et ainsi récupérer de l'énergie, sous forme électrique, durant les phases de freinage. Nous pourrons donc parler dans cette partie indifféremment de moteur ou de génératrice sans perte de généralité.

Plusieurs relations sont communes aux machines électriques tournantes et permettent de calculer leurs caractéristiques importantes qui sont :

- Leur puissance P , en watts (W), qui correspond physiquement à l'énergie fournie dans un temps donné. Pour un moteur, cela renvoie à l'énergie mécanique produite ; pour un générateur, cela renvoie à l'énergie électrique produite. Nous pouvons noter, pour le secteur automobile, que 736 W équivalent à un « cheval-vapeur » (CV), l'unité souvent utilisée pour les moteurs thermiques ;
- Leur couple C , exprimé en newton mètre (N m), qui traduit la force qui fait tourner le rotor de la machine électrique. Cette force provient donc soit d'un courant électrique (pour un moteur), soit d'une force physique extérieure (pour une génératrice) ;
- La vitesse angulaire du rotor ω , ou sa vitesse de rotation, en radian par seconde (rad/s) ou tours par minute (tr/min).

La relation entre ces grandes caractéristiques est $P = C \times \omega$. Il est possible de tracer une courbe caractéristique de la machine électrique, qui représente le couple (torque) en fonction de la vitesse (speed), ce qui permet d'identifier les zones de fonctionnement de la machine, sous les courbes. Ainsi sur *la figure 1*, la zone de haute efficacité du moteur est indiquée en jaune. Cette zone est centrale, alors que les zones de fort couple, soit lorsque la force mécanique est la plus forte (en haut à gauche) et de haute vitesse, soit lorsque le moteur tourne le plus vite (en bas à droite) sont des zones dans lesquelles le moteur est moins efficace.

Figure 1 : diagramme vitesse (speed) - couple (torque) d'un moteur électrique



Notes : en rouge : le couple (torque). La courbe verte représente la puissance délivrée.

Source : Z.Q. Zhu and D. Howe. Electrical machines and drives for electric, hybrid, and fuel cell vehicles. Proceedings of the IEEE, 95:746–765, 2007

Nous pouvons mentionner comme paramètre important le rendement d'une machine électrique, qui est le rapport entre l'énergie convertie en sortie et l'énergie amenée dans le système de conversion. Par exemple, pour des moteurs électriques, le groupe Renault annonce un rendement de l'ordre de 90 %¹, ce qui signifie que seuls 10 % de l'énergie électrique injectée dans le moteur ne sont pas transformés en énergie mécanique. Ces pertes peuvent être thermiques ou dues à des interactions magnétiques dans le moteur.

La première distinction que nous pouvons faire entre les différents types de machines électriques est la nature de l'énergie électrique considérée, qu'elle soit sous forme de courant continu ou alternatif.

Il existe également des machines dites universelles, qui fonctionnent avec les deux types de courants, mais elles ne sont pas utilisées pour la propulsion des véhicules électriques ni la génération éolienne. Elles ne seront pas étudiées par la suite.

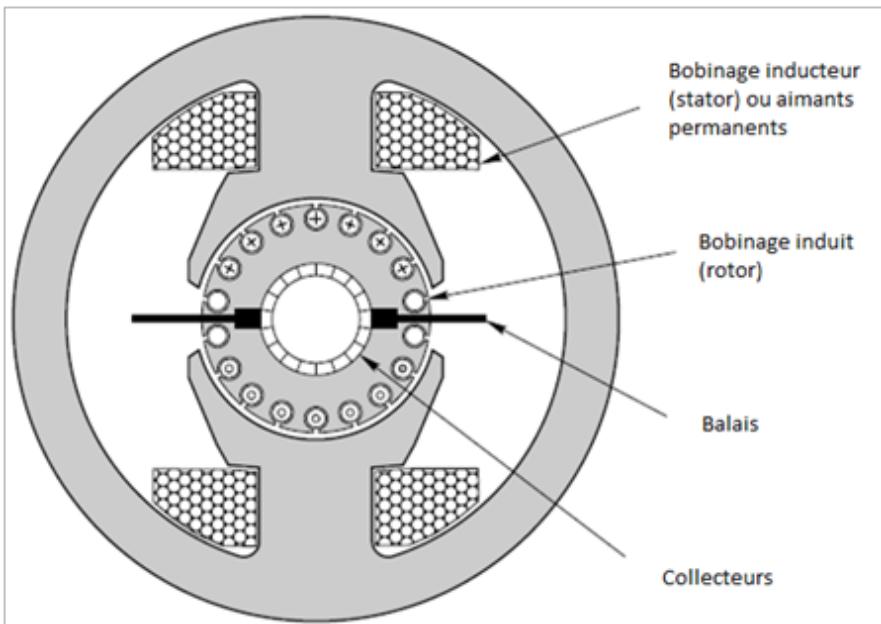
1. LES MACHINES À COURANT CONTINU

Les machines à courant continu sont constituées de deux bobinages, situés sur le stator et le rotor (figure 2). Le bobinage inducteur est alimenté en courant continu (dans le stator, qui peut être remplacé par des aimants permanents). Son rôle est de créer un champ magnétique qui interagit avec un champ généré par la circulation d'un courant dans le rotor, au sein du bobinage induit.

Le courant qui circule dans le bobinage du rotor est, soit imposé par une alimentation (le système fonctionne comme un moteur qui fait tourner le rotor), soit induit par la rotation du rotor au sein du champ magnétique créé par le stator (la machine fonctionne en génératrice). Un système balais (*brushes*)/collecteur permet de faire circuler le courant entre le bobinage du rotor et un circuit électrique extérieur (figure 2).

¹ www.renaultgroup.com/news-onair/actualites/le-rendement-dun-moteur-de-voiture-electrique/

Figure 2 : schéma d'un moteur à courant continu

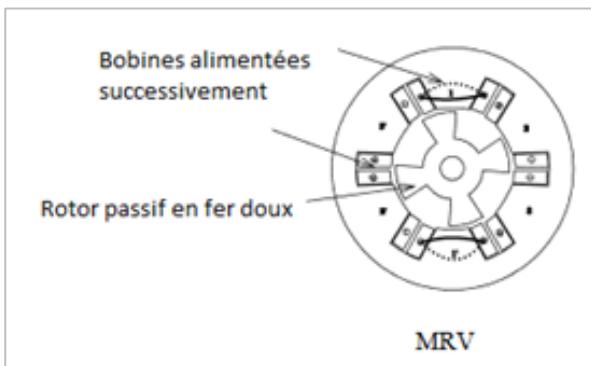


Source : adapté à partir de Austin Hugues, *Electric motors and drives*, 3rd edition, 2006

Un autre type de moteurs à courant continu inclut les moteurs dits pas-à-pas. Deux types de ces moteurs existent et peuvent être combinés en un moteur dit hybride. On parle alors de *PM assisted synchronous reluctance motors*.

Les premiers sont les moteurs à réluctance variable (MRV ou SRM, *Switched Reluctance Motors*). Dans ce cas, le rotor est composé de fer doux², et le stator seul est alimenté en courant. Celui-ci est composé de plusieurs bobines qui sont alimentées successivement (« pas-à-pas »). Les champs magnétiques générés entraînent alors le rotor qui s'aimante sous l'effet des champs dont la force varie en raison de la distance variable entre les différentes bobines et le rotor (en raison de sa forme « à dents ») (figure 3).

Figure 3 : schéma d'un moteur à réluctance variable



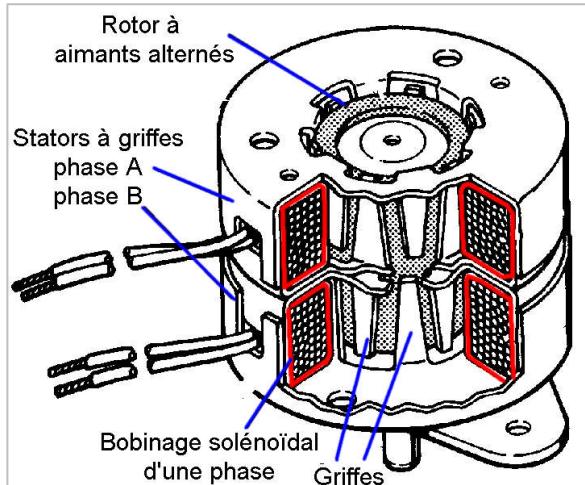
Source : à partir de Multon et Jacques (1993)³

² Fer ou acier qui s'aimante facilement lorsqu'il est soumis à un champ magnétique. On parle parfois de tôle magnétique. Le fer doux est réalisé à partir d'alliage de fer avec du silicium et de l'aluminium.

³ Bernard Multon, Claude Jacques. Comparaison de deux moteurs électriques autopilotés : le moteur synchrone à aimants permanents et le moteur à réluctance variable à double saillance. Congrès réalités et perspectives du véhicule électrique, Nov 1993, La Rochelle, France. pp.295-302. hal-00673969

Lorsque le rotor est composé d'aimants permanents au lieu de fer doux, on parle de moteurs à aimants permanents (ou PM BLDC Permanent Magnets Brushless DC Motors). Le fonctionnement du stator reste similaire à celui des moteurs à réductance variable. La principale différence avec les MRV est que le rotor reste aimanté même en l'absence d'alimentation des bobines (figure 4).

Figure 4 : schéma en coupe d'un moteur pas-à-pas à aimants permanents



Source : Bernard Multon

Ces machines permettent notamment de s'affranchir du système de balais/collecteurs, qui induit une certaine fragilité et nécessite plus d'entretien.

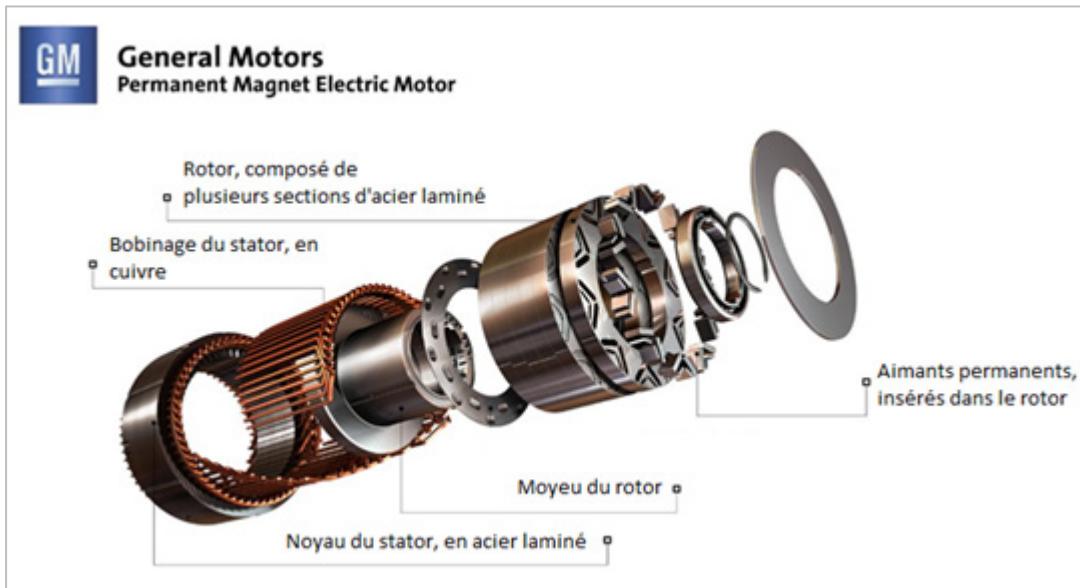
Le dernier type de moteurs dans cette catégorie sont les moteurs à réductance synchrone (*SynRM*, *Synchronous Reluctance Motors*), qui sont en fait des moteurs hybrides qui présentent les avantages des moteurs à aimants permanents et des moteurs asynchrones (voir ci-dessous dans la partie I.A.3).

2. LES MACHINES SYNCHRONES

Une machine synchrone est une machine à courant alternatif : le courant généré ou utilisé par la mise en rotation du rotor est donc alternatif.

La vitesse de rotation du rotor est directement liée à la fréquence du courant qui traverse le stator, qui est constitué de plusieurs bobines. Le rotor peut être constitué d'un bobinage (alimenté en courant continu) ou d'aimants permanents. Contrairement aux machines à courant continu à balais, les aimants permanents peuvent donc remplacer le bobinage du rotor et non celui du stator (figure 5).

Figure 5 : vue éclatée d'un moteur à aimants permanents



Source : à partir de General Motors

La variation du champ généré par la circulation du courant variable dans les bobines du stator (appelé alors « champ tournant ») entraîne la mise en mouvement du rotor en mode moteur. Au contraire en mode générateur la mise en mouvement du rotor génère un champ qui crée un courant alternatif dans le stator. La différence avec les moteurs pas-à-pas réside dans le fait qu'un courant alternatif circule en permanence dans le stator dans le cas d'une machine synchrone, alors que dans le cas d'une machine à réducteur le courant est continu et alimente successivement les bobines mais pas en permanence.

La vitesse de rotation du rotor peut être variable.

Le type de rotor de la machine permet de définir les deux grands types de machines synchrones :

- Les moteurs synchrones à rotor bobiné (EESM, *Electrically Excited Synchronous Motors*). Dans l'éolien, ce type de génératrice est dite de type EESG (*Electrically Excited Synchronous Generators*) ;
- Les moteurs synchrones à aimants permanents. Les génératrices opérant dans l'éolien sur ce principe sont des PMSG (*Permanent Magnet Synchronous Generators*).

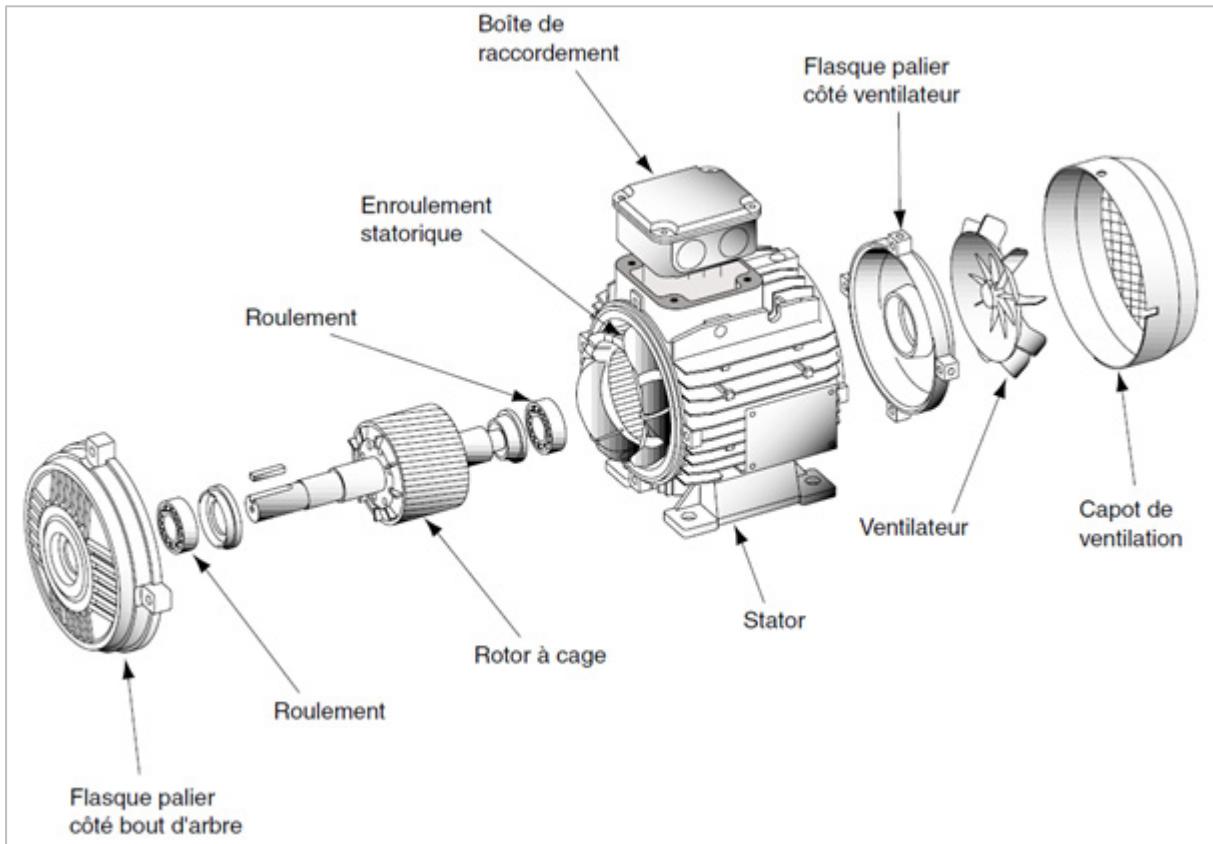
3. LES MACHINES ASYNCHRONES

Les machines asynchrones, également appelées machines à induction (IM, *Induction Motors*), présentent les mêmes types de stators que les machines synchrones. Leur principale différence est que le rotor est constitué d'un bobinage non alimenté.

Lorsque les courants variables passent dans les bobines du stator, le champ magnétique tournant généré balaie alors le bobinage du rotor en induisant des courants induits dans ces bobines. Ces courants entrent alors en interaction avec le champ généré par le stator et entraînent la mise en rotation du rotor. Le rotor tourne cependant à une vitesse inférieure à celle du courant qui parcourt le stator, il n'y a donc pas de synchronisation entre le courant du stator et la vitesse du rotor, contrairement au cas des machines synchrones.

Contrairement aux autres machines présentées, les machines asynchrones ne permettent pas facilement des variations de vitesse. Elles nécessitent donc des multiplicateurs (*gearbox*) qui permettent d'adapter la vitesse mécanique, d'un essieu par exemple dans une voiture électrique ou d'une turbine éolienne, à la vitesse nominale de la machine asynchrone.

Figure 6 : schéma éclaté d'un moteur asynchrone, le rotor est en court-circuit

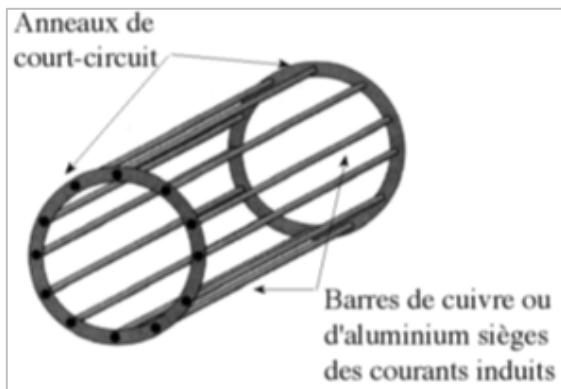


Source : extrait du cahier technique Schneider Electric n°207

Il existe plusieurs types de moteurs asynchrones, notamment :

- Ceux équipés de rotors à cage d'écuréuil, (pour l'éolien SCIG, *Squirrel Cage Induction Generators*), ainsi nommés en raison de la forme du rotor (figure 7) ;

Figure 7 : exemple de cage d'écuréuil

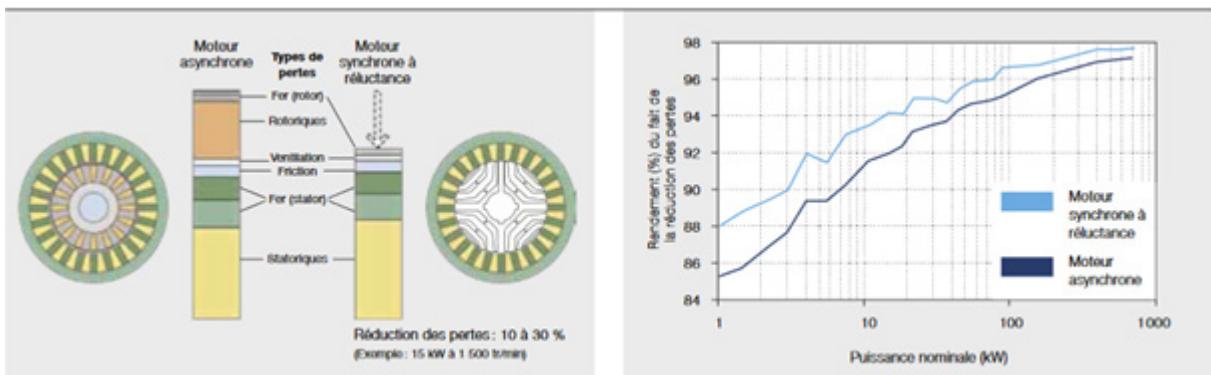


Source : école supérieure de technologie de Fès

- Les machines asynchrones à double alimentation, ou en cascade hyposynchrone (DFIG, *Double Fed Induction Generators*), dans lesquelles une partie du courant généré dans le rotor peut être captée. Ce procédé permet d'obtenir une vitesse de rotation du rotor variable.

Ce type de moteurs présente cependant l'inconvénient de générer plus de pertes que les moteurs à réluctance (*figure 8*).

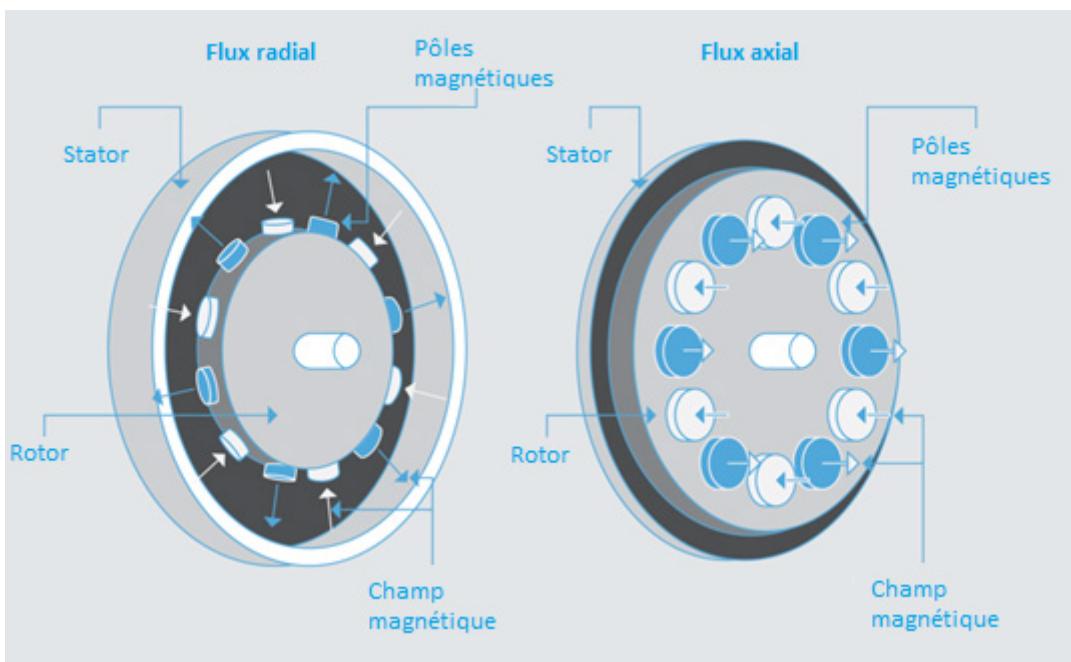
Figure 8 : comparaison des pertes et de l'efficacité des moteurs synchrones à réluctance et asynchrones



Source : revue ABB

Un dernier type de moteur qu'il convient de mentionner est le moteur à aimant permanent sans fer à flux axial (*Axial Flux Ironless Permanent Magnet Motor*). Il s'agit d'un nouveau type de moteur, le plus avancé⁴, qui est utilisé dans les véhicules électriques. Les principaux avantages de l'absence de fer sont de réduire le poids et de réduire les pertes magnétiques dans les armatures. Le champ magnétique n'est plus radial, dans la direction du centre du moteur, mais axial (*figure 9*).

Figure 9 : différences entre machines à flux radial et axial



Source : adapté à partir de motortrend.com

⁴ Parag Jose, C., Meikandasivam, S. (2016). A Review on the Trends and Developments in Hybrid Electric Vehicles. Innovative Design and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering, 211–229.

B. Principes de fonctionnement et technologies de l'éolien

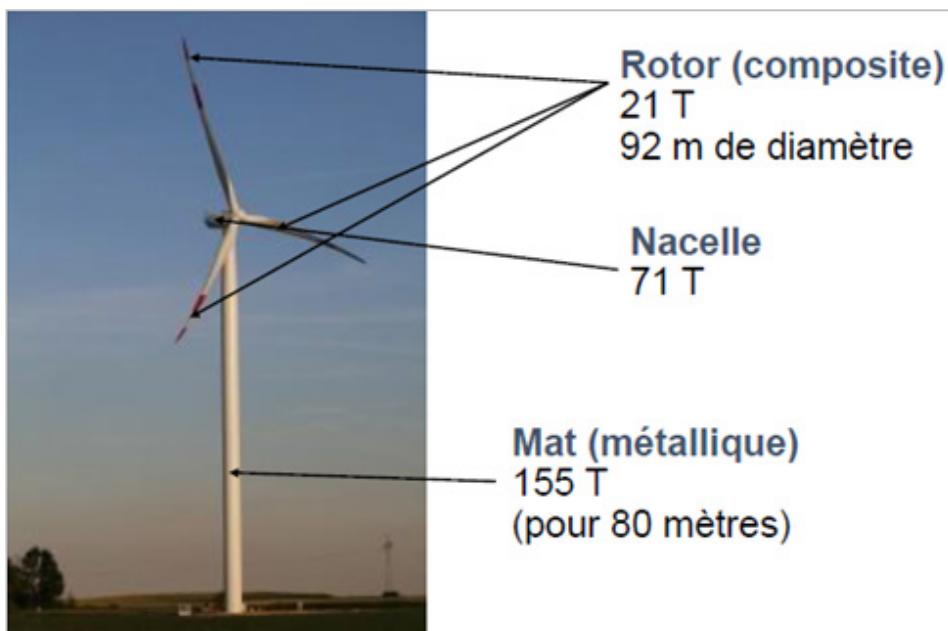
1. PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT

L'énergie éolienne correspond à la récupération de l'énergie cinétique du vent. La puissance incidente du vent, de vitesse V , traversant l'aire A est $P = \frac{1}{2} \times \rho_{\text{Air}} \times A \times V^3$, avec ρ_{Air} pour la densité de l'air. Ainsi, plus l'aire balayée est grande, plus la puissance récupérable est importante.

La théorie physique indique que la puissance récupérable maximale, dite limite de Betz est d'environ 59 % de la puissance du vent traversant le dispositif éolien.

Le grand éolien est l'objet principal de cette étude, mais d'autres types existent plus marginalement (voir encadré *infra*). Les éoliennes dites de modèle « danois » à trois pales sont aujourd'hui majoritaires, pour des questions de coûts et d'acoustique, comme par exemple l'éolienne Senvion MM92 de 2,05 MW (*figure 10*).

Figure 10 : principaux éléments d'une turbine éolienne Senvion MM92 de 2,05 MW



Source : Ifpen

Les technologies alternatives de l'éolien : axe vertical, petit éolien...

Les éoliennes à axe vertical : développées depuis les années 1980, elles existent surtout sous forme de prototypes à petite échelle. Les avantages généraux que peut procurer l'éolien à axe vertical incluent la possibilité de mettre la génératrice en bas de la turbine, ce qui abaisse le centre de gravité et facilite la conception. Les inconvénients, pour le moment rédhibitoires, incluent des problèmes de vibrations, notamment lorsque les modèles voient leur taille augmenter, des questions d'aérodynamisme complexes et l'incapacité des turbines à démarrer leur rotation sans intervention extérieure. Actuellement, il n'y a pas de machines à axe vertical de grandes puissances (de l'ordre du MW) industrialisées.

Le petit éolien : les petites éoliennes, de puissances électriques de l'ordre de quelques dizaines de kW, peuvent correspondre à de nombreuses solutions technologiques mais qui ne sont pas toutes efficaces sur le plan énergétique. Un des inconvénients à ce niveau de taille de turbines, inférieur au grand éolien de l'ordre du MW, est la difficulté à caractériser la ressource en vent, notamment en raison des plus grandes interférences proches du sol, ou dans les milieux urbains. Le potentiel de développement à l'échelle industrielle est limité au niveau français. Les effets d'échelle sont également peu favorables, contrairement au grand éolien.

Le grand éolien présente l'avantage de rendements d'échelles croissants. D'une part, la puissance du vent récupérable augmente selon une fonction de puissance de la taille des pales et des mâts et non linéairement. Ainsi la puissance des turbines, proportionnelle à l'aire balayée, augmente plus vite que leur taille, par exemple une turbine disposant de pales d'un diamètre de 110 m peut délivrer une puissance de 2,6 MW et une turbine munie de pales d'un diamètre de 158 m peut fournir près de 5 MW, soit un quasi-doublement de la puissance pour une augmentation de l'ordre de 50 % de la taille. Le coût des pales étant lié à leur longueur, notamment le coût de leurs matières, il y a donc des rendements d'échelle croissants. Cette augmentation de puissance compense les efforts mécaniques plus importants sur le mât, qui augmentent avec la taille du rotor et la hauteur de la nacelle. Un plus grand rotor, plus haut, permet également de capter plus d'énergie du vent. De plus grandes éoliennes, plus puissantes, permettent d'installer moins de turbines pour un parc éolien de puissance constante. Ceci permet ainsi de réduire le nombre d'opérations d'installation et de maintenance.

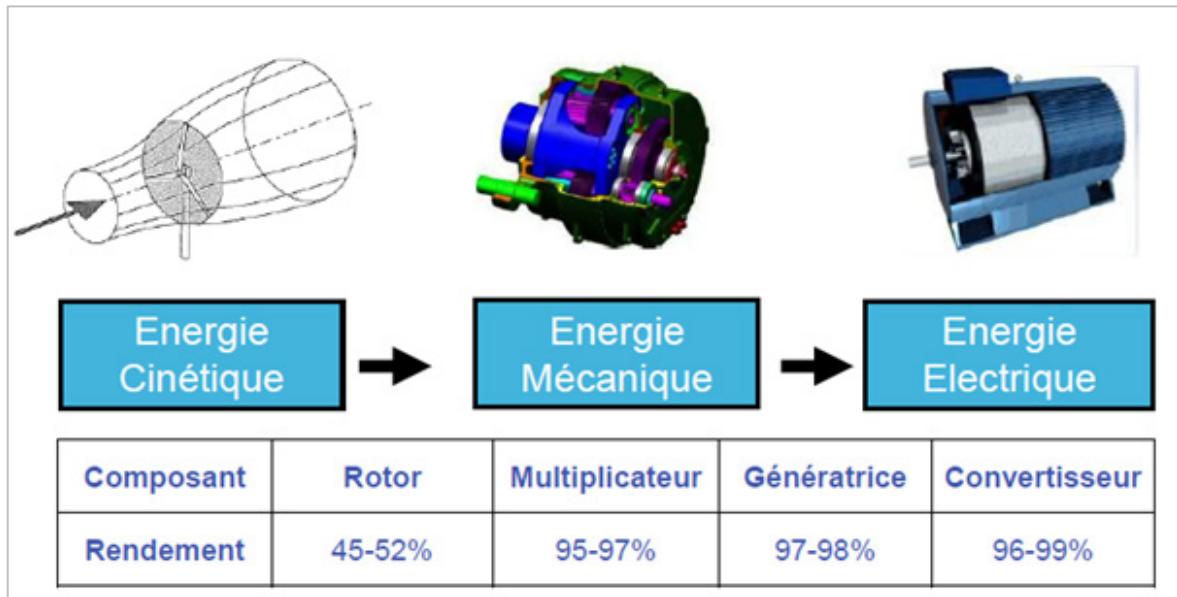
Ces rendements d'échelle croissants rendent donc intéressante la construction d'éoliennes toujours plus grandes, avec des pales plus longues afin de balayer de plus grandes surfaces (l'énergie captée est proportionnelle au carré de la longueur des pales, comme étant la surface balayée par les pales). Ceci pose des problèmes techniques, puisqu'il faut des matériaux plus rigides au fur et à mesure de l'augmentation de la longueur des pales. **La tendance est donc de remplacer la résine époxy et la fibre de verre par des polymères hybrides qui incluent de la fibre de carbone dans les pales.** La Chine a testé en 2021 des pales de 150 m. Actuellement le record est de 107 m, détenu par LM Wind Power, filiale de General Electric (GE). Les plus grands constructeurs d'éoliennes offshore annoncent ou testent actuellement des éoliennes de 14 à 16 MW (soit un rotor de 242 m pour l'éolienne MySE 16.0-242 du chinois MingYang, dont la mise en service est prévue en 2024).

Les pales sont orientées dans le sens du vent grâce aux moteurs de *yaw*, qui permettent de tourner la nacelle. Elles se mettent alors en rotation sous l'effet du vent. L'énergie cinétique est convertie en énergie de rotation puis transmise à un arbre mécanique (arbre rotor), entraîné en rotation par le rotor de l'éolienne. Dans la plupart des éoliennes, un multiplicateur permet d'élever la rotation de l'arbre. Ce multiplicateur permet de transformer la rotation des pales d'une dizaine de tours/minute à 1500 tours/minute. Chaque pale peut être orientée pour contrôler les efforts du rotor, notamment quand le vent est trop fort pour ne pas dépasser la puissance nominale de la génératrice. La rotation de la pale se fait grâce à un moteur dit de *pitch*, pour capter de moins en moins d'énergie, jusqu'à la possible mise en drapeau de la pale, qui ne récupère alors plus d'énergie du vent. La figure 13 présente l'agencement des différents composants d'une nacelle pour une génératrice munie d'un multiplicateur.

Quand les vents sont trop forts (en général à partir de 25 m/s, soit 90 km/h), les pales sont mises en drapeau pour annuler l'effort du vent, puis le frein mécanique met en arrêt la machine. Les éoliennes sont dimensionnées pour résister aux événements météorologiques extrêmes et peuvent être équipées de batteries qui permettent de faire fonctionner les différents systèmes (*yaw*, *pitch*, freins mécaniques) même en cas de coupure du réseau électrique.

C'est dans la nacelle que la conversion de l'énergie a lieu selon la chaîne suivante : énergie cinétique → énergie mécanique → énergie électrique (figure 11).

Figure 11 : schéma de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne et des rendements de chaque étape



Source: Ifpen

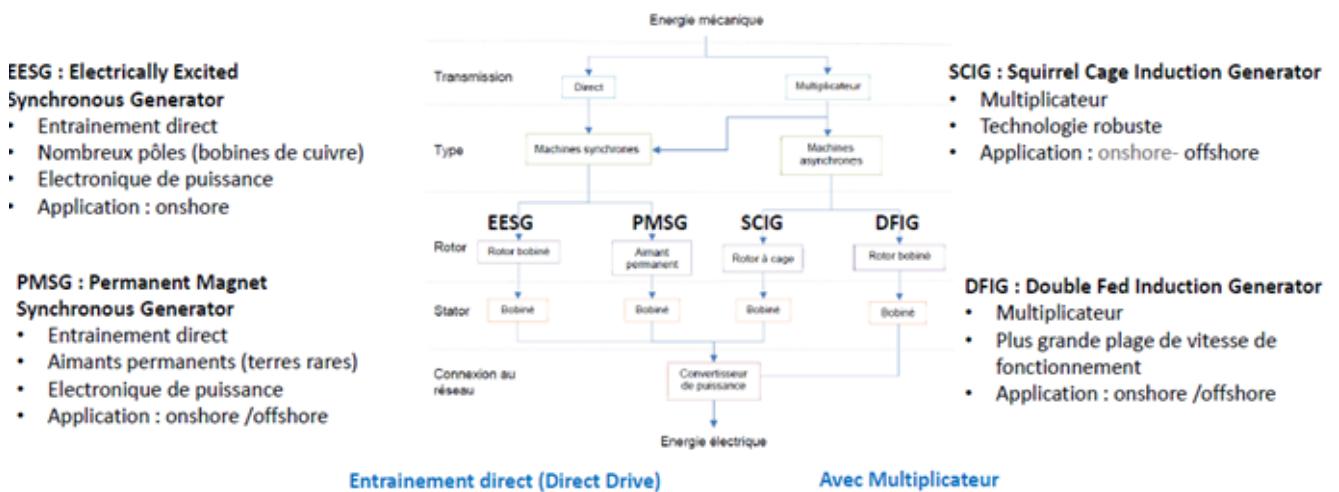
Les rendements globaux observés en pratique de cette chaîne sont de 42-50 %, à comparer au maximum théorique de 59 %. Au-delà des pertes au niveau de la conversion électromécanique, quelques pertes électroniques existent lors du transport de l'électricité. Celles-ci sont de l'ordre de 1 à 2 % et ne sont pas spécifiques à l'éolien.

Finalement, un paramètre important de la performance des éoliennes est celui de la disponibilité. Le temps de disponibilité est défini comme étant le nombre d'heures durant lesquelles l'éolienne peut fonctionner, divisé par le nombre d'heures dans une année. En général, les fabricants de turbines s'engagent sur une disponibilité des machines d'au moins 97 % du temps.

2. TECHNOLOGIES ET COMPOSANTS DE LA NACELLE

Deux grandes familles de génératrices existent (synchroïques et asynchroïques), ainsi que différents types de technologies au sein de chaque famille (figure 12).

Figure 12 : types de génératrices existant pour l'éolien

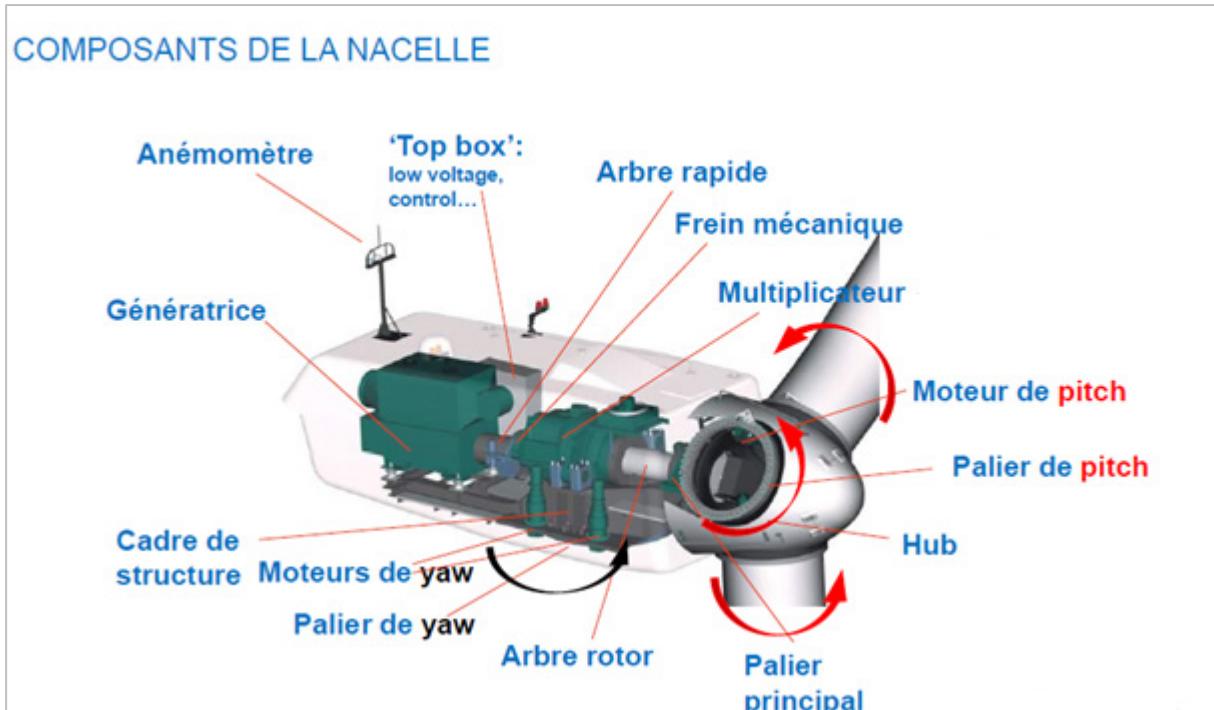


Source : Ifpen

Pour rappel⁵, les génératrices asynchrones créent un courant électrique par la mise en rotation du rotor (composé de conducteurs massifs ou bobinés) dans un champ magnétique tournant créé par le stator (conducteur bobiné alimenté en courant alternatif). A contrario, le courant dans une génératrice synchrone est créé dans le stator, par la mise en rotation d'un champ magnétique dans le rotor. Le champ magnétique dans le rotor peut être créé par une alimentation électrique (EESG) ou grâce à des aimants permanents (PMSG).

Ces différences fondamentales entraînent des besoins technologiques différents, puisque les génératrices asynchrones, majoritaires pour l'éolien terrestre sous leur forme DFIG, vont nécessiter un multiplicateur pour passer d'une rotation de l'ordre de 10 tr/min à un courant de 50 Hz, équivalent à 50 cycles/s.

Figure 13 : composants d'une nacelle munie d'un multiplicateur



Source : Ifpen

À l'exception des technologies de double alimentation (DFIG), les génératrices asynchrones présentent l'inconvénient de ne pas se prêter aisément à des vitesses de rotation variables, au contraire des génératrices synchrones qui permettent donc une meilleure récupération de l'énergie cinétique. Ces dernières sont dites à entraînement direct, c'est-à-dire qu'elles ne nécessitent pas de multiplicateurs. La conversion de l'électricité produite à la fréquence du réseau se fait par l'électronique de puissance. L'absence de multiplicateur permet un meilleur rendement (figure 8), une meilleure fiabilité et nécessite moins d'entretien des machines. Par ailleurs, les génératrices à aimants permanents permettent de réduire la masse par rapport aux alternatives (notamment car d'après le projet SURFER de l'Ademe, les éoliennes terrestres à aimants permanents nécessitent près de deux fois moins de cuivre, soit environ 4 tonnes de moins par MW installé que les éoliennes n'en contenant pas), c'est pourquoi des génératrices synchrones à aimants permanents équipent la majorité des éoliennes offshore actuelles. Au contraire, à l'heure actuelle, la majorité des éoliennes terrestres en France ne contiennent pas d'aimants permanents.

Une piste de recherche actuelle pour limiter le recours aux aimants permanents est la supraconductivité à haute température. Plusieurs projets de recherche existent, notamment un projet porté par General Electric, qui bénéficie d'un financement du Department of Energy américain de plusieurs dizaines de millions de dollars.

⁵ Voir partie I.A.

3. LES FILIÈRES DE L'ÉOLIEN : TERRESTRE, EN MER POSÉ, EN MER FLOTTANT

a) L'éolien terrestre

L'**éolien terrestre** (*onshore*) en France se caractérise par des projets de quelques éoliennes de puissance de 2 à 3,5 MW pour les nouveaux projets. Les dimensions typiques des éoliennes sont de l'ordre de 80 à 100 m pour les mâts, pour des rotors de 80 à 110 m de diamètre (ce qui correspond à une hauteur maximale d'environ 150 m). Le plus souvent, les génératrices utilisées sont asynchrones (voir parties I.A. et I.B.2). Les fondations des turbines sont en béton et le raccordement se fait en général à un poste de livraison du gestionnaire de réseau de distribution d'électricité⁶. **Le facteur de charge, qui est le rapport entre l'énergie effectivement produite durant un laps de temps donné et l'énergie qu'elle aurait pu générer à sa puissance nominale pendant la même période** constaté sur les turbines, installées est en moyenne de 24-25 %.

Repowering et revamping

Les durées de vie des premiers parcs éoliens terrestres en France étaient initialement estimées à 15 ans. Leur durée de vie est finalement de l'ordre de 20 ans, ces parcs arriveront en fin de vie au cours des prochaines années. Par ailleurs, les évolutions technologiques de l'éolien, notamment l'apparition de machines plus grandes et plus efficaces rendent intéressants l'amélioration des machines installées, voire leur remplacement par des systèmes plus modernes.

Le *revamping* consiste au changement de certaines pièces de l'éolienne comme les pales ou la génératrice.

Au contraire, le *repowering* correspond à la reconception totale d'un parc éolien et au remplacement intégral des machines.

Le *repowering* des parcs arrivés en fin de vie représente un enjeu majeur pour différentes raisons. En effet, cela permet le maintien voire l'augmentation des capacités installées, le remplacement d'anciennes technologies par des technologies nouvelles et plus performantes, mais également de disposer de moins de mâts à puissance équivalente ou d'une puissance supérieure à nombre de mâts constant et donc à espace occupé constant.

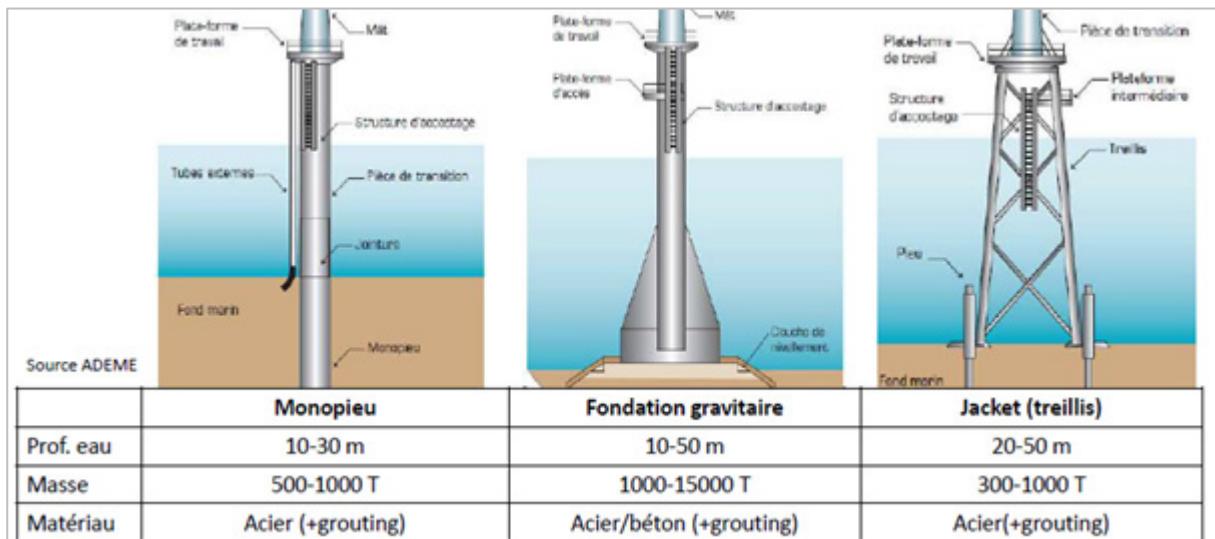
Dans d'autres pays, des facteurs de charge supérieurs à 30 % sont parfois constatés, grâce au recours à des arbitrages technico-économiques, entre le couple et la taille du rotor, et avec des turbines de plus grandes tailles. Les arbitrages dépendent également d'autres paramètres, comme la ressource en vent, la turbulence et l'acceptabilité sociale du projet.

b) L'éolien en mer posé

Au contraire des projets terrestres, les **projets posés offshore** (en mer) font plusieurs centaines de MW, et jusqu'à plusieurs GW pour certains. Les éoliennes installées actuellement sont de 8-10 MW mais les parcs en cours d'attribution seront réalisés avec des turbines de 12 à 15 MW. Plusieurs types de fondations sont possibles : monopie (ou monopile), gravitaire et jacket (figure 14).

⁶ Voir le rapport d'étape n°2 consacré aux réseaux électriques pour plus de précisions quant à l'organisation des réseaux électriques et de leurs acteurs.

Figure 14 : présentation des différents types de fondations⁷ pour l'éolien en mer posé



Sources : Ifpen ; Ademe

Le choix de ces fondations dépend des caractéristiques techniques du site, notamment de la profondeur, de la dureté du sol, des contraintes en terme de houle et de courants. Les facteurs de charge peuvent dépasser les 40 %, voire 50 %, grâce aux meilleures conditions de vent en mer et aux plus grands rotors qui permettent de mieux capter l'énergie cinétique. Le raccordement se fait grâce à des sous-stations en mer et à un raccordement très haute tension en courant alternatif, puis peut-être en courant continu pour certains projets à venir.

Le milieu marin impose des choix technologiques afin de lutter contre la corrosion des éoliennes et de leurs fondations. Des alliages spécifiques permettent de limiter la corrosion sur les tours et les nacelles, mais les fondations métalliques nécessitent des dispositifs spécifiques qui sont principalement de deux types. Les anodes sacrificielles sont des blocs métalliques, composés essentiellement d'aluminium (95 %) et de zinc (environ 5 %), qui concentrent sur eux-mêmes le processus de corrosion et se dissolvent progressivement dans l'eau⁸. Ces dispositifs sont classiques dans le milieu offshore mais tendent pour les éoliennes européennes à céder la place à des protections par courant imposé. Dans ce cas, les éléments métalliques des fondations sont parcourus par un léger courant qui permet d'éviter la corrosion. Ces dispositifs sont technologiquement matures et leur faible coût n'impacte pas les projets.

⁷ Les fondations sont principalement composées d'acier et/ou de béton. Le grouting correspond au ciment qui permet de faire les jonctions entre la fondation et le sol marin.

⁸ Ces éléments [Al et Zn] sont naturellement présents dans l'environnement. Les retours d'expérience étrangers et les études d'impact sur des projets français montrent que l'impact des parcs éoliens en mer sur la qualité de l'eau est négligeable. Néanmoins, des travaux sont en cours afin de déterminer les impacts cumulés de nombreuses installations utilisant ce type de dispositif.

La problématique du raccordement au réseau électrique

Le raccordement des installations de production électrique renouvelable fait partie des deux problématiques étudiées dans le rapport d'étape n°2 sur les réseaux électriques et les technologies de stockage⁹.

D'une part, l'installation de câbles électriques entre les zones de production et le réseau est parfois difficile, comme dans le cas de l'éolien en mer par exemple. D'autre part, les lieux de production sont parfois très éloignés des lieux de consommation, souvent concentrés dans les grandes métropoles.

En ce qui concerne l'éolien terrestre, il s'inscrit dans les schémas régionaux de raccordement au réseau des énergies renouvelables (S3RENR), produits par RTE, gestionnaire du réseau de transport d'électricité. Ces plans permettent de planifier les travaux nécessaires sur les infrastructures de transport électrique, en prenant en compte les objectifs locaux fixés par les schémas régionaux d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires (Sraddet). Selon la puissance de l'installation raccordée, la connexion au réseau électrique peut se faire au niveau du réseau de distribution ou du réseau de transport de l'électricité.

Le raccordement des parcs éoliens en mer est lui toujours réalisé par RTE, dans le cadre d'une convention de raccordement au réseau de transport d'électricité, signée avec le lauréat du projet.

Le raccordement des nouvelles installations peut avoir un impact matière important, notamment pour le fer, l'aluminium, le cuivre et le béton. Les schémas décennaux publiés par RTE prévoient des analyses des besoins en matière selon les scénarios pour le réseau et le déploiement des EnR.

Des intensités matières pour les différents composants du réseau électrique sont disponibles dans le rapport d'étape n°2 et dans les résultats du projet SURFER¹⁰ mené par l'Ademe.

c) L'éolien en mer flottant

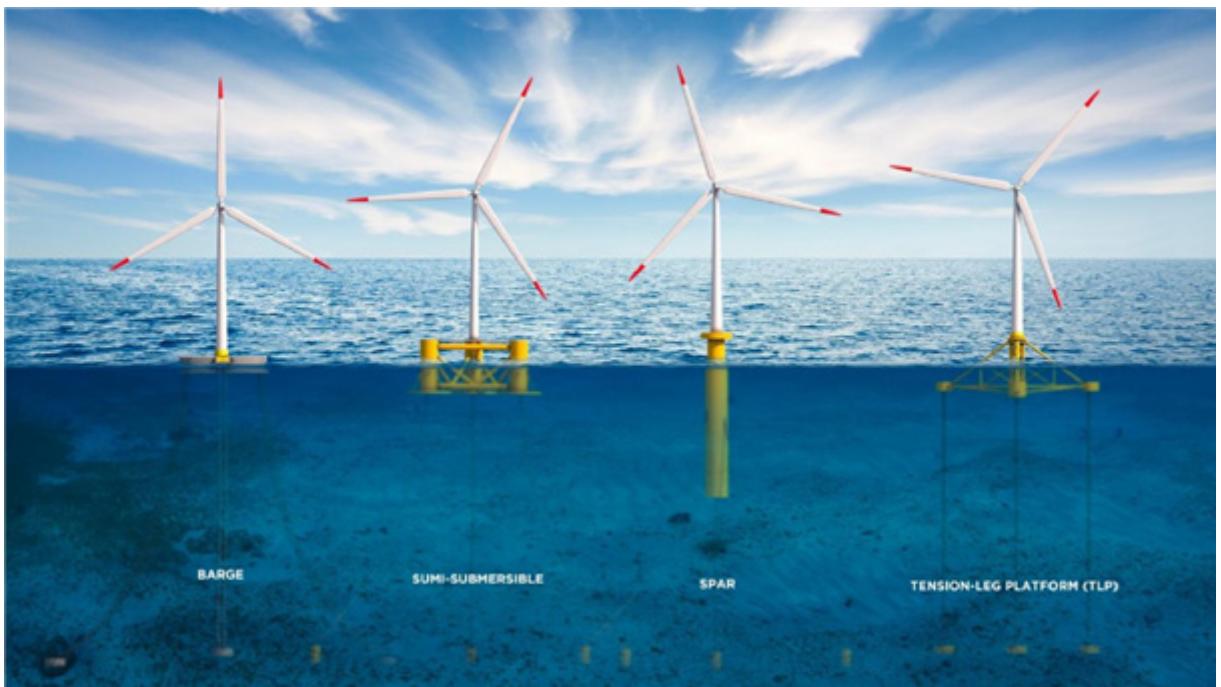
L'**éolien flottant** est également situé en mer, mais permet de s'affranchir des contraintes de profondeur (*figure 14*), les fondations posées ne permettent de se fixer à des fonds que jusqu'à une cinquantaine de mètres et ne sont pas viables économiquement au-delà et donc d'accéder à des productibles plus élevés (par des vents plus forts et plus réguliers) en allant plus loin des côtes. La principale différence avec l'éolien *offshore* posé vient de l'absence de fondations posées sur le fond marin, ces fondations étant remplacées par des flotteurs. Il n'existe pas encore de modèles de flotteurs de série, contrairement aux fondations posées, mais le fort potentiel technique de l'éolien flottant et le lancement de premiers appels d'offres vont permettre le passage à l'industrialisation de la production et de l'installation des flotteurs.

Plusieurs concepts existent à l'heure actuelle en prototypes ou dans des projets pilotes (*figure 15*). Ces concepts sont majoritairement inspirés du monde des plateformes pétrolières et gazières, mais aussi parfois du monde de la construction navale, et sont composés d'acier et/ou de béton.

⁹ Les réseaux électriques - lignes électriques, stockage stationnaire et réseaux intelligents : choix technologiques, enjeux matières et opportunités industrielles

¹⁰ <https://librairie.ademe.fr/energies-renouvelables-reseaux-et-stockage/4654-surfer.html>

Figure 15 : exemples de types de flotteurs envisagés ou testés pour l'éolien flottant



Sources : Ifpen ; National Renewable Energy Laboratory (NREL : laboratoire national américain des énergies renouvelables)

C. Les moteurs et les systèmes de propulsion des véhicules électriques

Le système de propulsion est central dans les véhicules, les moteurs électriques sont donc des composants cruciaux pour le déploiement des véhicules électriques.

Les voitures électriques peuvent avoir un à plusieurs moteurs selon le type de véhicule et les fonctions qu'ils remplissent (traction, propulsion, auxiliaires, etc.)

Tout comme pour les systèmes batteries étudiées dans le rapport d'étape n°3, le secteur automobile présente une grande exigence sur plusieurs caractéristiques des moteurs utilisés pour la propulsion¹¹ :

- Une haute densité énergétique : le rapport puissance/poids du système moteur doit être le plus élevé possible, à tous autres paramètres constants. En effet, le poids et la taille du moteur sont dimensionnants pour le reste du véhicule et peuvent pénaliser ses performances et son autonomie ;
- Un fort couple, notamment à faible vitesse pour le démarrage et pendant les accélérations ;
- Une efficacité maintenue à différents régimes de vitesse ;
- Un faible coût et des composants disponibles facilement : l'industrie automobile s'adresse à un marché de masse et le coût et la disponibilité des composants sont cruciaux pour un déploiement à grande échelle ;
- Robustesse et fiabilité : les véhicules doivent pouvoir fonctionner plusieurs années, avec un minimum d'entretien et un risque minimal de pannes. Les processus de certification imposent par ailleurs un certain niveau d'exigence sur les composants-clés des véhicules mis sur le marché ;
- Une faible génération de bruit et de chaleur ;
- Des plages de températures de fonctionnement suffisamment importantes. Dans le rapport d'étape n°3, nous indiquons qu'une plage de - 20° à + 60°C est standard dans l'industrie automobile.

À partir de ces conditions, plusieurs systèmes sont envisageables. Un résumé des avantages et inconvénients des différents types de moteurs utilisés est proposé *infra* (tableau 1). Cette comparaison ayant été réalisée en 2017, certaines caractéristiques ont pu évoluer depuis.

Tableau 1 : récapitulatif des avantages et des inconvénients des différents types de moteurs électriques utilisés pour la propulsion des véhicules électriques

Type de moteur	Avantages	Inconvénients	Véhicules équipés de ce type de moteur
Moteur à courant continu (à balais)	Couple maximal à faible vitesse	<ul style="list-style-type: none">• Structure très massive• Faible rendement• Echauffement au niveau des balais	Fiat Panda Ellettra (série à moteurs à courant continu), Conceptor G-Van, PSA Berlingo (hybride) ¹²
Moteur à courant continu sans balais à aimants permanents (ou PM BLDC Permanent Magnets Brushless DC Motors).	<ul style="list-style-type: none">• Moins de pertes magnétiques• Plus efficace que les moteurs à induction• Plus petit et plus léger• Permet un meilleur refroidissement• Plus fiable• Meilleure densité de couple• Puissance plus adaptable	<ul style="list-style-type: none">• Zone de haute efficacité réduite• Diminution du couple lorsque la vitesse augmente• Coûts importants par les aimants permanents	Toyota Prius de 2005

¹¹ Z., Mounir, El Hachemi Benbouzid, M., Senior Member, Diallo, D., Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study, IEEE, vol. 55, no. 6, pp. 1756- 1764, November, 2006.

¹² Li S, A Review of Electric Motor Drives for Applications in Electric and Hybrid Vehicles, 2017.

Type de moteur	Avantages	Inconvénients	Véhicules équipés de ce type de moteur
Moteur synchrone à aimant permanent (ou PMSM <i>Permanent Magnet Synchronous Generators</i>)	<ul style="list-style-type: none"> Utilisable dans différentes gammes de vitesse sans multiplicateur Efficace Compact Peut entraîner directement les roues (<i>in-wheel applications</i>) Couple important même à faible vitesse 	<ul style="list-style-type: none"> Fortes pertes magnétiques dans l'armature en fer, à haute vitesse en <i>in-wheel applications</i> 	Toyota Prius, Nissan Leaf, Soul EV
Moteur synchrone à rotor bobiné (EESM, <i>Electrically Excited Motors</i>)	<ul style="list-style-type: none"> Similaire aux PMSM Permet de s'affranchir des aimants permanents 	<ul style="list-style-type: none"> Similaire aux PMSM Moins compact que les PMSM 	Renault Zoe
Moteur asynchrone (à induction, IM)	<ul style="list-style-type: none"> Système sans balais le plus mature Gammes d'utilisation large, par variation de l'orientation du champ magnétique 		Tesla Model S, Tesla Model X, Toyota RAV4, GM EV1, Renault Kangoo (hybride) ¹³ , BMW X5 (hybride) ¹⁴
Moteur à reluctance variable (SRM, <i>Switched Reluctance Motors</i>) Moteur à réductance synchrone (SynRM, <i>Synchronous Reluctance Motors</i>)	<ul style="list-style-type: none"> Ensemble simple et robuste Faible coût, surtout sans aimants permanents Grande vitesse Peu fragile et très robuste Longue zone de haute efficacité Haute densité énergétique Plus petit 	<ul style="list-style-type: none"> Plus bruyant Faible rendement Plus lourd et large que les machines à aimants permanents Design et contrôles complexes Difficultés de contrôlabilité et d'industrialisation 	Chloride Lucas
PM assisted synchronous reluctance motors	<ul style="list-style-type: none"> Meilleur rendement que les moteurs à réductance synchrone 		BMW i3
Moteur à aimant permanent sans fer à flux axial (<i>Axial Flux Ironless Permanent Magnet Motor</i>)	<ul style="list-style-type: none"> Pas de fer utilisé dans le rotor extérieur Pas de fer dans le moyeu du rotor Forte réduction du poids du moteur Meilleure densité énergétique Moins de pertes magnétiques Rotor adaptable directement aux roues 		Renovo Coupe

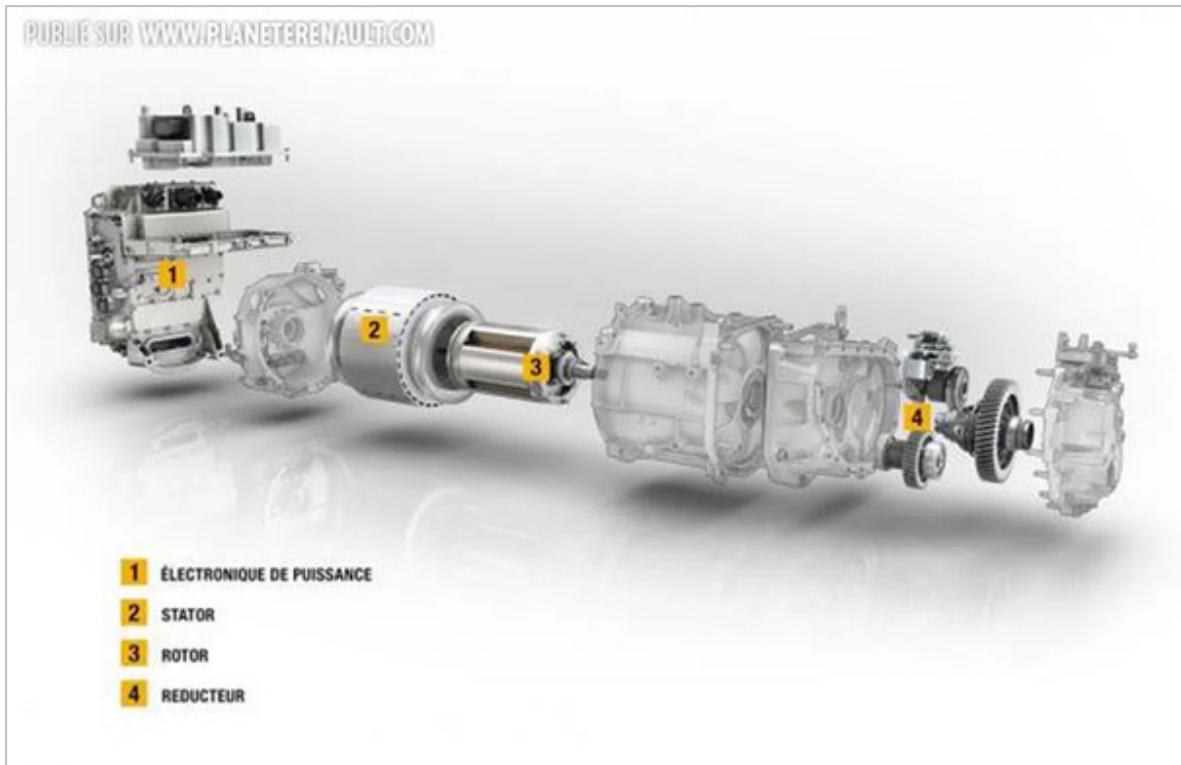
Source : adapté à partir de: Un-Noor et al, A Comprehensive Study of Key Electric Vehicle (EV) Components, Technologies, Challenges, Impacts, and Future Direction of Development (2017)

¹³ Li S, A Review of Electric Motor Drives for Applications in Electric and Hybrid Vehicles, 2017.

¹⁴ Li S, A Review of Electric Motor Drives for Applications in Electric and Hybrid Vehicles, 2017.

Les moteurs font partie d'un ensemble plus vaste qu'est le système de propulsion du véhicule. Ce système consiste en de l'électronique de puissance, qui fait l'intermédiaire entre le système de batteries et le moteur électrique. Une fois le moteur mis en mouvement par le courant électrique, l'énergie mécanique ainsi générée peut actionner les roues directement ou nécessiter un réducteur afin d'adapter la vitesse de rotation du rotor à celle des roues. La figure 16 présente ce système, à partir de l'exemple d'un groupe propulseur Renault appelé R90, qui contient un moteur synchrone à rotor bobiné (EESM) et développe 68 kW soit 92 ch pour un couple de 220 N m. Il est embarqué dans certaines Zoé électriques.

Figure 16 : groupe motopropulseur Renault 5AGen3 ZE / R90 / R110

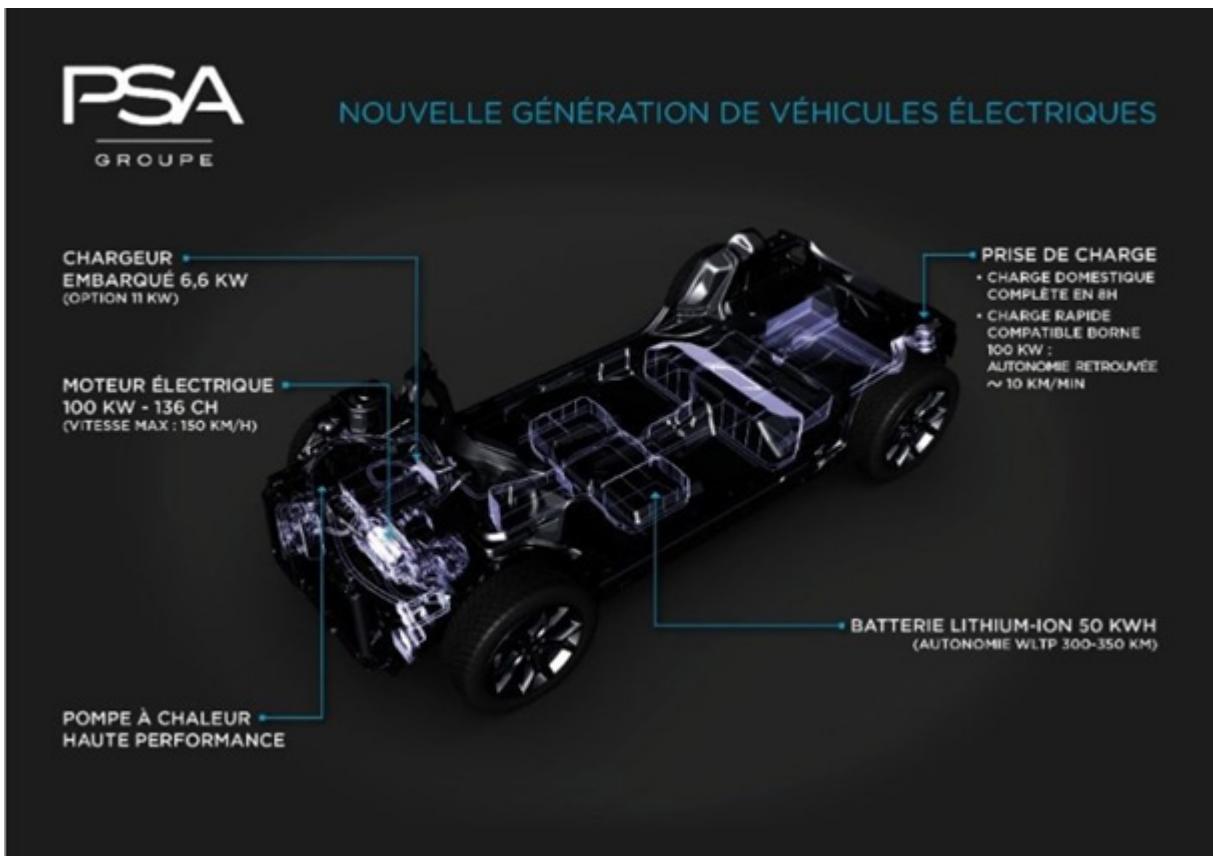


Source : www.planeterenault.com

Ce groupe motopropulseur est intégré dans l'ensemble du véhicule électrique, qui nécessite par ailleurs un système de batteries (*voir le rapport d'étape n°3*), un système de charge et des auxiliaires, pour la ventilation, le chauffage, etc. La figure 17 montre l'assemblage de ce type de système pour une nouvelle plateforme du groupe Stellantis (ex-PSA).

Des interactions importantes existent entre ces composants. Par exemple, un moteur moins efficace nécessitera une batterie de plus forte capacité pour compenser la moindre performance énergétique.

Figure 17 : plateforme technologique d'un véhicule électrique, avec ses différents sous-systèmes



Source : groupe PSA

Points essentiels

- Les machines électriques sont des convertisseurs entre énergie mécanique et énergie électrique. En général, ces machines peuvent convertir l'énergie dans les deux sens. La conversion de l'énergie mécanique en électricité est réalisée par une génératrice, tandis que l'inverse est réalisé par un moteur. La partie fixe de la machine est appelée le stator, la partie mobile est appelée le rotor.
- Plusieurs types de machines existent : à courant continu et à courant alternatif (synchrobes et asynchrones). Les machines synchrones et asynchrones peuvent servir pour des génératrices éoliennes et la propulsion de véhicules électriques. Les machines à courant continu peuvent être utilisées pour la propulsion des véhicules électriques.
- Les machines électriques utilisent des bobinages, essentiellement en cuivre et parfois des aimants permanents. Les principaux types de machines électriques qui utilisent des aimants permanents sont certaines machines à courant continu à balai (avec des aimants permanents au stator), les machines « pas-à-pas » (les aimants permanents sont dans le rotor), les machines synchrones à aimants permanents (dans le rotor) et les machines à aimants permanents sans fer à flux axial.
- Le recours aux aimants permanents améliore l'efficacité des machines et réduit la complexité du système, soit en évitant d'alimenter en électricité la bobine remplacée par les aimants (pour les moteurs à courant continu ou synchrone) soit en évitant d'embarquer des multiplicateurs nécessaires pour faire fonctionner la machine à différentes vitesses (pour les machines asynchrones). Une machine qui ne nécessite pas de multiplicateur est dite à entraînement direct. D'une manière générale, les alternatives aux machines à aimants permanents sont plus lourdes, moins efficaces et nécessitent plus d'entretien, mais elles peuvent être moins chères. Ces alternatives existent et sont utilisées à grande échelle.
- Les éoliennes permettent de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Le grand éolien à trois pales est la principale technologie actuellement déployée. Les éoliennes sont installées sur terre (*onshore*) ou en mer (*offshore*) sur des fondations posées. Une technologie émergente consiste à installer des éoliennes en mer sur des flotteurs, ce qui permet d'installer des turbines dans des zones plus profondes et de capter une meilleure ressource en vent plus loin des côtes. Les turbines installées en mer sont plus grandes, plus efficaces et plus puissantes que celles installées à terre, mais en contrepartie, le raccordement électrique est plus difficile.
- Les fondations, sur terre ou en mer, ainsi que les flotteurs qui supportent les turbines éoliennes sont constitués de béton et/ou d'acier et peuvent peser d'une à quelques milliers de tonnes.
- Outre les fondations et les flotteurs, les composants cruciaux de l'éolienne sont le mât (en acier), les pales (en polymères organiques, non étudiés dans ce rapport), qui captent le vent et entraînent le rotor, puis la nacelle qui contient de nombreux composants qui permettent le fonctionnement de l'éolienne et sa protection en cas de tempête. La génératrice qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique est située dans la nacelle, ainsi que le multiplicateur lorsqu'il est nécessaire.
- Les principaux types de génératrices actuellement utilisées sont les génératrices synchrones à rotor bobiné, synchrones à aimants permanents, asynchrones à cage d'écureuil et asynchrones à double alimentation. La majorité des turbines installées en mer contiennent des aimants permanents, au contraire des turbines installées à terre. Peu d'évolutions technologiques radicales sont attendues d'ici à 2030. Les innovations majeures concernent principalement l'éolien flottant, qui est la filière éolienne la plus récente, et la recherche de substituts aux aimants permanents, notamment par supraconductivité.

- La motorisation des véhicules électriques est contrainte par l'exigence de l'industrie automobile, en matière de densité énergétique, de performances en puissance et de qualité industrielle (faibles coûts, robustesse, fiabilité...). Les moteurs électriques font par ailleurs partie de systèmes qui incluent la batterie, l'électronique de puissance, le système de recharge, les auxiliaires (chauffage, freinage...). Les éléments relatifs aux batteries ont été étudiés dans le rapport d'étape n°3. Si de nombreux types de moteurs électriques sont utilisés pour la propulsion des véhicules électriques, la plupart des véhicules en service utilisent des moteurs à aimants permanents. Par ailleurs, le choix d'un type de moteur impacte le dimensionnement du reste du système de propulsion et du système de batteries d'un véhicule électrique.

II.

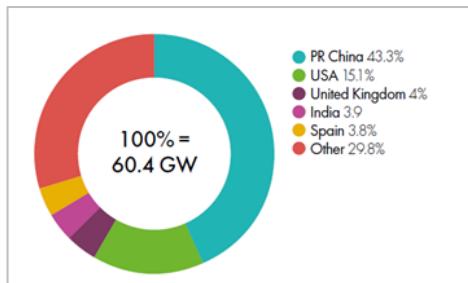
Le marché de l'éolien,
la demande en matières de la filière
et la demande en terres rares
pour la propulsion électrique

A. Le marché de l'éolien

1. UN MARCHÉ EN FORTE EXPANSION AU NIVEAU MONDIAL ET PARTICULIÈREMENT EN EUROPE

Au niveau international, l'Asie et l'Europe totalisent environ les trois quarts des nouvelles installations (dont 50 % pour la région Asie-Pacifique) et l'Amérique du Nord 16 % en 2019. Le marché de l'éolien est donc très concentré géographiquement, comme le confirment les parts de nouvelles installations en 2019 par pays (figure 18).

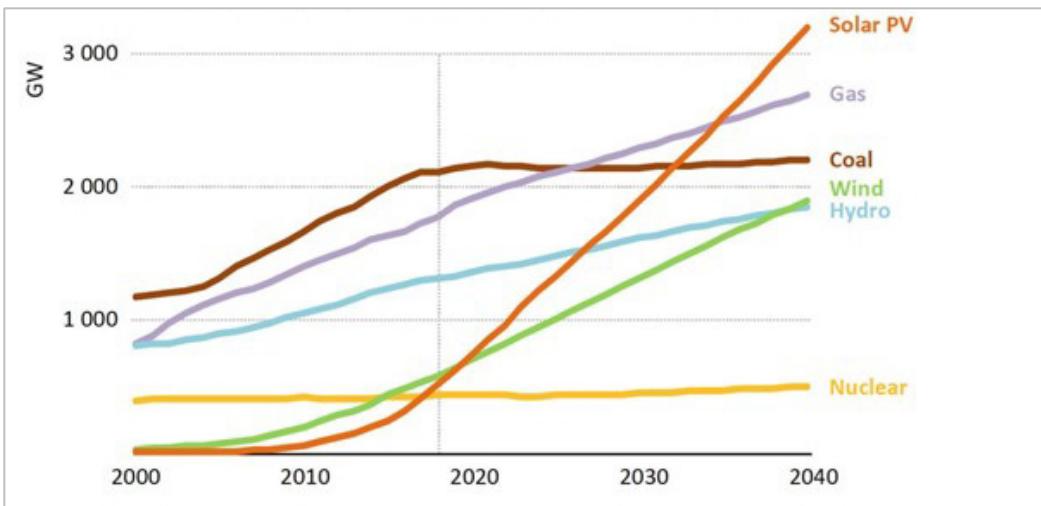
Figure 18 : part de marché des nouvelles installations d'éoliennes en 2019, par pays



Source : Global Wind Energy Council

Le *Global Wind Energy Council* (GWEC) indique que depuis 2015, la croissance annuelle moyenne du marché de l'éolien est de 12 % en matière de puissance installée, et la croissance devrait se poursuivre sur la base des politiques publiques annoncées (figure 19).

Figure 19 : historique et prévision des capacités de génération électriques dans le monde, en tenant compte des politiques publiques annoncées



Source : AIE, 2019

Une partie significative de l'augmentation de la puissance éolienne installée doit être portée par l'éolien *offshore* (posé et flottant). Par exemple l'Europe a pour objectif de passer de 12 GW installés en 2020 à 60 GW en 2030 et 300 GW en 2050 (en 2021, il n'y a pas de parc en service en France). La Chine va connaître une croissance similaire, de 9 GW en 2020 à 44 GW en 2030 et 160 GW en 2060.

Le déploiement de l'éolien flottant, moins mature, se fera surtout à partir de 2030, majoritairement en Europe et en Asie. L'Amérique du Nord sera aussi un débouché pour l'éolien flottant, puisque ses zones côtières, dont la profondeur augmente rapidement, sont peu adaptées à l'éolien *offshore* posé.

2. LA FRANCE, UN MARCHÉ MAJEUR ET DES OBJECTIFS AMBITIEUX

La France présente le 2^e gisement de vent en Europe et le 1^{er} pour l'éolien terrestre selon l'Agence européenne pour l'environnement en 2009¹⁵.

a) Le cadre réglementaire en France

La France s'est fixé un objectif de 32 % d'électricité d'origine renouvelable à l'horizon 2030 (inscrit dans la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte adoptée en 2015). Ces objectifs sont ensuite déclinés dans des plans nationaux, notamment la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE, la dernière version dite PPE2 a été publiée en 2020), puis au niveau local, par les régions dans leur schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires (Sraddet).

La PPE fixe notamment des objectifs précis filière par filière pour le développement des différentes énergies renouvelables et des calendriers d'appels d'offres pour y répondre. Les Sraddet sont des schémas établis à l'échelle régionale qui fixent des objectifs de développement des EnR et peuvent identifier des zones préférentielles de développement de l'éolien terrestre. Enfin, les plans climat air-énergie territoriaux (PCAET) sont des politiques de déploiement des EnR qui fixent des objectifs à l'échelle des intercommunalités. Ils doivent être pris en compte dans les plans locaux d'urbanisme (PLU) et prévoir des dispositions et des règles à même d'assurer l'insertion des projets dans leur environnement local¹⁶. En ce qui concerne l'éolien en mer, les documents stratégiques de façade (DSF) permettent l'identification des zones potentiellement propices à l'implantation de parcs.

Le déploiement de l'éolien terrestre au cours des prochaines années se fera principalement à travers des procédures d'appels d'offres, durant lesquelles des porteurs de projets candidatent pour obtenir la possibilité de construire et exploiter des parcs (pour l'éolien en mer) et pour obtenir un tarif garanti de l'électricité qu'ils fourniront à partir de leurs installations éoliennes (pour l'éolien en mer et à terre). Cela leur garantit une prévisibilité des prix, rendant ces projets économiquement peu risqués. L'unique critère actuel de sélection est le prix, les contraintes environnementales et d'acceptabilité étant imposées par la réglementation. Des points bonus peuvent néanmoins être octroyés à des projets « participatifs » ou « citoyens », c'est-à-dire intégrant des citoyens ou collectivités dans leur financement et/ou leur gouvernance. À l'issue de la procédure et après instruction par la commission de régulation de l'énergie (CRE), les lauréats sont désignés par le ministre en charge de l'énergie. Les plus petits parcs peuvent également bénéficier d'un complément de rémunération (voir encadré) sans mise en concurrence, via le « guichet ouvert ». Le périmètre de ce guichet est de plus en plus restreint pour orienter préférentiellement les porteurs de projets vers les appels d'offres.

Le déploiement de l'éolien en mer se fait lui uniquement par appels d'offres dans le cadre de procédures avec négociation. Ces négociations permettent aux candidats et à l'État d'adapter le cahier des charges de l'appel d'offre aux spécificités des projets. Cette différence dans le développement s'explique par la différence de taille des projets, de l'ordre de quelques millions ou dizaines de millions d'euros pour au plus quelques dizaines de MW pour l'éolien terrestre, contre plusieurs milliards d'euros pour des centaines de MW pour les projets éoliens en mer. À l'issue de la phase de concertation entre l'État et les candidats, un cahier des charges est établi, puis l'appel d'offre suit la même procédure que pour l'éolien terrestre. La CRE reçoit et évalue les offres des candidats et le lauréat est désigné par le ministre en charge de l'énergie.

Cette désignation, tant pour l'éolien terrestre qu'en mer, ouvre droit à un soutien tarifaire, sous la forme d'un complément de rémunération (voir encadré), au tarif de référence indiqué dans l'offre. Les lauréats de l'appel d'offre doivent ensuite obtenir les différentes autorisations, notamment environnementales (si ces autorisations ne sont pas obtenues en amont), dans les trois ans afin de pouvoir construire et mettre en service le parc.

¹⁵ www.eea.europa.eu/publications/europees-onshore-and-offshore-wind-energy-potential/at_download/file

¹⁶ www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Eolien_et_urbanisme_guide_a_destination_des_elus_-_nov_2019.pdf

Les mécanismes de soutien tarifaire

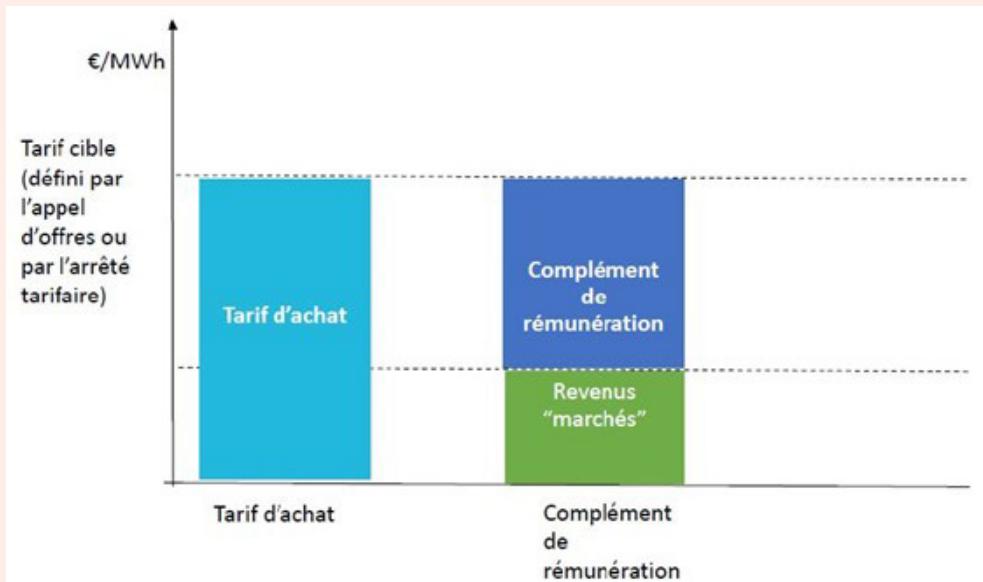
Le développement des énergies renouvelables bénéficie d'un soutien de l'État soit en amont dans le domaine de la recherche et développement, soit en phase d'industrialisation en soutien à la demande et au déploiement commercial (par exemple par le biais de tarifs d'achat, d'appels d'offres ou de dispositifs fiscaux).

Ces outils de soutien public sont nécessaires au déploiement des énergies renouvelables tant en raison du coût de la production électrique par rapport aux recettes de la vente d'électricité sur le marché que pour la sécurisation sur le long terme des projets. En effet, les coûts d'investissements doivent être rentabilisés sur plusieurs années. Un mécanisme de soutien tarifaire permet au producteur de s'assurer que ses recettes par MWh produit ne descendront pas en dessous d'un certain seuil, ce qui rassure quant à la viabilité des projets et permet de les financer auprès de banques et investisseurs. Les producteurs sont ainsi protégés contre le risque de prix de marché trop bas.

Les soutiens tarifaires mis en place sont spécifiques à chaque filière et font l'objet d'adaptations périodiques pour tenir compte des évolutions techniques et économiques.

Deux types de soutiens tarifaires existent pour l'éolien en France : l'obligation d'achat (ou tarif d'achat) et le complément de rémunération (*figure 20*). Dans le cadre de l'obligation d'achat, le producteur vend directement l'électricité qu'il produit à EDF-OA, à un tarif fixé. Dans le cadre d'un complément de rémunération, le producteur vend l'électricité produite sur le marché et EDF-OA compense ex-post l'écart entre le prix de vente de l'électricité et le tarif de référence. Si le prix de marché est supérieur au tarif de référence, c'est le producteur qui reverse la différence à EDF-OA. **Les nouveaux projets éoliens, sur terre et en mer, sont maintenant soutenus par des compléments de rémunération, mais d'anciens projets continuent à bénéficier d'obligations d'achat jusqu'au terme de leur contrat.**

Figure 20 : mécanismes des tarifs d'achat et compléments de rémunération



Source : ministère de la Transition écologique

Les tarifs de référence moyens des AO 2020 de l'éolien terrestre sont de l'ordre de 60 €/MWh. Le lauréat du dernier AO éolien en mer avait lui proposé un tarif de référence de 44 €/MWh.

Des garanties et des obligations encadrent ensuite le démantèlement des installations. Le code de l'environnement prévoit notamment dès le 1^{er} juillet 2022 l'obligation de recycler plus de 85 % de la masse totale des éoliennes.

Un des freins au déploiement de l'éolien en France, notamment évoqué dans le rapport France 2021 de l'AIE¹⁷, est celui du cadre réglementaire, qui implique des délais incompressibles lors du développement des parcs et ouvre la possibilité de recours contre les autorisations. En effet, il n'est pas rare que la mise en service d'un parc éolien ait lieu 10 ans après l'octroi d'un appel d'offre. En moyenne, les parcs éoliens français sont mis en service 7 ans après la désignation du lauréat par appel d'offre, contre 3 à 4 ans en Allemagne¹⁸. Ces délais peuvent avoir des conséquences sur l'atteinte des objectifs de déploiement de l'éolien, mais peuvent aussi provoquer des tensions sur la filière industrielle (*voir partie III.D.1.a)*). Les retards sont notamment causés par de nombreux recours contre les actes administratifs autorisant l'implantation des parcs éoliens.

Prenant acte de ces contraintes, plusieurs lois contenant des dispositions pour accélérer la transition énergétique¹⁹ ont été votées au cours des dernières années. Plusieurs mesures²⁰ supplémentaires ont été annoncées en octobre 2021 par la ministre en charge de l'énergie afin de limiter ces problématiques. De nouvelles actions de planification sont ainsi prévues, afin d'identifier les sites propices et permettre une concertation plus en amont des projets. La création d'un médiateur de l'éolien et de comités régionaux de l'énergie vise également à une meilleure concertation afin de limiter les retards causés par les recours. Finalement, des mesures relatives à une meilleure prise en compte des enjeux d'acceptabilité environnementale, culturelle et sociale sont proposées.

b) Le marché français

Au 31 mars 2021, la puissance éolienne raccordée en France, uniquement en éolien terrestre (*voir encadré dans la partie II.A.2.b*) pour l'éolien en mer), est de 17,9 GW. L'objectif fixé par la PPE2 pour 2023 est de 24,1 GW et l'intervalle de 33,2 à 34,7 GW installés pour 2028. Pour l'atteinte de ces objectifs, la PPE2 annonce des appels d'offres (AO) semestriels pour un total à attribuer de 1 850 MW/an (hors repowering).

¹⁷ www.iea.org/reports/france-2021, « Wind and solar have increased since 2011, but at a slower pace than planned and than developed in neighbouring countries. This slow pace is due to a combination of administratively complex and overlapping support schemes; lengthy permitting procedures [...] »

¹⁸ www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/DP_Groupe_Travail_eolien_2018.pdf

¹⁹ OECD (2021), OECD Economic Surveys: France 2021, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/289a0a17-en>.

²⁰ [https://www.ecologie.gouv.fr/10-mesures-developpement-maitrise-et-responsable-leolien-0](http://www.ecologie.gouv.fr/10-mesures-developpement-maitrise-et-responsable-leolien-0)

L'éolien en mer en France

Depuis 10 ans, la France a appuyé le développement de l'énergie éolienne en mer en lançant trois appels d'offres pour des parcs éoliens en mer posés en 2011, 2013 et 2016 qui totalisent 3,6 GW et répartis dans sept projets en Manche (Saint-Brieuc, Courseulles-sur-Mer, Fécamp, Dieppe - Le Tréport et Dunkerque) et en Atlantique (Saint-Nazaire et Yeu – Noirmoutier). Plusieurs autres parcs sont envisagés, et quatre projets pilotes d'éolien flottant sont en cours (figure 21).

Figure 21 : carte des différents projets éoliens en mer en France



Source : www.eoliennesenmer.fr/presentation

À l'heure actuelle, aucun de ces projets n'est en service, mais la PPE2 fixe l'objectif de 2,4 GW installés en 2023 et de 5,2 à 6,2 GW installés en 2028. De plus, la PPE2 prévoit l'octroi de 1000 MW/an pour les prochaines années.

B. Projections de la demande en matières pour l'éolien

1. PRÉSENTATION DU MODÈLE MEETIS, SCÉNARIOS ET HYPOTHÈSES

Le modèle MEETIS (*Model for European Energy Transition and Sustainability*) est un modèle linéaire de type *bottom-up* d'équilibre partiel qui représente l'ensemble du système énergétique – des ressources aux usages et qui permet des simulations et des analyses détaillées du système énergétique européen (Union européenne, Royaume-Uni, Norvège et Suisse) sous contraintes climatiques ou contraintes de politiques publiques (mobilité soutenable, recyclage des matériaux, etc.). C'est un modèle technico-économique de type Markal²¹ qui détaille de nombreuses technologies dans tous les secteurs. Le modèle repose sur un algorithme d'optimisation, qui minimise les coûts du système dans sa globalité, à partir d'une connaissance parfaite du futur. Cette capacité d'anticipation par le modèle permet d'optimiser à partir de critères technico-économiques les choix d'investissement et les rythmes d'installation de nouvelles capacités EnR afin de respecter les objectifs en matière de réduction des émissions de CO₂ fixés en entrée dans le modèle. Ces objectifs prennent selon les scénarios considérés la forme de capacités installées à la fin des périodes de modélisation ou de contraintes en matière d'émissions de GES.

C'est un modèle d'aide à la décision et de prospective et non de prévision, avec pour principal déterminant la demande en énergie des différents secteurs de l'économie (industrie, résidentiel, services et agriculture), sans contrainte en matière de sobriété énergétique.

Plusieurs scénarios sont étudiés pour la France :

- NCE 1000 (neutralité carbone en 2050, prenant en compte uniquement les émissions associées à la consommation, et pas l'empreinte carbone des produits importés) ;
- NCE-EnR-1000 (neutralité carbone en 2050, avec une part élevée de renouvelables. Ceci implique une accélération de la demande et de la consommation électrique) ;
- 80 % d'EnR (pas de contrainte sur la neutralité carbone, basés sur la vision Ademe 2014) ;
- 100 % d'EnR (pas de contrainte sur la neutralité carbone, basés sur la vision Ademe 2014).

Les scénarios NCE 1000 et NCE-EnR-1000 existent à l'échelle européenne et française, tandis que les scénarios 80 et 100 % EnR sont spécifiques à la France.

Les estimations des besoins matières pour chaque technologie sont basées sur l'intensité « matières » issue du rapport du *Joint Research Centre* (JRC)²². Ces estimations ont été comparées à celles du projet SURFER²³, autre référence de quantification des bilans « matières » des technologies de l'énergie, porté par l'Ademe. Les estimations SURFER sont plus élevées, notamment pour le béton, l'aluminium, le cuivre et le dysprosium. Ces écarts s'expliquent par le recours dans SURFER à des bases de données (issues de bibliographies), contrairement à l'étude du JRC. De plus le JRC et SURFER n'ont pas les mêmes catégories représentées (désagrégation en quatre technologies pour le JRC ; huit catégories pour SURFER). Finalement, le rapport du JRC présente des parts de marché pour les différentes technologies.

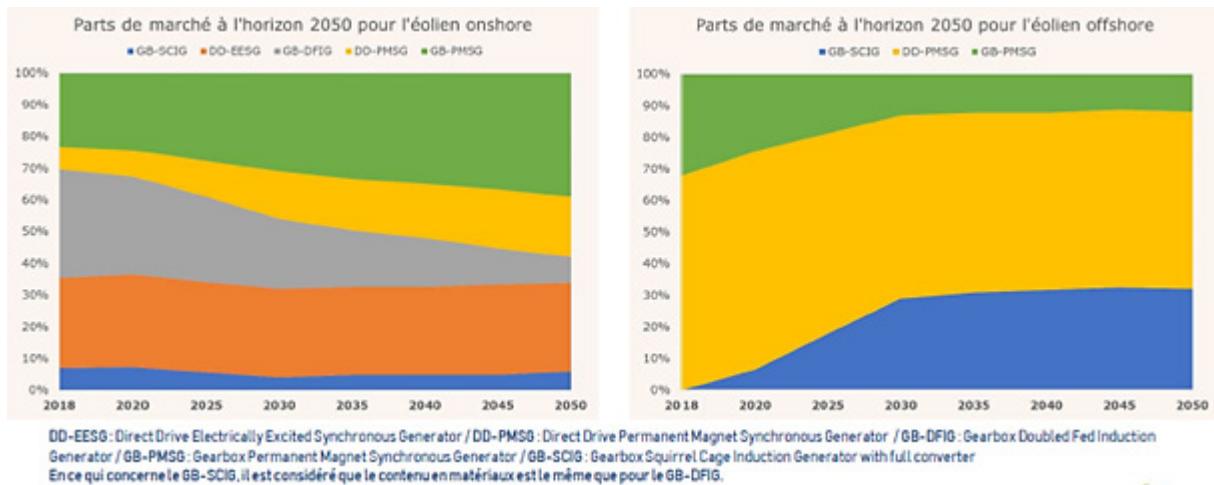
Ainsi pour chaque période, 2020, 2030, 2040, le contenu « matières » d'une éolienne type (d'une durée de vie de 25 ans) est estimé, puis pour chaque technologie un post-traitement permet d'évaluer les impacts matières. La part de marché est multipliée par l'intensité matière correspondante, ce qui permet d'obtenir pour chaque scénario la consommation cumulée pour chaque matériau et la consommation annuelle. Les parts de marché au cours des années 2018-2050 sont ainsi déterminées pour chaque technologie (figure 22).

²¹ Gamme de modèle utilisé par l'AIE qui repose sur différents scénarios et il peut être utilisé au niveau de chaque pays européen ou par région (pour plus d'informations : <https://iea-etsap.org/index.php/etsap-tools/model-generators/markal>)

²² Carrara S., Alves Dias P., Plazzotta B., Pavel C., Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system, EUR 30095 EN, Publication Office of the European Union, Luxembourg, 2020, ISBN 978-92-76-16225-4, doi:10.2760/160859, JRC119941.

²³ <https://librairie.ademe.fr/energies-renouvelables-reseaux-et-stockage/4654-surfer.html>

Figure 22 : parts de marché des différentes technologies de génératrices éoliennes



Note : les génératrices PMSG, en vert et jaune, contiennent des aimants permanents

Source : Carrara et al., JRC 2020²⁴

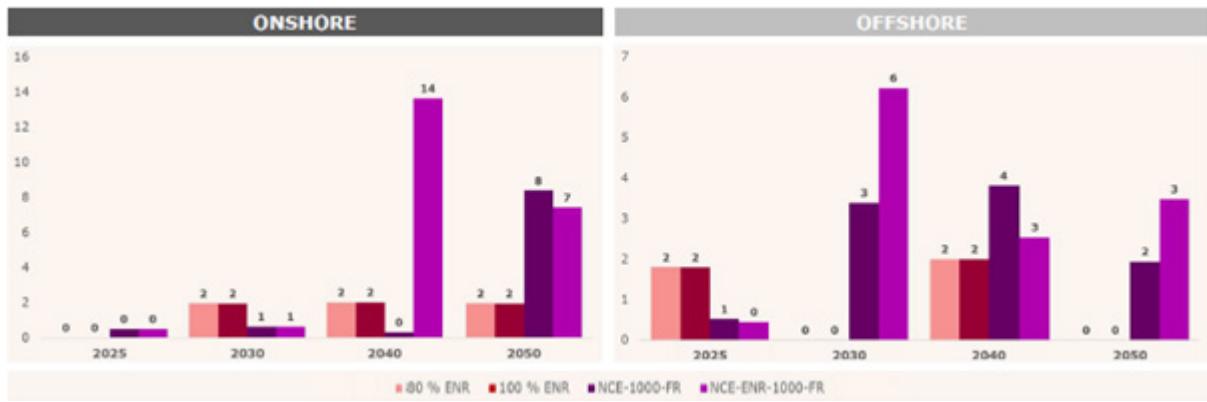
Il est donc anticipé par le JRC que la part de marché des turbines à aimants permanents (en vert et jaune dans la note) diminue pour l'éolien *offshore* jusqu'à 2030, et que cette part augmenterait légèrement dans l'éolien *onshore*. Dans l'ensemble, les aimants permanents sont utilisés de façon croissante dans l'éolien, car ils combinent haute densité énergétique et petite taille. Les aimants permanents de type NdFeB sont les plus répandus, **et il ne semble pas qu'une production d'aimants permanents sans terres rares compétitifs soit possible à court terme**. De façon plus générale, aucune rupture technologique majeure n'est anticipée d'ici à 2030. Dans ce contexte, la progression des parts de marché des éoliennes à aimants permanents s'explique par leurs avantages en termes d'efficacité, de besoins en maintenance et par l'augmentation de la taille des éoliennes, qui rend plus intéressante la réduction du poids des systèmes contenus dans la nacelle.

2. RÉSULTATS GÉNÉRAUX SUR LES CONSOMMATIONS EN MATÉRIAUX À HORIZON 2050

Les capacités éoliennes installées en 2050 sont respectivement estimées à 75,5 et 81,4 GW pour l'éolien *onshore* et *offshore* dans le scénario NCE-1000 France, et à 241,1 et 90,4 GW dans le scénario NCE-EnR-1000. Néanmoins les investissements et les installations de nouvelles capacités sont les plus importants dans les périodes postérieures à 2030 (figure 23). Il est à noter que les installations d'éoliennes sont plus importantes dans les scénarios NCE que dans les scénarios 80 et 100 % (de 2 à 6 fois plus d'éolien *onshore*, et de 2,7 à 3 fois plus d'éoliennes *offshore* installées en 2050). Ceci s'explique par la forte augmentation de la consommation électrique liée à l'objectif de neutralité carbone, et qui nécessite plus de moyens de production.

²⁴ Carrara S., Alves Dias P., Piazzolla B. and Pavel C., Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system, EUR 30095 EN, Publication Office of the European Union, Luxembourg, 2020, ISBN 978-92-76-16225-4, doi:10.2760/160859, JRC119941.

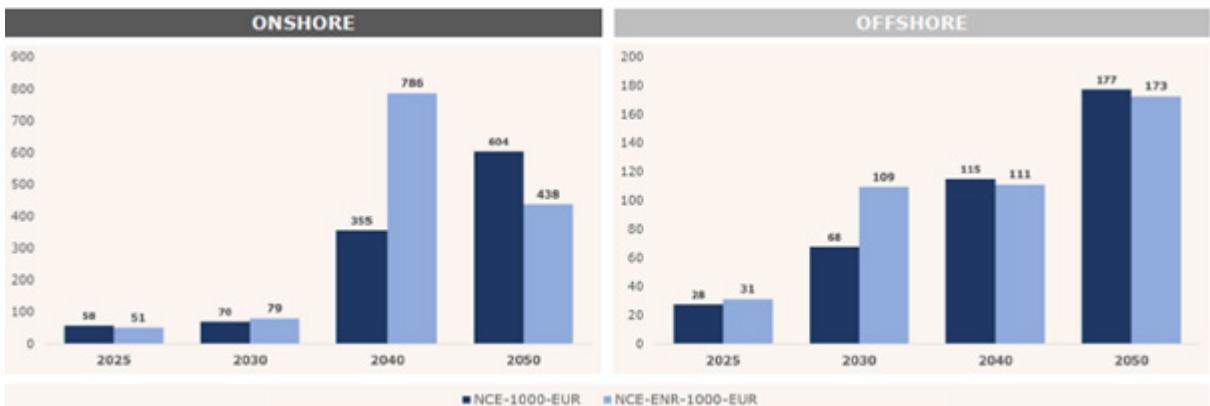
Figure 23 : installations annuelles en GW par périodes, pour la France



Source : Ifpen

La même tendance se retrouve au niveau européen (figure 24).

Figure 24 : installations totales en GW par périodes, pour l'Europe (Union européenne, Royaume-Uni, Norvège)

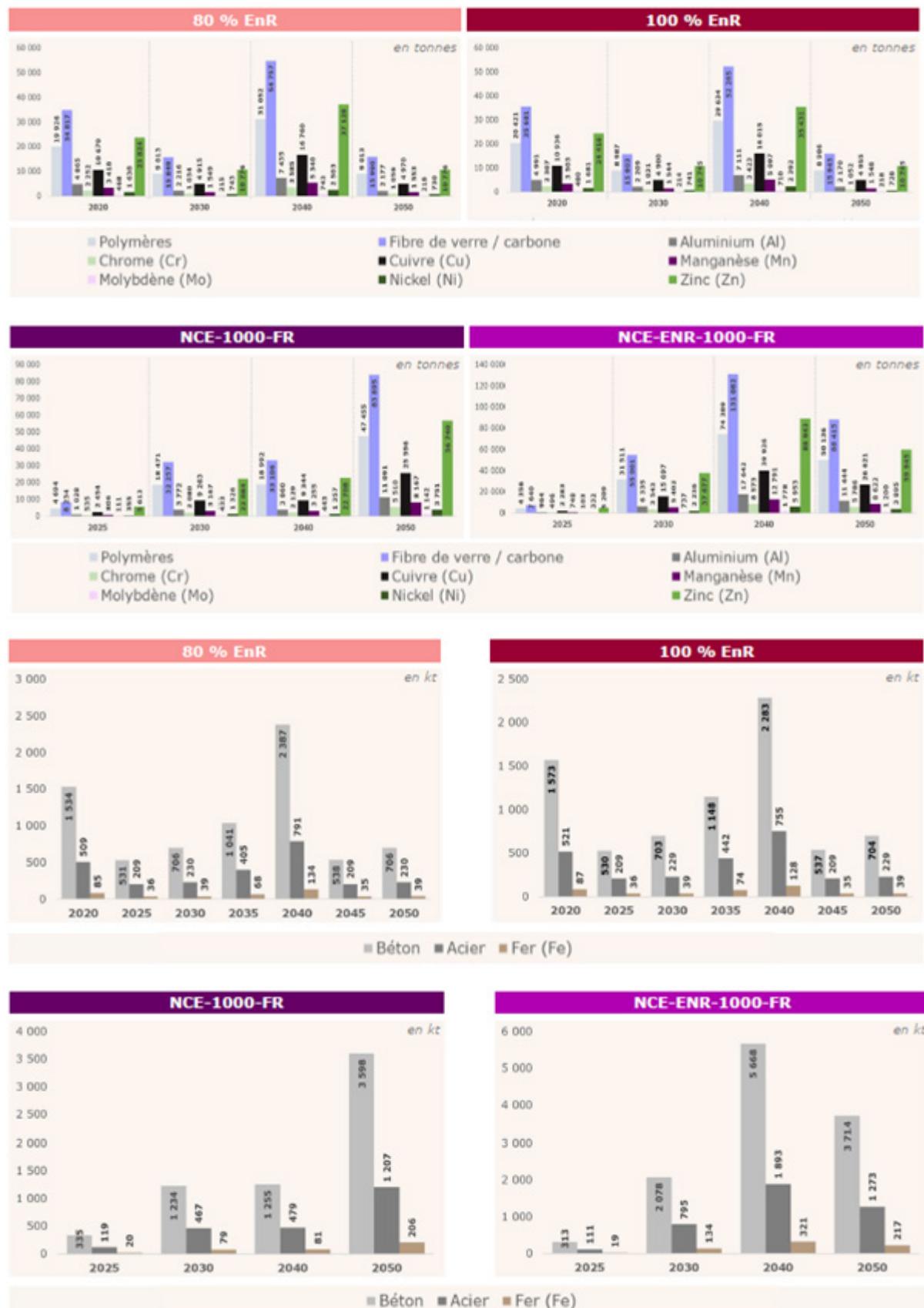


Source : Ifpen

L'accélération apparente vers 2040 peut avoir deux explications : (i) étant donné que le modèle choisit le moment le plus opportun pour réduire les coûts et qu'il intègre des courbes d'apprentissage, les investissements s'accélèrent peu avant l'échéance de 2050, où la neutralité carbone doit être atteinte ; (ii) la période 2040-2050 couvre un intervalle de temps plus grand que les autres périodes représentées, ce qui explique que les installations soient plus nombreuses dans cette période, même en l'absence d'accélération ; les courbes seraient lissées en cas de présentation des données annuelles.

La consommation en matériaux à horizon 2050, dans ces scénarios est finalement présentée, en tonnes, pour la France (figure 25).

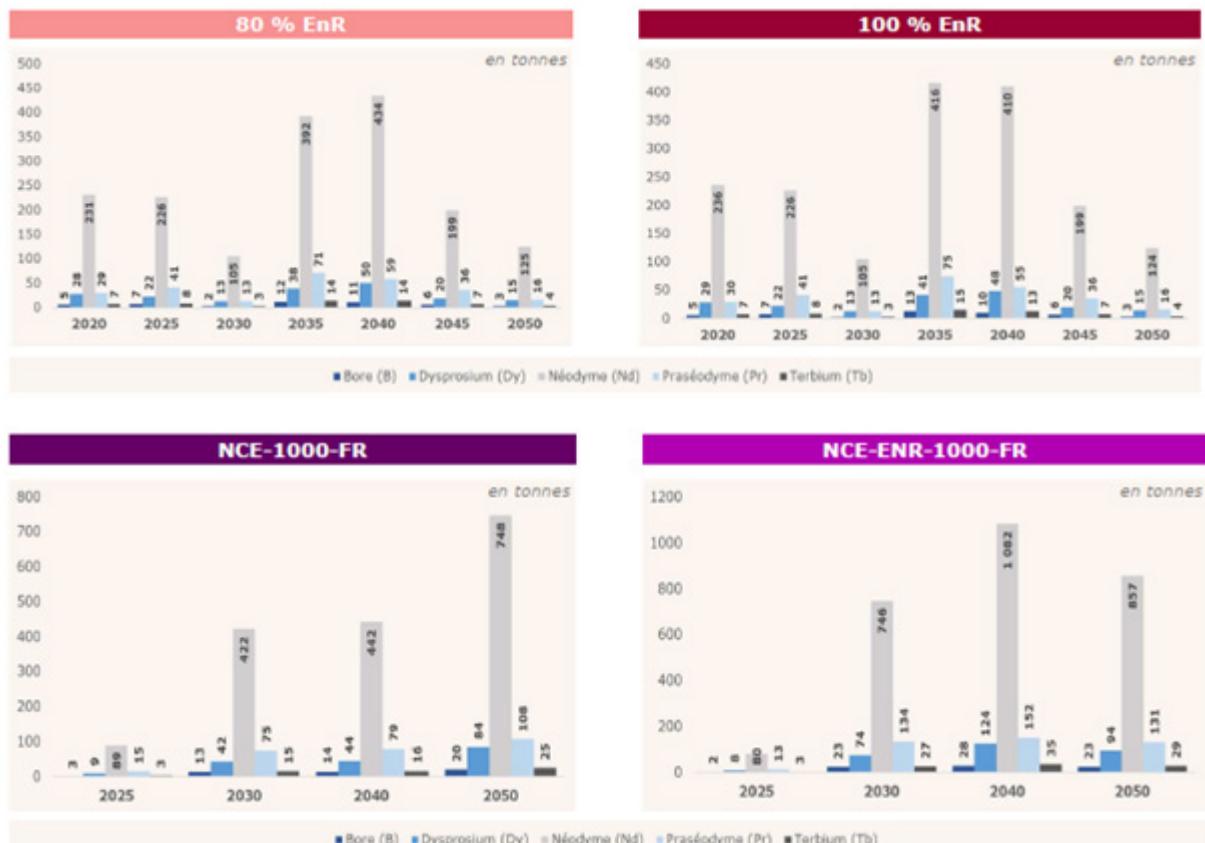
Figure 25 : consommation annuelle des matériaux étudiés, pour la France, dans les quatre scénarios



Source : Ifpen

En ce qui concerne les terres rares, les projections de consommation annuelle par scénarios sont pour la France :

Figure 26 : consommation annuelle de matériaux à destination d'aimants permanents pour l'éolien



Source : Ifpen

Ce qui correspond à des taux de croissance moyen de consommation annuelle (à partir de 2020) des matériaux étudiés de 9 à 11 % pour le scénario NCE-1000-FR et de 13 à 16 % pour le scénario NCE-EnR-1000-FR (ces deux scénarios présentent des hausses de consommation supérieures à celles des autres scénarios), pour la période de 2020 à 2030. Les taux de croissance les plus forts dans les deux scénarios concernent le bore, le dysprosium, le néodyme, le praséodyme et le terbium.

Cette différence de consommation revient à une multiplication par trois de la consommation cumulée des matériaux étudiés (y compris le béton, l'acier et le fer) en 2050 dans le scénario EnR-1000 par rapport aux scénarios 80 et 100 %.

Ces résultats se confirment au niveau européen, mais avec une consommation anticipée encore supérieure de 20 %.

3. RÉSULTATS SPÉCIFIQUES AUX TERRES RARES

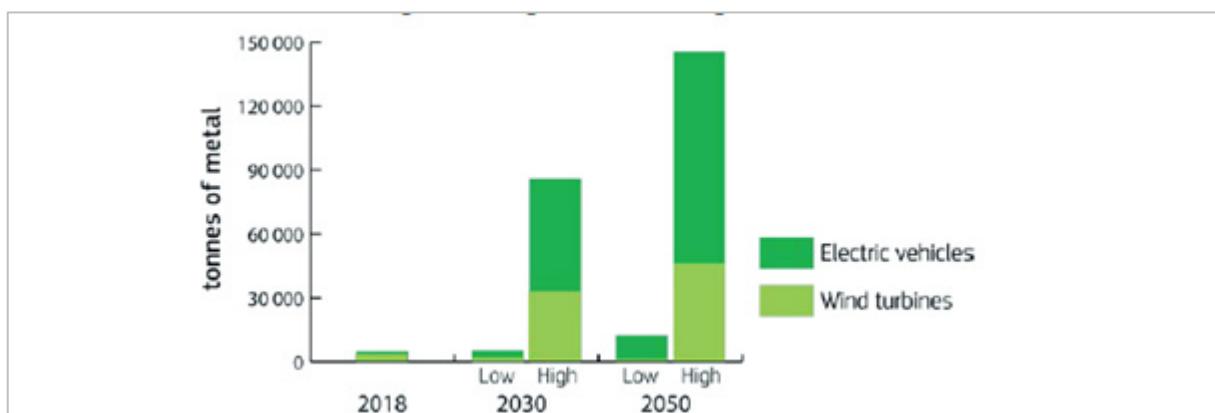
Pour la demande en terres rares, le JRC a produit deux scénarios :

- Une haute demande qui prend en compte des ambitions politiques plus fortes qu'annoncées jusqu'à présent, notamment une énergie primaire 100 % renouvelable d'ici à 2050. Ce scénario ne prévoit pas d'évolutions technologiques majeures ;
- Une basse demande qui prend en compte les objectifs de l'Union européenne pour 2030, ainsi qu'une amélioration technologique qui permet une optimisation de l'utilisation des matériaux.

L'Union européenne compte pour environ un tiers de la demande mondiale en terres rares dans ces scénarios. Dans les scénarios NCE-EnR, la consommation est multipliée par trois par rapport aux scénarios 80 et 100 % et par deux pour le scénario NCE.

Dans tous les cas, malgré l'augmentation de la demande pour l'éolien, la majeure partie de la demande pour les terres rares considérées viendra du secteur des véhicules électriques (figure 27).

Figure 27 : demande mondiale en terres rares pour aimants permanents à destination des technologies bas-carbone



Source : JRC, 2020

C. Le marché du véhicule électrique et projection du besoin en terres rares et cuivre pour sa motorisation

Les scénarios évoqués dans le rapport d'étape n°3 consacré à la mobilité bas-carbone sont complétés ici.

1. LE MARCHÉ DU VÉHICULE ÉLECTRIQUE

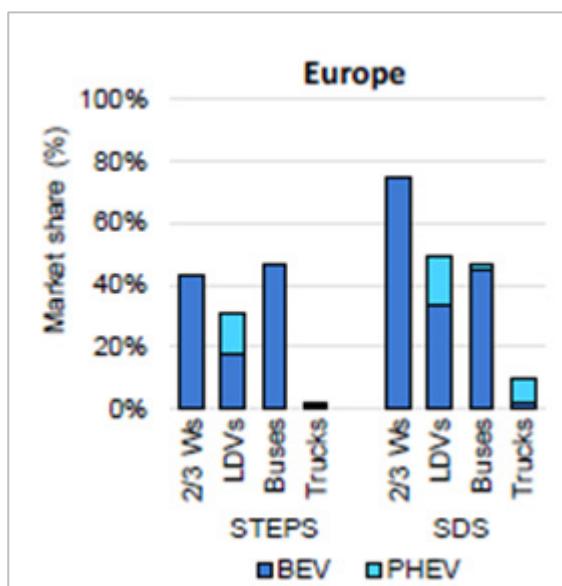
Le marché du véhicule électrique est en forte croissance au niveau mondial, et particulièrement en Europe. De 2014 à 2019, le taux de croissance annuel moyen du marché du véhicule électrique a été de 60 % au niveau mondial, selon le *Global EV Outlook 2020* de l'Agence internationale de l'énergie (AIE).

Cette croissance devrait se poursuivre au cours des prochaines années. L'AIE considère deux scénarios principaux :

- STEPS ou *Stated Policies Scenario* qui correspond aux politiques publiques mises en œuvre et aux mesures annoncées ;
- SDS ou *Sustainable Development Scenario* qui correspond à un objectif de ne pas dépasser une augmentation globale de la température de 1,7-1,8°C, avec une probabilité de 66 % et d'atteindre la neutralité carbone en 2070.

La part de marché des véhicules électriques (en ventes annuelles de véhicules neufs) pourrait ainsi dépasser les 40 % en Europe d'ici 2030 dans le scénario SDS (figure 28).

Figure 28 : parts de marché prévisionnelles pour différents véhicules électriques en Europe à horizon 2030



Notes : 2/3 Ws : véhicules légers électriques à 2 ou 3 roues (motos, trottinettes...).

LDVs : Light Duty Vehicles, voitures électriques, à batteries (BEV) ou hybride rechargeables (PHEV).

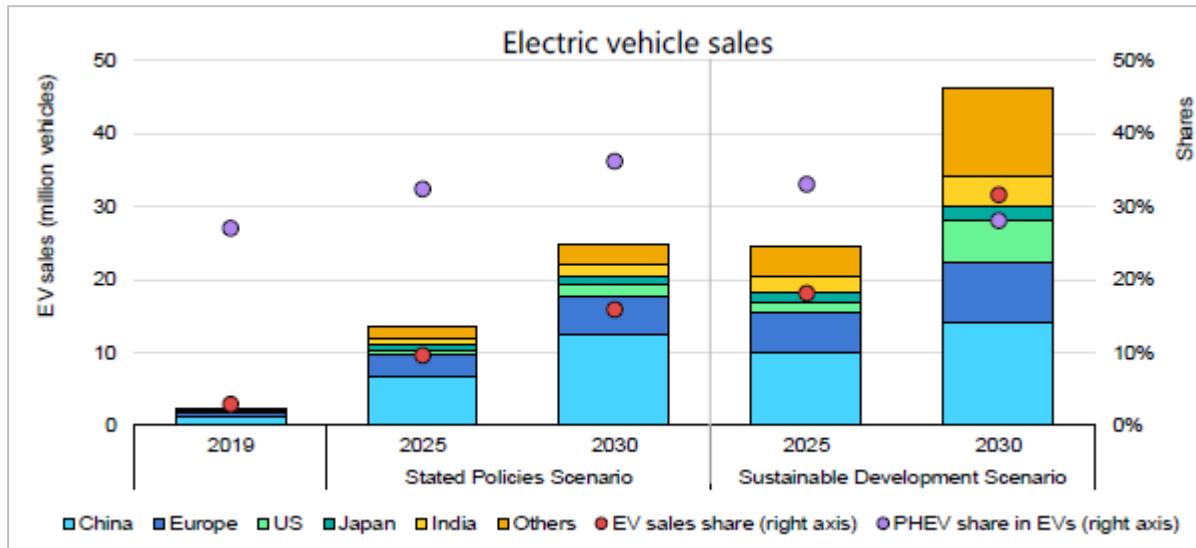
Buses : bus de transport de passagers.

Trucks : camions lourds, pour le transport de fret.

Source : AIE, *Global EV Outlook 2020*

En 2020, l'Europe a été le premier marché mondial du véhicule électrique, avec 1,4 million de ventes, soit 43 % du total mondial, selon EV-Volume. Au niveau mondial, la Chine devrait constituer le premier marché au cours de la prochaine décennie (figure 29).

Figure 29 : composantes de la croissance des ventes de véhicules électriques, selon les scénarios de l'AIE



Notes : les volumes de vente, en million de véhicules sont les histogrammes dont l'axe est à gauche. Les parts de marchés sont les points colorés dont l'axe est à droite.

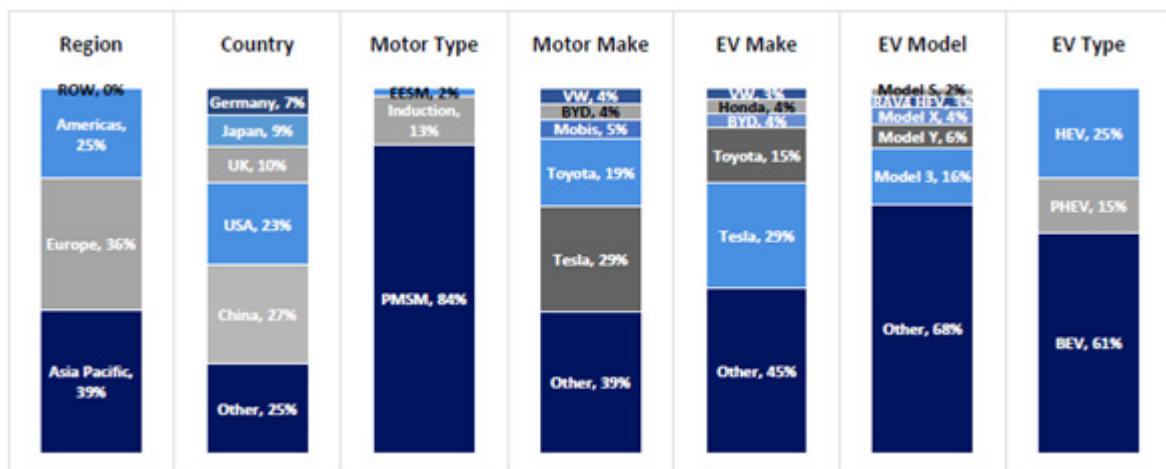
Source : AIE, Global EV Outlook 2020

L'électrification pourrait même être plus rapide qu'anticipée par tous ces scénarios, comme l'attestent les annonces récentes de taux d'électrification des gammes de plusieurs constructeurs : General Motors à 100 % en 2035, Volvo à 100 % en 2030, Volkswagen à 100 % en 2040, Land Rover à 60 % en 2030, Toyota à 90 % en 2040, Stellantis (ex-PSA) a cessé d'investir dans de nouveaux moteurs thermiques.

2. LES MOTEURS UTILISÉS POUR LA PROPULSION DES VÉHICULES ÉLECTRIQUES

De nombreux types de moteurs sont envisageables pour la propulsion des véhicules électriques (voir partie I.B). Néanmoins, trois types de moteurs dominent le marché en septembre 2020 (figure 30).

Figure 30 : caractéristiques des moteurs électriques déployés dans les voitures électriques, en septembre 2020



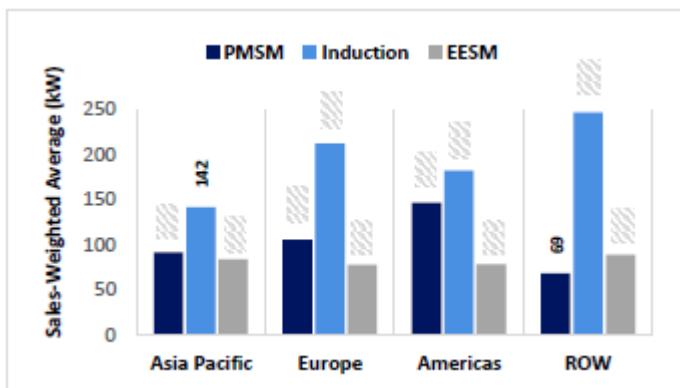
Source : Adamas Intelligence

Les trois types de moteurs qui dominent le marché sont ainsi, par ordre de prépondérance :

- les moteurs synchrones à aimants permanents (PMSM) ;
- les moteurs à induction (asynchrones, IM) ;
- les moteurs synchrones à rotor bobiné (EESM).

Néanmoins, un point d'inflexion de cette tendance pourrait avoir été atteint. En effet, les moteurs à induction ont été majoritaires en puissance dans les véhicules vendus au troisième trimestre 2020 (*figure 31*).

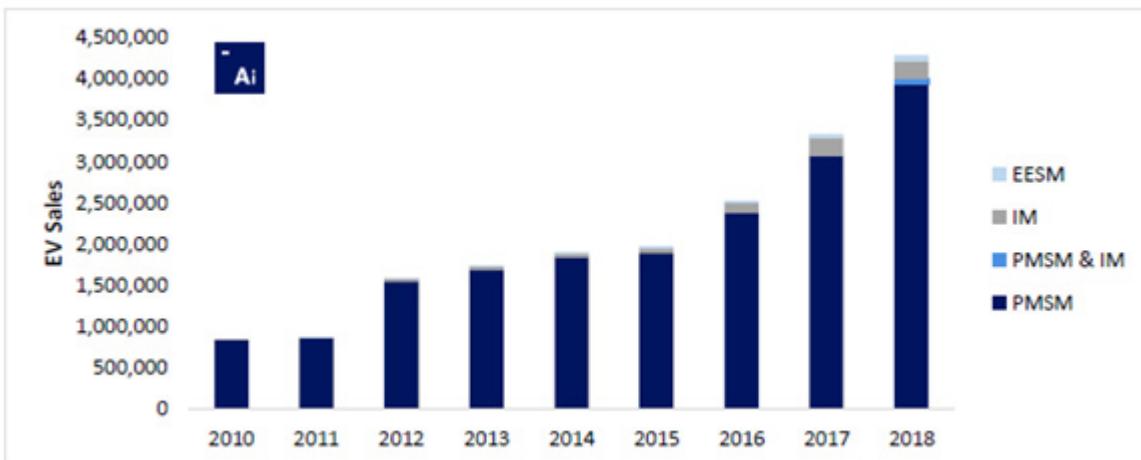
Figure 31 : part en puissance des différents types de moteurs vendus au troisième trimestre 2020



Source : Adamas Intelligence

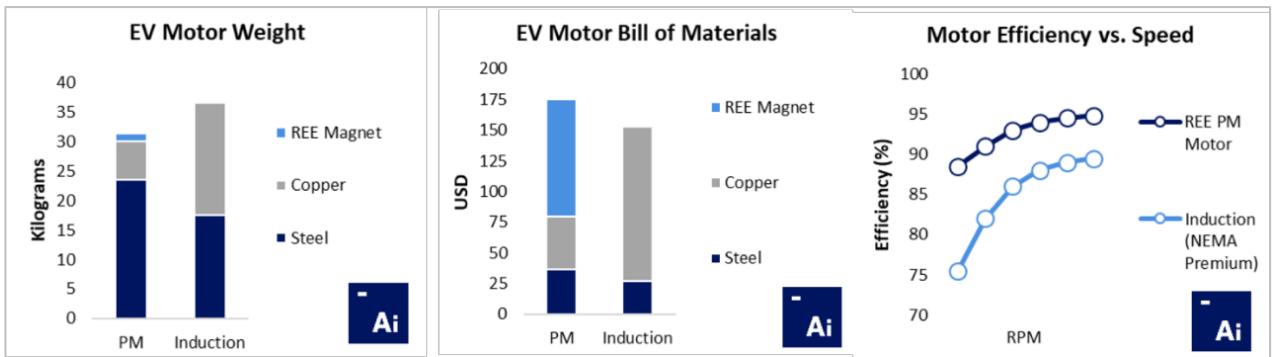
L'importance des terres rares ne peut cependant pas être négligée à l'heure actuelle, car d'une part, les moteurs à aimants permanents restent très majoritaires dans les véhicules en circulation et vendus au niveau mondial (*figure 32*) et d'autre part, les moteurs à aimants permanents restent plus intéressants de par leurs performances (*figure 33*).

Figure 32 : part des moteurs électriques qui disposent d'aimants permanents, à fin 2018



Source : Adamas Intelligence

Figure 33 : comparaison des poids, des coûts et des rendements des moteurs à aimants permanents et à induction



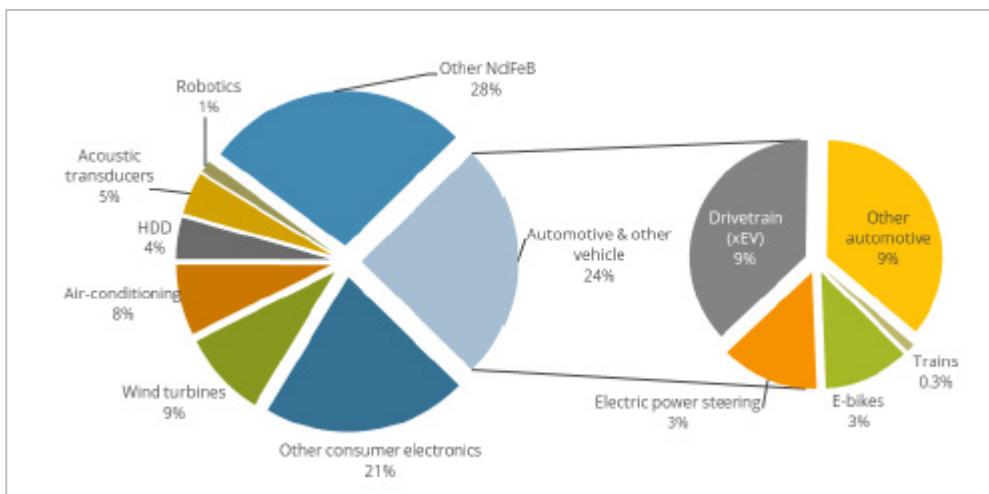
Sources : Adamas Intelligence ; UBS ; Control Engineering

Le rapport Adamas de 2019, intitulé *Electric Growth : EVs, Motors and Motor Materials*, signale que des moteurs moins efficaces engendrent le besoin de surdimensionner les batteries, pour compenser les pertes énergétiques. Ceci a des inconvénients sur le plan de la consommation des matières, comme cela a été évoqué dans le rapport d'étape n°3.

3. PROJECTION DU BESOIN EN TERRES RARES ET EN CUIVRE

Les moteurs à aimants permanents, et donc les terres rares restent importants pour le marché du véhicule électrique (voir partie II.C.2). Ce marché est déjà utilisateur d'un quart des aimants permanents en 2019 et sa forte croissance va donc avoir un impact considérable sur la demande en terres rares (figure 34).

Figure 34 : applications des aimants permanents en 2019 au niveau mondial

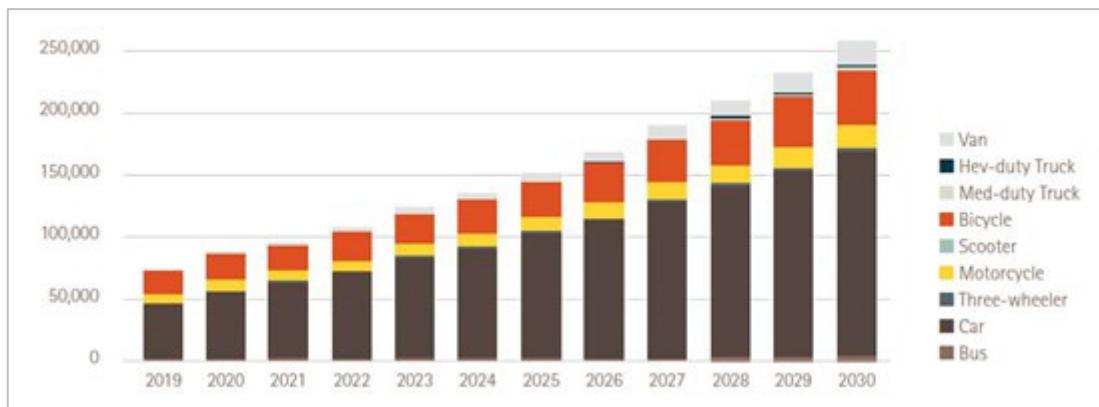


Sources : BRGM CRM factsheets 2020

Adamas Intelligence prévoit ainsi une multiplication par 10 de la demande en oxydes de néodyme-praséodyme (NdPr) occasionnant un possible déficit vers 2030. Concernant le dysprosium, un déficit pourrait intervenir à très court terme comme évoqué *infra* (voir partie III).

Concernant le cuivre, d'après une étude commandée par l'association internationale du cuivre auprès de IDTechEx (2020), le moteur de traction électrique devrait avoir un impact significatif sur la demande en cuivre ces dix prochaines années. À partir de 2030, environ 250 kt de cuivre devraient être mobilisées chaque année, en considérant que la part des véhicules électriques (BEV et PHEV) sera de 19 % en 2030 (figure 35).

Figure 35 : quantité de cuivre demandée par chaque véhicule électrique, en tonnes



Source : IDTechEx, 2020

Si la quantité de cuivre varie d'un type de moteur à l'autre, il est certain que le déploiement du véhicule électrique augmentera la consommation de ce métal. Cela ne concerne pas seulement le moteur, puisque la batterie et l'électronique seront également des postes de consommation, tout comme les bornes de recharge et les nouveaux réseaux électriques nécessaires pour soutenir la hausse de la consommation.

Ces résultats confirment l'importance du cuivre dans la transition bas-carbone, comme cela a été évoqué dans le rapport d'étape n°2 et dans la littérature²⁵.

²⁵ Notamment Seck, G.S., Hache, E., Simoën, M., Bonnet, C., Carcanague S., (2020), Copper at the crossroads: Assessment of the interactions between low-carbon energy transition and supply limitations, Resources, Conservation & Recycling, 163, December. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105072>

D. Conclusion des parties I et II

Si plusieurs technologies de moteurs électriques et de génératrices existent pour les marchés du véhicule électrique et de l'éolien, il est néanmoins possible d'identifier plusieurs matières communes à un grand nombre de technologies.

Ces matières sont les terres rares, utilisées pour les aimants permanents, et le cuivre, utilisé pour les câbles et les bobines.

Le tableau 1 présente les différentes matières évoquées dans les parties précédentes. La suite du rapport sera centrée sur les terres rares et la chaîne de valeur des aimants permanents. La chaîne de valeur des câbles électriques, tant en cuivre qu'en aluminium a déjà été étudiée dans le rapport d'étape n°2.

Tableau 1 : liste des matières évoquées dans ce rapport

Type de moteur	Utilisé dans les moteurs électriques	Utilisé pour les génératrices éoliennes	Remarques
Polymères			Hors du spectre des ressources minérales. Principalement utilisés pour les pales des éoliennes.
Fibre de verre/carbone			
Aluminium		✗	Étudié dans le rapport n°2.
Chrome			Utilisé dans des alliages pour des structures mécaniques.
Cuivre	✗	✗	Étudié dans le rapport n°2.
Manganèse			
Molybdène			Utilisés dans des alliages pour des structures mécaniques (le manganèse et le nickel ont été étudiés dans le rapport n°3 et le zinc dans le rapport n°2).
Nickel			
Zinc			
Béton			Étudié dans le rapport n°2.
Acier			Évoqué dans les rapports n°1 et 2.
Fer			Utilisés dans des alliages pour des structures mécaniques.
Bore	✗	✗	Le choix a été fait de ne pas étudier le bore car le minéral n'est ni critique ni rare.
Néodyme	✗	✗	
Praséodyme	✗	✗	
Dysprosium	✗	✗	
Terbium	✗	✗	Étudiés dans le présent rapport

Points essentiels

- L'Europe, l'Asie et l'Amérique du Nord sont les principales zones géographiques de déploiement de l'éolien. Ce déploiement a fortement accéléré dans les années 2010, et connaît une croissance moyenne de l'ordre de 12 % par an des capacités de production installées dans le monde depuis 2015. Cette tendance devrait se poursuivre, notamment grâce à d'importants investissements en Chine, où plus de 40 % de la nouvelle puissance éolienne mondiale a été installée en 2019.
- La France bénéficie d'un potentiel éolien important. L'objectif annoncé par la PPE est de doubler la capacité de production éolienne installée en France en 2020 d'ici à 2028, pour atteindre plus de 33 GW. En plus d'objectifs fixés au niveau national, le déploiement de l'éolien terrestre se fait selon des plans établis au niveau local, par les régions et les intercommunalités.
- Le soutien public à l'éolien prend la forme d'aides au fonctionnement, et les exploitants éoliens sont rémunérés pour l'électricité produite afin d'atteindre les niveaux fixés lors d'appels d'offres.
- La puissance éolienne installée en France en 2021 est uniquement constituée par l'éolien terrestre. Plusieurs parcs éoliens en mer sont en cours de construction et d'autres projets sont lancés. L'éolien en mer va constituer en France un fort relais de croissance pour l'industrie éolienne lors des prochaines années.
- Les projections menées par l'Ifpen à l'aide du modèle MEETIS ont permis d'étudier les besoins en matière de nouvelles installations éoliennes de 2025 à 2050, qui permettent d'estimer selon les scénarios les quantités de matières mobilisées par la filière éolienne, au niveau européen et au niveau français. Les projections tablent sur une augmentation de la part de marché des éoliennes à aimants permanents au cours des prochaines années, tant pour les éoliennes terrestres qu'en mer.
- Les taux de croissance de la consommation annuelle varient selon les matières de 9 à 16 %. La plus forte augmentation de la consommation de matières pour la filière éolienne est observée pour les minéraux utilisés pour les aimants permanents, à savoir le bore, le dysprosium, le néodyme, le praséodyme et le terbium. La consommation de terres rares pourrait être ainsi multipliée par trois d'ici à 2050, par rapport à la consommation actuelle. Cette demande est alimentée par le développement de l'éolien en mer et l'augmentation de la part de marché des éoliennes terrestres utilisant des aimants permanents, cette dernière étant relativement basse actuellement.
- Malgré cette forte hausse de la demande en terres rares pour l'éolien, la plus forte augmentation de la demande en matières pour les aimants permanents sera portée par l'industrie du véhicule électrique, qui utilise déjà 25 % des aimants permanents produits annuellement, contre 10 % pour l'éolien, principalement pour l'éolien en mer. Le marché du véhicule électrique est en très forte croissance (*voir le rapport d'étape n°3 sur la mobilité bas-carbone*) et celle-ci pourrait s'accélérer avec les annonces de certains constructeurs automobiles qui comptent ne plus commercialiser de véhicules à propulsion thermique à partir de 2030.
- La demande en terres rares pour les aimants permanents présents dans les moteurs de la plupart des véhicules électriques pourrait être multipliée par 10 à l'horizon 2030. Si des alternatives aux moteurs à aimants permanents existent, leurs performances relatives restent inférieures et peuvent nécessiter un surdimensionnement d'autres composants du véhicule électrique. L'impact matière est alors déplacé, des terres rares aux composants de batteries et au cuivre.

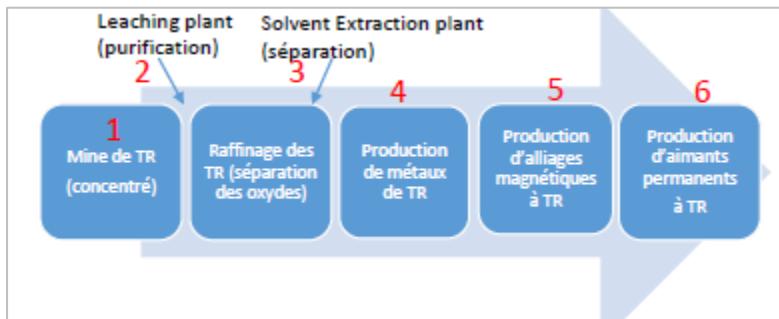
III.

Analyse des vulnérabilités
le long de la chaîne de valeur
des aimants permanents :
application à l'éolien

La principale chaîne de valeur que nous étudions dans cette partie va de l'extraction des terres rares (TR) à la fabrication des aimants permanents néodyme-fer-bore (NdFeB) jusqu'aux usages de ces aimants dans l'éolien. Ces aimants sont composés, en masse, d'environ 30 % de terres rares : néodyme (Nd), praséodyme (Pr) et dans des proportions variables de dysprosium (Dy) et/ou de terbium (Tb). En effet, la plupart des matériaux magnétiques perdent leurs propriétés magnétiques à partir d'une certaine température (appelée la température de Curie). L'ajout de dysprosium et de terbium permet justement d'élever cette température.

Nous reviendrons sur le choix d'étudier ces types d'aimants et leurs performances relatives dans la partie III.C. La chaîne de valeur des aimants NdFeB est schématisée *infra* (figure 36).

Figure 36 : schéma de la chaîne de valeur des aimants permanents



Source : BRGM

- Étape 1 : de la mine au concentré de terres rares, où toutes les TR sont présentes. Cette étape recouvre l'extraction de minerais et leur concentration en préparation de leur raffinage.
- Étape 2 : le raffinage et la purification. L'objectif est d'obtenir des produits « concentrés » améliorés pour obtenir des oxydes de terres rares (OTR) séparées ultérieurement. Il est nécessaire d'abord de purifier le concentré (enlever les éléments radioactifs et pénalisants) dans une usine de lixiviation (*leaching plant*). Cette étape permet de séparer les composés non-désirés et radioactifs du concentré de terres rares.
- Étape 3 : la séparation et l'extraction par des solvants (*solvant extraction*). L'objectif est la production des oxydes de TR séparées. Il est plus facile de séparer des TR légères que des TR lourdes. Seule la Chine dispose actuellement d'unités de séparation de terres rares lourdes.
- Étape 4 : production de métaux de TR. Les oxydes sont réduits en métal, souvent par un traitement à l'hydrogène.
- Étape 5 : production d'alliages métalliques à TR (ajout de fer et de bore).
- Étape 6 : production d'aimants permanents à TR et magnétisation.

Nous allons étudier ces différentes étapes, pour tenter d'en identifier les principales spécificités et les risques associés.

A. Les terres rares

1. PRÉSENTATION ET USAGES

Historiquement, le mot « terres » apparaît à la fin du XVIII^e siècle. Le chimiste Antoine Lavoisier a appelé ainsi les substances non décomposées car non réductibles par le charbon (aspect terreux). Deux de ces substances étaient nommées Yttria et Ceria, et n'ont pas été réductibles en métal jusqu'à la fin du XIX^e siècle. Ces terres étaient considérées comme « rares » aux XVIII^e et XIX^e siècles, car elles étaient moins abondantes que les autres terres connues à l'époque (chaux, alumine, silice, etc.). En matière de *clarke*, c'est-à-dire de teneur moyenne dans la croûte terrestre, les valeurs individuelles des TR sont comprises entre 1 et 10 ppm (partie par millions), ce qui est du même ordre de grandeur que l'étain (Sn) ou l'uranium (U) par exemple, éléments généralement considérés comme relativement abondants. Cependant, les TR se caractérisent par une capacité réduite à se concentrer en gisements dans des contextes géographiques, géologiques et minéralogiques et des conditions propices à une exploitation économiquement rentable, ce qui justifie aujourd'hui davantage la notion de terres « rares ». Ces points sont étudiés plus en détails *infra* (voir la partie III.A.3.a)).

Les TR sont constituées de 17 éléments : les lanthanides (15 éléments) ainsi que l'yttrium et le scandium.

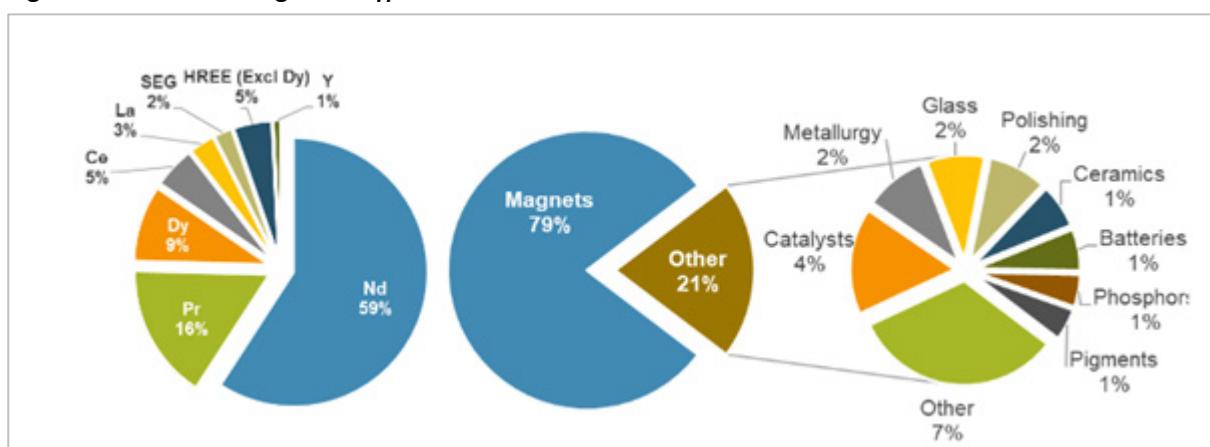
Parmi les lanthanides nous distinguons :

- les TR légères, principalement le lanthane et le cérium mais aussi le néodyme (Nd) et le praséodyme (Pr) ;
- les TR lourdes dont le dysprosium (Dy), le terbium (Tb), l'erbium (Er), etc.

Seuls le néodyme, le praséodyme et le dysprosium sont étudiés dans la suite car ils sont les principaux composants des aimants permanents, enjeux pour la mobilité et l'éolien. Néanmoins les TR sont systématiquement associées dans les minéraux (mais parfois dans des proportions différentes), et les résultats exposés en terme de ressources géologiques, de procédés et d'impacts environnementaux sont similaires pour les autres terres rares.

Le principal usage des terres rares, en valeur, est la fabrication d'aimants permanents (*figure 37*). D'autres applications aux terres rares existent, dans la chimie (métallurgie, catalyseurs, polissage, raffinage pétrolier, etc.), le domaine médical (produits de contraste pour imagerie médicale, composants d'IRM), l'énergie (nucléaire et certaines batteries nickel-cadmium) et l'électronique (phosphores pour écrans, composants pour semi-conducteurs, etc.).

Figure 37 : valeur et usage des différentes terres rares



Sources : CRM Factsheet 2020²⁶, Roskill ; BRGM

²⁶ https://rmis.jrc.ec.europa.eu/uploads/CRM_2020_Factsheets_critical_Final.pdf

En volume, 20 % de la masse extraite de terres rares sert aux aimants permanents, 70 % du volume extrait est composé de cérium et de lanthane.

Les TR sont difficilement substituables puisque leurs alternatives entraînent généralement une baisse de la performance ou une augmentation du prix (*figure 33 et figure 42 dans la partie III.C*). Épisodiquement, la presse se fait le relais de progrès en R&D qui pourraient permettre de meilleures perspectives de substitution, bien que le chemin vers l'industrialisation semble toujours long. Par exemple, en mai 2021, le groupe allemand Mahle a communiqué sur des aimants permanents sans TR et sans contact physique (à l'échelle du laboratoire). Il y a également l'exemple des batteries NiMH remplacées par des batteries Li-ion sans terres rares. Seules des ruptures technologiques pourraient ainsi permettre une substitution des terres rares.

Une autre option envisagée est le remplacement des terres rares les plus critiques (notamment les terres rares lourdes) par d'autres terres rares plus abondantes, comme le cérium et le lanthane. Néanmoins de telles substitutions réduisent pour le moment les performances des aimants permanents. Par ailleurs, l'absence de dysprosium ou de terbium peut nécessiter d'intégrer des systèmes de refroidissement, coûteux, lourds et complexes. Des travaux de R&D récents permettent cependant de réduire la quantité de dysprosium nécessaire dans les aimants de haute performance.

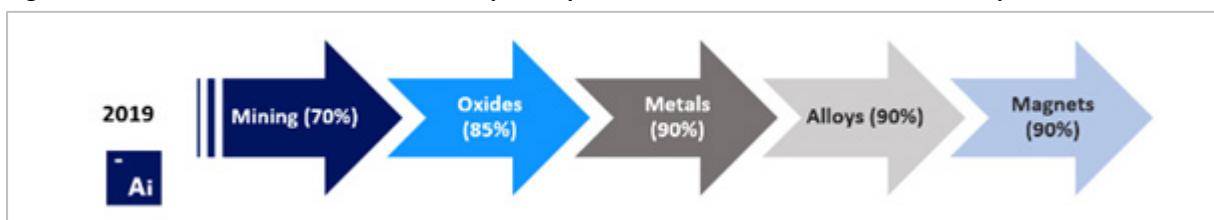
2. MÉCANISMES DE MARCHÉ ET RISQUES D'APPROVISIONNEMENT EN TERRES RARES

Comme évoqué *supra* (*voir partie III.A.1*), la demande pour les TR est largement portée par les aimants permanents. Cette tendance devrait se renforcer avec la hausse de la demande pour les aimants permanents, notamment en raison du déploiement des véhicules électriques et de l'éolien, comme évoqué dans les parties I et II.

En raison de cette demande accrue pour les aimants permanents, les oxydes néodyme-praséodyme sont les plus recherchés et les acteurs hors de Chine sont vulnérables aux évolutions des prix. Le prix d'équilibre de long terme des oxydes de NdPr est estimé à environ 50 \$/kg, mais des tensions de marché peuvent provoquer des hausses sensibles de ce prix.

Cependant, ces hausses ne devraient pas être comparables à celles de la crise des années 2010. La Chine avait alors réduit ses exportations de TR, notamment à destination du Japon, ce qui avait provoqué une envolée des prix des différents composés à base de TR. Ce scénario a moins de chances de se reproduire, car l'industrie chinoise de l'extraction et de la séparation des TR, elle-même, a souffert de la baisse des prix postérieure et des substitutions (vers d'autres aimants ou types de machines électriques) opérées par les acteurs non chinois. La Chine a dû beaucoup subventionner cette industrie pour compenser les effets de la crise. Néanmoins il est important de noter que la situation de domination chinoise se maintient, et ce sur toute la chaîne de valeur des aimants (*figure 38*), par conséquent **il reste tout à fait possible pour celle-ci d'exploiter cette position et d'influencer les prix ou de restreindre l'accès à certains produits, oxydes comme aimants.**

Figure 38 : domination de la Chine sur chaque étape de la chaîne de valeur des aimants permanents



Source : Adamas Intelligence, CRM Factsheet 2020

Par ailleurs, les prix étaient plus difficiles à établir en 2010 en l'absence de marché structuré. Il existe désormais deux places de marché pour les TR en Chine (l'une au Nord : Baotou Rare Earth Products Exchange depuis 2014, l'autre au Sud : Ganzhou Rare Metal Exchange depuis 2019). Elles sont cependant exclusivement destinées au marché intérieur et jusqu'ici principalement dédiées aux contrats spots, et non aux contrats à terme futurs qui permettent d'anticiper et de se protéger contre les évolutions de prix dans l'avenir. Le Shanghai Futures Exchange réfléchit à l'introduction des contrats à terme sur les TR, avec pour objectif de stabiliser les échanges et les prix.

En effet, même en Chine, il existe une volatilité historique sur les prix des TR qui s'explique par deux facteurs :

- des mouvements de stockages « chaotiques » ;
- des jeux entre les acteurs de la chaîne de valeur, certains étant avantagés par une position de négociation dominante (producteurs d'alliages et d'aimants).

Par exemple, fin 2020, il y a eu une hausse des prix puis à partir de mars 2021, les prix se sont effondrés. Il est possible d'expliquer ces mouvements par la structure du marché chinois, sur lequel quatre types d'acteurs interviennent :

- les raffineurs de TR ;
- les producteurs de métaux de TR ;
- les producteurs d'alliages magnétiques ;
- les producteurs d'AP.

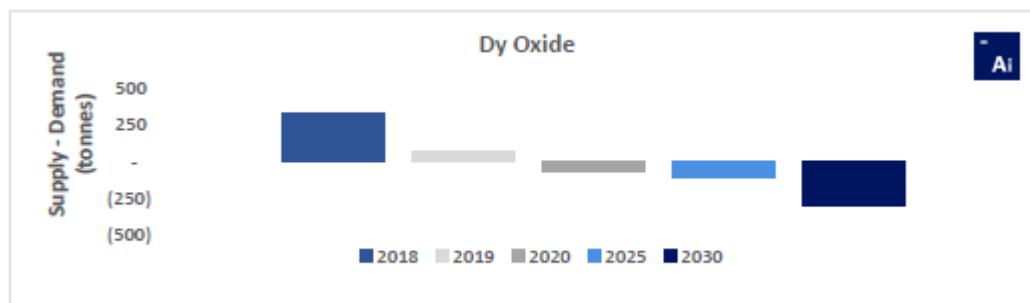
De nombreuses entreprises sont présentes sur plusieurs de ces segments, mais avec des parts de marché différentes selon les étapes, ce qui modifie les rapports de force.

La hausse des prix fin 2020 s'explique par l'épuisement des stocks durant la période du Covid-19 alors que les phases en amont ont été ralenties par l'épidémie. Les opérateurs les plus vulnérables sont les raffineurs et les producteurs de métaux de TR du fait des coûts d'investissements élevés et d'une marge faible. À partir de mars 2021, les producteurs d'alliages et d'AP ont fortement réduit leurs achats pour attendre la baisse des prix, ce qui a provoqué la chute des prix.

Il convient néanmoins de garder à l'esprit que la chaîne de valeur des aimants permanents est constituée de petits marchés, dominés par un nombre restreint d'acteurs qui diffusent peu d'informations. Le marché des terres rares magnétiques, pour les aimants permanents est ainsi d'environ 1,7 Md\$ par an, ce qui est très peu par rapport, par exemple, aux 26 Md\$ de ventes de véhicules électriques par la seule entreprise Tesla en 2020 ou même par rapport aux 3,5 Md€ de CA de Siemens Gamesa sur le seul segment de l'éolien offshore en 2019. Néanmoins, la forte croissance attendue de la demande permet à Adamas Intelligence de conclure que des investissements seront nécessaires pour répondre à la hausse de la consommation (voir les parties I, II et la figure 39).

En effet, dans un rapport de fin 2019, la société Adamas Intelligence estime que des déficits en offre d'oxydes de néodyme-praséodyme et de dysprosium sont probables à partir de 2025-2030 (figure 39).

Figure 39 : prévisions de surplus/déficit en oxydes de NdPr et de Dy, de 2020 à 2030



Source : Adamas Intelligence, 2019

3. OFFRE DE TERRES RARES

a) Gisements et extraction minière

Environ 250 espèces minérales sont connues pour contenir des TR mais moins d'une dizaine peuvent actuellement être traitées par des procédés économiquement viables. Les principaux types de gisements porteurs de ces minéraux sont :

- Les carbonatites contenant de la monazite et de la bastnaésite (comme à Bayan Obo, en Chine, la plus importante mine de TR avec 60 % des réserves mondiales et Mountain Pass, la principale mine nord-américaine) sont les principales sources de terres rares légères actuellement. Les principales exploitations sont en Chine et en Australie. Le problème majeur de ces gisements est la radioactivité du minerai, qui contient souvent du thorium et de l'uranium en quantités importantes. Les minéraux tels que les loparites (un seul gisement en Russie) et les xénotimes semblent également exploitables, avec des gisements notamment en Australie et Malaisie ;
- Les argiles ioniques, dont les latéritiques sont la source de 98 % des terres rares lourdes extraites, au sud de la Chine principalement ;
- Les complexes alcalins et peralcalins autres que les carbonates sont également étudiés, notamment pour les projets de Kvanefjeld et Kringlerne, au Groenland (*voir partie III.A.3.b*) pour plus de détails sur les nouveaux projets).

Au niveau mondial, environ 220 kt d'oxydes de terres rares ont été extraits en 2019. La part de la Chine dans l'extraction a fortement chuté au cours des dernières années, à 57,5 % en 2019, avec notamment la reprise de l'extraction aux États-Unis depuis 2018 (15,6 % de la production mondiale 2019) et le lancement de l'exploitation du Myanmar (12,3 % de la production mondiale en 2019). L'Australie est le dernier producteur minier important de terres rares en 2019, avec 7 % de la production mondiale. Les autres producteurs minoritaires incluent l'Inde et la Russie (*voir partie III.A.3.b*) pour les nouveaux projets et gisements en développement).

Il est à noter que **la Chine impose des quotas de production sur les entreprises locales**. Le ministère chinois en charge de la définition de ces quotas est le ministère de l'industrie et des technologies (MIIT), et non le ministère des ressources naturelles (MONR), qui est pourtant le principal régulateur du secteur minier au niveau national²⁷. D'autres régulations, notamment environnementales peuvent par ailleurs exister au niveau local. En 2019, ce quota était de 132 kt, et il est annoncé de 168 kt pour 2021. **La Chine souhaite ainsi privilégier l'importation de minerais et de concentrés afin de limiter l'impact environnemental sur son sol, néanmoins elle continuera l'extraction du fait de ses capacités dominantes de raffinage et de sa domination sur toutes les étapes jusqu'à la fabrication des aimants.**

Il existe de plus en Chine une production illégale de terres rares, qui serait de l'ordre de 16 % de la production officielle. Cette production est moins chère du fait du non-respect des règles sociales et environnementales liées aux conditions de production. Les produits de ce circuit illégal sont réintégrés dans les circuits légaux lors d'étapes en aval de la transformation du minerai. Cependant l'objectif de la Chine depuis 2017 est de réduire cette production illégale des terres rares. Les mines illégales sont surtout situées dans le sud de la Chine, sur les gisements d'argiles ioniques qui produisent l'essentiel (98 %) des terres rares lourdes (Dy, Tb, Er, etc.).

Les principales entreprises extractrices sont chinoises, l'exception notable étant l'Australien Lynas (*tableau 2*).

²⁷ <https://resourcehub.bakermckenzie.com/en/resources/global-mining-guide/asia-pacific/china/topics/global-mining-guide>

Tableau 2 : principales entreprises extractrices de terres rares

Consortium	Groupe parent	Pays	Provinces/régions
China Northern Rare Earth Group	Baotou Iron and Steel Group	Chine	Mongolie-Intérieure, Gansu
Chalco/Chinalco	Chalco	Chine	Guangxi, Jiangsu, Sichuan, Shandong
China Minmetals	China Minmetals Corp	Chine	Guangdong, Jiangxi, Hunan, Yunnan, Fujian, Guangxi
Xiamen Tungsten	Xiamen Tungsten	Chine	Fujian
China Southern Rare Earth group	Ganzhou Rare Earth Group	Chine	Jiangxi
Guangdong Rare Earth Group	Guangdong Rising Nonferrous Metals Group	Chine	Guangdong
Lynas	Indépendant	Australie	Australie-Occidentale, Malaisie

Source : BRGM

Environ 75 % de la masse de terres rares extraite est constituée de TR légères et le solde de TR lourdes.

La production de néodyme représente en masse environ 15 % de la production minière d'oxydes de terres rares, le praséodyme environ 4,5 % et le dysprosium environ 1 %, selon les gisements. Le dysprosium représente par contre 9 % du marché des TR en valeur. En effet, **les oxydes de terres rares sont de valeurs très variables selon les composés**. Les concentrés de minéraux valent de l'ordre de 60 % du prix des oxydes de terres rares contenues dans le minéral. Les oxydes de lanthane ou de cérium (terres rares les plus courantes) se vendent entre 5 et 10 \$/kg. Le néodyme coûte de l'ordre de 50 à 100 \$/kg et le dysprosium environ 500 \$/kg.

Il est à noter que cette étape de l'exploitation minière est particulièrement capitaliste et risquée. L'ouverture d'une mine nécessite des investissements de l'ordre de plusieurs centaines de millions de dollars sur plusieurs années, y compris en exploration, en études géologiques et chimiques, ainsi qu'en infrastructures et en mesures environnementales. L'extraction de terres rares est le plus souvent réalisée par des mines à ciel ouvert ou par lixiviation *in situ*²⁸. Les enjeux environnementaux liés à ces activités minières sont abordés *infra* (voir partie III.B). La diversité des types de gisement implique également de mettre au point des procédés de traitement du minéral adaptés à chaque exploitation.

b) Raffinage et purification

Une fois le minéral extrait et concentré, la récupération des minéraux est faite par des procédés hydrométallurgiques complexes²⁹, au cours desquels le minéral est plongé dans un solvant et réagit chimiquement avec différents produits. La séparation de chaque oxyde peut nécessiter jusqu'à 1000 équipements en série³⁰. Ces étapes incluent le traitement des coproduits et résidus radioactifs. L'étape de raffinage et de séparation compte pour près des deux tiers des impacts environnementaux de la chaîne de valeur des TR³¹.

²⁸ Walters, A., Lusty, P. 2011. Rare earth elements, Commodity Profile. British Geological Survey. [Online] Available: <https://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/mineralProfiles.html>. Cité dans Stephen E. Kesler, Adam C. Simon - Mineral Resources, Economics and the Environment-Cambridge University Press (2015).

²⁹ Plus de détails sur les procédés de traitements peuvent être trouvés dans l'article Comparative Life Cycle Assessment of NdFeB Permanent Magnet Production from Different Rare Earth Deposits, Josefina Marx, Andrea Schreiber, Petra Zapp et Frank Walachowicz (2018) ou sur <https://ecoinfo.cnrs.fr/2010/08/06/les-terres-rares-la-separation-des-terres-rares/>

³⁰ Ordre de grandeur obtenu lors des auditions.

³¹ Voir partie III.B.

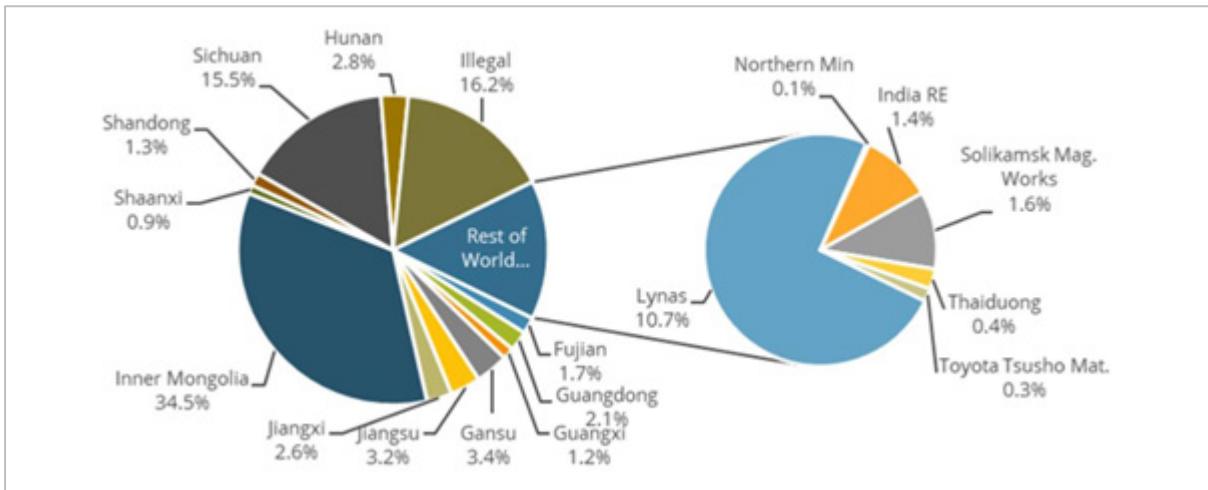
La séparation des TR légères est moins complexe que celle des TR lourdes. **Seule la Chine dispose actuellement d'unités de séparation de terres rares lourdes.** Ainsi, même les entreprises qui extraient des TR lourdes, comme Lynas en Australie (et dont l'usine de purification est actuellement en Malaisie), expédient leurs concentrés en Chine pour raffinage.

Si la Chine extrait environ 60 % des terres rares, **elle contrôle plus de 80 % des capacités de raffinage. Selon Roskill en 2019, la Chine raffine ainsi 85,5 % des minerais extraits dans le monde.** Les autres pays disposant de capacités de raffinage sont l'Australie (10 %), le Japon, la Russie et l'Inde. La production raffinée illégale est de 16 % environ, comme pour la production minière.

La plupart des grands groupes chinois impliqués dans l'extraction des TR sont également présents sur les étapes de transformation et de traitement, du minerai jusqu'aux produits finis comme les aimants permanents, les batteries, les poudres de polissage, etc. Les acteurs chinois sur cette étape sont donc les mêmes que ceux évoqués dans la partie III.A.3.a).

Les capacités par entreprises et provinces chinoises sont présentées *infra* (figure 40).

Figure 40 : capacités de raffinage de terres rares par entreprise/province en 2019



Sources: CRM Factsheet 2020 ; Roskill 2019

La principale entreprise occidentale de production et raffinage de terres rares (légères) est l'Australien Lynas. À partir de leur usine malaisienne, 14,57 kt d'oxydes de terres rares ont été produites pour l'année fiscale 2020 dont 4,6 kt d'oxydes NdPr, vendues principalement à des acteurs japonais. La production d'OTR de Lynas alimente 65 % de la fabrication des AP au Japon. Les oxydes de cérium et de lanthane représentent 8 kt, le concentré de terres rares lourdes (1,5 kt) est vendu en Chine, seul pays disposant d'installations de raffinage.

Une dizaine d'usines sont en construction à travers le monde visant soit à purifier le concentré (extraire les éléments radioactifs) soit à raffiner le concentré pour séparer des oxydes purs. Les projets sont concentrés en Australie, au Canada, aux États-Unis et au Royaume-Uni (voir partie III.A.3.b) pour un inventaire des projets en cours en 2021).

Les deux étapes de purification (*leaching*) et de séparation (*solvant extraction*) sont critiques et fortement capitalistiques. Les dernières annonces d'entreprises du secteur font état de l'ordre de 100 M\$ pour une usine capable de séparer de l'ordre de 5 kt de terres rares par an aux États-Unis³². Les investissements pour des usines de purification sont moindres, de l'ordre de quelques dizaines de millions de dollars.

En Estonie, l'usine Silmet, actuellement détenue par le Canadien Neo Performance Materials Inc. (également actionnaire de Magnequench un fabricant d'aimants permanents) possède une usine de raffinage.

³² www.mining-technology.com/news/lynas-to-build-commercial-light-rare-earths-separation-facility-in-us/

c) Nouveaux projets et gisements

Parmi les terres rares, le néodyme et le dysprosium sont les plus contraints et le facteur prix va être un enjeu principal pour le développement des gisements hors de la Chine. Les nouveaux gisements/projets estiment leur seuil de rentabilité autour de 50 \$/kg d'oxyde de néodyme-praséodyme. Les prix ont connu une forte hausse à la fin de 2020, mais sont en baisse marquée depuis mars 2021.

Nous présentons ci-dessous les principaux nouveaux projets en cours dans le monde, par zone géographique :

EN AUSTRALIE

- L'entreprise Lynas est le 2^e producteur minier avec un peu plus de 20 kt d'OTR dont 5,6 kt d'oxydes NdPr en 2020. L'entreprise répond à 65 % de l'approvisionnement japonais pour la fabrication d'aimants. Elle a des projets d'extension en Australie, dans la ville minière de Kalgoorlie, avec une usine de purification qui sera opérationnelle en 2023, ainsi qu'aux États-Unis, avec la construction d'une usine de séparation des terres rares au Texas pouvant produire 5 kt/an dont 1,25 kt oxyde NdPr.
- L'entreprise Arafura Resources, avec le projet de Nolans : 7 kt/an d'OTR seront produites. La décision finale d'investissement (viabilité de la construction de la mine) est prévue au deuxième semestre 2022.
- L'entreprise Northern Minerals, avec le projet de Browns Range, qui s'étend de la mine à la production d'OTR séparés, notamment riches en yttrium et dysprosium. La mise en production est attendue à l'horizon 2025, mais la présence d'investisseurs chinois risque d'entraîner des tensions localement.
- L'entreprise Australian Strategic Minerals, avec le projet Dubbo, peut produire des oxydes de dysprosium. La particularité du projet est de ne pas dépendre uniquement des TR. En effet, 43 % de leurs revenus proviendraient du zirconium, 30 % des TR, assurant une moindre exposition aux risques de mouvements de prix, car le zirconium est moins volatil historiquement.
- L'entreprise Iluka Resources envisage deux opérations minières et une usine de séparation à Eneabba (Australie-Occidentale) et Wimmera (État de Victoria). À terme, une capacité de 15 kt/an de concentrés est envisagée. Techniquement, les premiers concentrés de monazite ont été envoyés en 2020 (Eneabba phase 1). Les capacités cumulées des projets Eneabba phase 2 et Wimmera seraient de l'ordre de 800 kt de concentrés (à partir de monazite et de xénotime). Le gouvernement australien soutient le développement de l'usine de séparation, qui aurait pour finalité de pouvoir traiter des concentrés d'autres sources.

AU CANADA

- Une usine de purification avec plusieurs sources de TR est en construction, soutenue par le *Saskatchewan Research Council*. Le coût initial est de 31 M\$ et la production se ferait en partenariat avec Vital Metal.
- L'entreprise Vital Metal, avec le projet Nechalacho, a commencé sa production de concentrés en juin 2021. Un accord avec Norwegian REE a été passé pour 1 kt d'OTR/an. Une usine de séparation a également été envisagée dans un second temps.

AUX ÉTATS-UNIS

- Le ministère de la défense a investi 30 M\$ pour l'usine de séparation de Lynas, au Texas. La capacité sera de 5 kt/an dont 1,25 kt d'oxydes NdPr. 150 M\$ ont été récemment annoncés pour financer un projet de séparation de terres rares.
- Le ministère de la défense soutient également d'autres acteurs : TDA magnetics, Urban mining pour la production et le stockage d'aimants de terres rares.
- Le site de Mountain Pass (Californie) est historiquement la principale mine nord-américaine de terres rares. La production a repris en 2018, avec une capacité de 38 kt d'OTR/an sous forme de concentrés.

- La mine de Round Top (Texas) pourrait entrer en production en 2023 sous réserve de financements et de validations techniques adéquats. Une usine pilote dans le Colorado a validé les procédés avec 10 à 12 kg d'OTR séparés par an.
- Un projet d'exploitation de monazite existe, avec un objectif de production de 15 kt/an, extrait aux États-Unis, transformé en Estonie (usine Silmet) et destiné au marché américain.
- L'entreprise Ucore Rare Metals (en Alaska) a lancé la première phase pour construire une usine de purification dans un premier temps, pour enrichir le concentré extrait sur place. Dans un second temps la production d'OTR est envisagée.

EN AFRIQUE

- L'entreprise britannique Pensana Rare Earths développe un projet de purification en Angola et s'est engagée à construire une usine de purification en Grande-Bretagne.
- L'entreprise britannique Rainbow Rare Earths produit au Burundi environ 1 kt de concentrés de TR à 58 % d'OTR avec un objectif de passer à 5-6 kt de concentrés/an.

AU JAPON

- Le JOGMEC (*Japan Oil, Gas and Metals National Corporation*) a obtenu 50 % du partenariat du projet Lofdal en Namibie pour 20 M\$ en 2021.
- L'entreprise Hitachi compte vendre sa branche *magnetic materials*, spécialiste des aimants permanents, pour des raisons de rentabilité. L'entreprise ayant refusé des investisseurs chinois, un consortium mené par les États-Unis avec des fonds d'investissements japonais serait en passe de la racheter.

EN RUSSIE

- Le projet Tomtor est monté pour exploiter un gisement important en Yakoutie, qui sera traité à la frontière de la Chine. Mais il est difficile de connaître l'état actuel du projet. La production visée est de 20 kt d'OTR en 2024 et 70 kt en 2030.

EN EUROPE

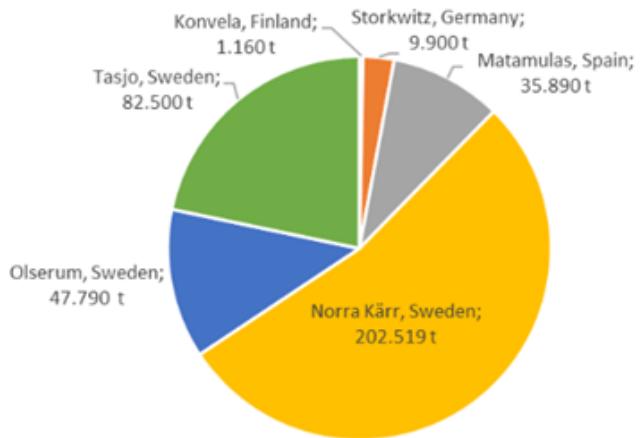
L'Europe dispose d'un potentiel géologique intéressant³³, notamment en Suède où la faisabilité technique de l'exploitation a été prouvée et réadaptée en juillet 2021, mais l'enjeu est surtout l'acceptabilité sociale.

La figure 41 présente les ressources de ces différents projets. En France, le potentiel de TR est très limité par la géologie et l'exploitation par des juniors minières est difficilement envisageable.

³³ Pour plus d'informations, Nicolas Charles, Johann Tuduri, Gaétan Lefebvre, Olivier Pourret, Fabrice Gaillard, et al. Ressources en terres rares de l'Europe et du Groenland: un potentiel minier remarquable mais tabou? Sophie Decrée; Philippe Boulvais. Ressources métalliques : cadre géodynamique et exemples remarquables, ISTE Science Publishing Ltd; Wiley, 2021. hal-03138953

Figure 41 : potentiels projets d'exploitation des terres rares en Europe

In the EU, there are several potentially commercial projects classified under UNFC (E2; F2; G1,2,3) in Sweden (333,000 tonnes REO); Spain (36,000 tonnes REO) and Germany (10,000 tonnes REO).



Source : CRM Factsheets 2020

- Le groupe polonais Azoty Pulawy s'est associé à Talaxis Limited, qui développe un projet minier au Malawi avec l'entreprise canadienne Mkango Resources Limited. Azoty Pulawy, acteur majeur des produits chimiques, compte construire une installation de traitement des TR (purification et séparation).
- L'entreprise LKAB porte un projet à Kiruna, en Suède. L'objectif est de traiter les TR contenues dans les déchets de mines de fer locales.
- Le projet Norra Kärr, en Suède, en phase d'exploration, a été mis à l'arrêt entre 2017 et 2020 pour des raisons environnementales. Une extension du permis d'exploration jusqu'en août 2025 a été octroyée et une étude de faisabilité a été menée au cours de l'été 2021.
- L'entreprise Yara, en Norvège, étudie la possibilité de récupérer des TR à partir de l'exploitation d'engrais phosphatés.
- Le gisement de Kvanefjeld au Groenland pourrait devenir le 2^e producteur mondial. Il s'agit d'un des plus gros gisements de TR au monde (10 Mt d'OTR contenus dans les ressources) et une production de 32 kt/an de concentrés est envisagée. Le gisement est associé à du zinc, de l'uranium et de la fluorine qui seraient exploités conjointement. L'étude de faisabilité a été finalisée en 2019. Les investissements envisagés sont de 500 millions de \$ pour la construction de la mine, qui aurait une durée de vie de 37 ans. Cependant, des problèmes d'acceptabilité sociale, liés à l'exploration et l'exploitation d'uranium, retardent toute décision et avancement du projet à ce stade. D'ailleurs, début novembre 2021, le nouveau gouvernement du Groenland a décrété une interdiction de l'exploitation de minerais contenant plus de 100 ppm d'uranium, rendant impossible l'exploitation du gisement sans changement ultérieur. La société chinoise Shenghe détient 9,3 % de la société portant le projet et a créé une co-entreprise avec China National Nuclear Corp pour la gestion de l'importation des éléments radioactifs contenus dans le mineraï.

d) Sources secondaires et recyclage

À l'heure actuelle, il n'existe pas de filière structurée de recyclage des aimants permanents. Moins de 1 % des aimants usagés seraient ainsi recyclés. Deux grandes possibilités existent pour recycler les aimants permanents :

- La boucle courte : les aimants usagés sont broyés pour obtenir une poudre d'alliage, qui peut être réutilisée pour fabriquer de nouveaux aimants permanents (*voir partie III.C pour le passage des alliages aux aimants permanents*). L'avantage de cette voie est d'être bien adaptée au recyclage d'aimants de taille importante de composition homogène. La chimie nécessaire est peu nocive sur le plan environnemental ;

- La boucle longue : les aimants sont broyés, puis des traitements permettent d'obtenir des oxydes purs de terres rares. L'avantage est de permettre de s'adapter aux évolutions technologiques, notamment en cas d'évolution des proportions des différents composants des alliages magnétiques. L'inconvénient est qu'il existe peu d'entreprises européennes capables d'utiliser les oxydes ainsi récupérés, qui risquent d'être exportés en Chine. La société Vacuumschmelze (*voir partie III.C*) par exemple, importe des alliages de terres rares, et non des oxydes pour sa fabrication d'aimants permanents.

En Chine, des usines de recyclage existent déjà, avec 10 à 15 kt de capacités de traitement, mais elles recyclent essentiellement les chutes de production primaire d'aimants permanents. Ces usines tendent à privilégier le recyclage par boucle longue, qui permet d'obtenir des oxydes purs de terres rares. Ce choix permet de traiter les pertes de chaque étape du processus de production. **Un risque identifié est celui de la fuite des déchets d'aimants permanents à haute valeur ajoutée vers les usines chinoises**, qui seraient déjà à même de recycler les aimants usagés.

Les sociétés japonaises Santoku, Hitachi, Shin Etsu, Showa Denko, Mitsubishi Materials développent le recyclage du néodyme et du dysprosium des aimants permanents avec succès. Aujourd'hui le Japon bénéficie d'une source non négligeable de dysprosium d'origine secondaire à partir d'une usine de recyclage vietnamienne implantée au Vietnam.

Si aucune mine de terres rares n'est exploitée pour le moment en Europe, le continent dispose de déchets en abondance (aimants permanents des moteurs des sous-marins y compris nucléaires, missiles, vélos électriques hors d'usage, trottinettes électriques, et prochainement véhicules électriques et éoliennes usagés). Néanmoins, un système d'information et de collecte reste à mettre en place. En effet, la présence de terres rares dans des systèmes usagés n'est pas toujours connue. Les terres rares ne sont donc pas séparées des structures en ferraille, en acier, et ne peuvent donc pas être réutilisées. En particulier, le gisement d'aimants permanents contenu dans les éoliennes terrestres en France est particulièrement mal connu, puisque selon différentes estimations, entre 3 et 30 % de ces éoliennes terrestres contiendraient des aimants permanents.

L'Europe finance des projets de recyclage d'AP à hauteur de 55 M€ depuis 2013. Un pôle d'activité en Grande-Bretagne se développe autour de l'université de Birmingham avec des acteurs en Slovénie.

La R&D en France est énormément tournée vers les applications de recyclage, ainsi que sur la réduction des quantités de terres rares nécessaires.

En France, le CEA et le BRGM ont des procédés intéressants, tant sur le plan industriel qu'environnemental à proposer. L'entreprise Carester³⁴ réunit l'ensemble de l'expertise et du savoir-faire dans le raffinage des terres rares. L'entreprise MagRESource propose également une solution de recyclage en boucle courte.

Néanmoins, le recyclage ne permettra pas de subvenir aux besoins croissants d'aimants permanents. En effet, la forte croissance du marché ne pourra pas être absorbée, même par le recyclage de l'ensemble des aimants usagés.

Par ailleurs, **un obstacle important au recyclage à grande échelle est celui de l'extraction des aimants**, notamment dans les véhicules usagés (moteurs de la direction assistée, moteurs de traction des voitures, vélos, trottinettes, etc.). Cette extraction est difficile, notamment en raison de la diversité des technologies, et limite les chances d'être rentable face à la production primaire. Il faut également désaimanter les aimants avant de procéder à leur recyclage, ce qui peut être une étape délicate. Une certaine standardisation des produits, notamment dans les véhicules électriques permettrait une plus grande automatisation et faciliterait le recyclage. Il est cependant difficile d'évaluer la quantité d'aimants qu'il serait possible de produire à partir du recyclage, probablement pas plus de 10 à 15 % des besoins français à l'horizon 2030. En France, la société Carester peut mettre en place des procédés de recyclage propres. La société Daimantel peut quant à elle préparer les aimants usagés pour leur transport et leur recyclage, et ainsi faciliter l'étape critique de leur collecte et de leur démantèlement.

³⁴ Telle qu'elle s'est présentée lors de son audition aux membres du groupe de travail.

B. Les impacts environnementaux et sociaux de l'exploitation des terres rares

Le choix a été de présenter dans cette partie des résultats quantitatifs, lorsque les données disponibles sont suffisamment fiables.

L'approche se base sur les analyses en cycle de vie (ACV), avec une mise en perspective des résultats lorsque différentes sources existent. En effet, jusqu'en 2014, il y avait une forte incertitude sur les ACV menées car les données disponibles étaient souvent incomplètes et limitées. Un nombre croissant d'articles scientifiques de qualité ont depuis été publiés, tels que les travaux de Bailey et al. (2020)³⁵, les plus reconnus, et ceux de Nuss et Eckelman (2014)³⁶ qui restent pertinents pour la mise en perspective.

Les données qui vont suivre proviennent d'études sur le site de Bayan Obo, principale mine mondiale de TR légères, au nord de la Chine, en Mongolie-Intérieure et les provinces du sud de la Chine qui sont la principale zone d'extraction des terres rares lourdes. Ces zones sont celles pour lesquelles les données et analyses sont les plus nombreuses. Ces analyses sont complétées par des éléments sur d'autres zones de production lorsqu'ils existent. Or, il y en a très peu à ce jour (Australie, États-Unis, Malaisie, etc.) et des incitations sont nécessaires pour qu'elles deviennent disponibles dans les années à venir.

1. NÉODYME ET PRASÉODYME – TERRES RARES LÉGÈRES DANS DES GISEMENTS DE « ROCHES DURES »

a) Empreinte carbone

Selon Bailey et al. 2020, pour la production d'OTR, ce sont 38 kgCO₂/kg d'OTR qui sont émis pour le site de Bayan Obo et 33 kgCO₂/kg d'OTR pour le gisement de Mount Weld en Australie, des chiffres du même ordre de grandeur. Dans les deux cas, la phase d'extraction par solvant (voir partie III et particulièrement III.A.3.b) pour plus de détails) contribue aux deux tiers des impacts.

L'empreinte carbone du néodyme (Nd) et du praséodyme (Pr) par kilogramme d'oxydes produits, est dans la moyenne des autres métaux pour lesquels des ACV existent. En revanche, au regard de la production totale de métaux, la contribution des OTR légères sur le changement climatique est limitée, de l'ordre de 0,01 %, en raison du faible tonnage produit par rapport aux autres métaux.

b) Résidus de traitement à Bayan Obo, hors contamination des éléments radioactifs

A priori, il n'existe pas de risque de drainage minier acide (DMA³⁷) mais peu d'informations sont disponibles. Ceci est dû, selon Judith Pigneur (2019)³⁸ à « la présence de minéraux carbonatés et phosphorés qui ont un effet tampon sur l'acidification (Findeiß & Schäffer, 2017³⁹) ».

En revanche, les concentrations des résidus en certains polluants sont considérées comme élevées (en phosphates et en métaux). Selon l'Ademe (2019)⁴⁰, les poussières issues de la mine et du broyage des minerais sont susceptibles de disperser des polluants à plus ou moins longue distance. L'extraction et la séparation des métaux s'appuient sur des traitements pyro et hydrométallurgiques qui conduisent à rejeter des résidus de traitement polluants, dans l'air (du

³⁵ Bailey, G., Joyce, P. J., Schrijvers, D., Schulze, R., Sylvestre, A. M., Sprecher, B., Vahidi, E., Dewulf, W., Van Acker, K. 2020. Review and new life cycle assessment for rare earth production from bastnäsite, ion adsorption clays and lateritic monazite. *Resour. Conserv. Recycl.*, 155 (2020), p. 104675, 10.1016/j.resconrec.2019.

³⁶ Nuss, P., Eckelman, M.J. 2014. Life cycle assessment of metals: a scientific synthesis. *PLoS One*. 2014;9(7):e101298. Published 2014 Jul 7.

³⁷ Le drainage minier acide (DMA) ou encore drainage rocheux acide (DRA) est un phénomène de production d'une solution minérale acide qui s'écoule régulièrement, suite à une production d'acide sulfurique induite par la mise en contact avec l'air de certains minéraux (sulfures métalliques), généralement à l'occasion de grandes excavations (carrières) et travaux miniers ou de stockage de déchets miniers.

³⁸ Pigneur, J. 2019. Mise au point d'une méthode intégrée d'analyse des impacts des filières de matières premières minérales. *Gestion et management. Université Paris Saclay (COMUE)*, 2019. Français. (NNT : 2019SACL093).

³⁹ Findeiß, M., & Schäffer, A. (2017). Fate and Environmental Impact of Thorium Residues During Rare Earth Processing. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 3(1), 179-189. doi.org/10.1007/s40831-016-0083-3.

⁴⁰ Ademe, Terres rares, énergies renouvelables et stockage d'énergie, novembre 2019.

fluor notamment), dans des lagunes affectant les eaux souterraines (avec des effluents⁴¹ chimiques). Judith Pigneur (2019) indique par ailleurs que « *la plupart des déchets liés à l'extraction des terres rares de Bayan Obo sont contenus dans la retenue du barrage de Weikuang, qui constitue un parc à résidus* ». Construit dans les années 60, sans toutes les précautions environnementales nécessaires, ce parc à résidus est une des sources majeures de pollutions des milieux.

Toutefois, l'intensité en déchets n'est pas particulièrement plus élevée que pour d'autres métaux et la quantité totale de résidus générés par Bayan Obo est faible en comparaison de l'ensemble du secteur de production des métaux dans le monde : de 120 à 190 tonnes de résidus miniers par tonne de terres rares produites, ce qui n'est pas plus que le cuivre par exemple.

c) Contamination aux éléments radioactifs

Le transfert des éléments radioactifs se fait majoritairement dans les résidus de traitement. Le site de Bayan Obo est aussi contaminé ainsi que ses alentours (sols, plantes, animaux). Judith Prigneur (2019) note en effet « *après 50 ans d'exploitation du parc à résidus, la propagation de la contamination du sol aux radionucléides autour de ce parc est estimée à 47 km² et a atteint les eaux souterraines et la végétation de la région environnante* ».

Les problèmes de radioactivité sont liés au thorium qui est rejeté lors de l'exploitation de la monazite et de la bastnaésite. Le thorium est un « *un élément faiblement radioactif mais dont la chaîne de désintégration produit un isotope du radon émetteur alpha facilement inhalable et présentant un risque radiologique important* »⁴². Les minéraux et résidus de traitement à thorium sont donc considérés comme des déchets radioactifs, avec les problèmes de stockage associés (BRGM, 2015). En Australie et aux États-Unis, un grand nombre d'exploitations de monazite ont été abandonnées.

Néanmoins, le développement de la filière nucléaire au thorium n'est pas à exclure dans des perspectives industrielles de moyen terme (> 5-10 ans) avec notamment la Chine comme chef de file. Si cette filière se développait, le thorium pourrait devenir un coproduit valorisable des gisements de terres rares en contenant.

d) Consommation d'énergie primaire

La production de TR est classiquement considérée comme énergivore, mais peu d'études reportent les consommations d'énergie tant à l'échelle de l'exploitation minière que dans une ACV. Néanmoins selon Nuss et Eckelmann (2014), l'intensité énergétique est comparable à celle des autres métaux : 344 MJ-éq/kg d'oxydes de Nd, 376 MJ-éq/kg d'oxydes de Pr. De même la consommation d'énergie primaire (énergie directe et indirecte) pour la production de TR est à relativiser au regard de la consommation d'énergie primaire pour la production de métaux et minéraux dans le monde, puisque la production de Nd et de Pr compte pour moins de 0,02 % du volume de métaux produits annuellement.

e) Consommation directe d'eau

La consommation directe d'eau est peu mise en avant comme un point sensible pour la production d'OTR en comparaison des autres enjeux liés aux ressources et à la contamination de l'eau. Ceci peut être expliqué par le fait que les traitements hydrométallurgiques interviennent relativement tard dans la production des oxydes de terres rares et donc sur des volumes de minerais limités. Ainsi le volume d'eau nécessaire au traitement est limité. Par ailleurs, certains procédés, comme ceux développés par la société Carester, peuvent permettre la réutilisation plusieurs fois de l'eau utilisée pendant les étapes de raffinage.

f) Occupation et changement d'affectation des sols

L'exploitation minière pour la production des terres rares se fait essentiellement en surface par des mines à ciel ouvert. À Bayan Obo, cela représente 60 km² d'emprise directe, soit moins de 0,1 % d'emprise au sol des activités minières dans le monde (Wall et Pell, 2020)⁴³.

⁴¹ Un effluent est un fluide résiduaire d'origine industrielle type industrie minière.

⁴² Judith Pigneur (2019).

⁴³ Responsible sourcing of rare earths: Exploration-stage intervention including life cycle assessment, novembre 2020, ORE (Open Research Exeter, University of Exeter).

g) Risques sanitaires et sociaux à Bayan Obo

Peu d'études ont été réalisées sur ces risques. Mais un des villages proches de Bayan Obo est appelé le « village de la mort » : 61 personnes y seraient mortes d'un cancer des poumons ou du cerveau durant la période 1999-2006 (Huang *et al.*, 2016⁴⁴).

On a également recensé un certain nombre de maladies respiratoires et cardiovasculaires, de leucémies, d'ostéoporoses, de cancers des poumons et du foie, touchant les habitants et les animaux de la région. Par ailleurs l'utilisation de résidus comme matériaux de construction a dispersé la pollution dans les alentours. Toutefois le lien direct entre pollutions et impact sanitaire autour du parc à résidus reste peu analysé dans la littérature.

h) Les conditions de travail

Les travailleurs sont soumis à une dose radioactive, mais il est difficile d'évaluer les conditions de travail spécifiques à chaque mine. De façon générale, le travail dans les mines de terres rares en Chine est précaire, en particulier dans les mines illégales.

Cependant, il n'y a pas de mine artisanale connue de terres rares légères.

2. LE DYSPROSIMUM (TR LOURDES DANS DES GISEMENTS D'ARGILES IONIQUES EN CHINE)

a) Empreinte carbone

L'empreinte carbone est équivalente à 40,5 kg de CO₂ par kilo d'oxydes de terres rares produits (40,5 kgCO₂éq/kg d'OTR). Néanmoins c'est une contribution limitée par rapport à la production totale des métaux. L'étape de lixiviation contribue à nouveau aux deux tiers des impacts.

b) Résidus de traitement

L'enjeu de génération et de gestion des déchets miniers est aujourd'hui de moindre importance par rapport à ce qu'il a pu être par le passé, suite à l'interdiction de la lixiviation en tas par les autorités chinoises en 2011. La lixiviation en tas correspond à un traitement chimique, par des solvants, de minerais, directement sur le lieu d'extraction (et non dans une usine chimique). Quant à la lixiviation *in situ*, durant laquelle le solvant est appliqué directement dans le gisement (sans l'étape d'extraction/broyage du minéral) ne génère pas de déchets en quantité substantielle. En revanche, elle génère, elle aussi, des effluents chimiques.

L'exploitation des argiles ioniques dégrade des surfaces importantes mais ne rejette pas de poussières ni de thorium ni d'uranium et il n'y a pas de risque de drainage minier acide.

c) Émissions directes dues à la lixiviation *in situ*

La lixiviation *in situ* entraîne une contamination des eaux souterraines et des eaux de surface, du fait de l'utilisation du sulfate d'ammonium et d'acide oxalique (pour produire une tonne d'OTR il faut utiliser 6 à 7 tonnes de sulfates d'ammonium et 1,2 à 1,5 tonnes d'acide oxalique). Bien que non excavée, la couche supérieure du sol se retrouve contaminée, par capillarité, par la solution utilisée. Ceci affecte la végétation et rend la réhabilitation difficile.

La technique de la lixiviation *in situ* favorise également les glissements de terrain.

d) Consommation d'énergie primaire

Selon Nuss et Eckelmann (2014), l'intensité énergétique peut être qualifiée de « moyenne-haute » par rapport aux autres métaux : 1170 MJ-éq/kg oxyde de Dy.

Comme pour les TR légères, la consommation d'énergie primaire pour la production de TR est faible en comparaison de la consommation d'énergie primaire pour la production de métaux dans le monde, en raison du faible tonnage extrait.

⁴⁴ Huang, X., G. Zhang, A. Pan, F. Chen, and C. Zheng. 2016, Protecting the environment and public health from rare earth mining, *Earth's Future*, 4, 532–535, doi:10.1002/2016EF000424.

e) Consommation directe d'eau

De façon similaire aux TR légères, la consommation d'eau est peu mise en avant comme un point sensible pour la production d'OTR en comparaison des autres enjeux « ressources » et de la problématique de « contamination de l'eau ».

f) Occupation et changement d'affectation des sols

Ces problématiques ont conduit le gouvernement chinois à interdire la lixiviation en tas en 2011 et à la remplacer par la lixiviation *in situ*. Mais malgré ces mesures, l'occupation des sols reste plus importante que pour les oxydes de terres rares légères.

L'exploitation des terres rares lourdes reste cependant sujette aux pratiques illégales.

g) Risques sanitaires et sociaux

Les populations locales sont directement affectées par la contamination des eaux (souterraines et de surface) et des sols du fait de la lixiviation *in situ* en Chine. Cela a entraîné des manifestations réprimées par la police et par les exploitants illégaux.

h) Conditions de travail

Les conditions de travail sont précaires, en particulier dans les mines illégales. Les exploitations sont presque toutes artisanales ou de petite échelle.

3. BILAN DES POINTS DE VIGILANCE DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX ET SOCIAUX DES TR

Le tableau ci-après résume les points de vigilance des impacts environnementaux, sanitaires et sociaux de l'exploitation des terres rares en Chine d'un côté et lourdes de l'autre.

Tableau 3 : tableau récapitulatif des points de vigilance des impacts sociaux et environnementaux liés au Nd, Pr, Dy et Tb, à partir des exploitations en Chine

Impacts		Néodyme et praséodyme	Dysprosium
Consommation des ressources	Consommation d'énergie primaire	- Intensité énergétique « moyenne » en comparaison des autres métaux - Consommation d'énergie primaire totale faible au regard de la consommation d'énergie primaire pour la production de métaux dans le monde	- Intensité énergétique a priori « moyenne - haute » en comparaison des autres métaux - Consommation d'énergie primaire totale faible en comparaison de la consommation d'énergie primaire pour la production de métaux dans le monde
	Consommation d'eau et conflit d'usages	Peu mise en avant en comparaison des autres enjeux « ressources » et de la problématique de « contamination de l'eau »	Peu mise en avant en comparaison des autres enjeux « ressources » et de la problématique de « contamination de l'eau »
	Consommation d'espace et perte de biodiversité	- Extraction minière en surface essentiellement et peu en partie souterraine : à Bayan Obo, ≈ 60 km ² d'emprise de l'exploitation minière (dont un parc à résidus), soit moins de 0,1 % d'emprise au sol des activités minières dans le monde	- Occupation des sols par kg d'OTR lourdes très supérieure à celle de la production d'un kg d'OTR légères - Bien que non excavée, la couche supérieure du sol est contaminée (par capillarité) affectant la végétation et rendant la réhabilitation plus difficile - Ampleur de l'emprise au sol difficilement quantifiable en raison des pratiques illégales - Glissements de terrain

Impacts		Néodyme et praséodyme	Dysprosium
Émissions dans l'environnement	Émissions directes de GES	<ul style="list-style-type: none"> - Par kg d'oxyde produit : intensité carbone « moyenne » en comparaison des autres métaux - Au regard de l'impact associé à la production mondiale totale de métaux, contribution limitée des oxydes de TR légères 	<ul style="list-style-type: none"> - Intensité carbone « moyenne » en comparaison des autres métaux, et contribution limitée à l'empreinte carbone de la production totale de métaux dans le monde
	Pollution des milieux aquatiques	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de risque de DMA, mais un enjeu important nécessaire à quantifier plus précisément - Concentrations des résidus en certains polluants élevées ; - Parc à résidus : pollution avérée des milieux (eaux souterraines, fleuve Jaune) 	<ul style="list-style-type: none"> - Contamination des eaux souterraines et des eaux de surface du fait de l'utilisation de sulfate d'ammonium (lixiviation <i>in situ</i>)
	Production de déchets miniers	<ul style="list-style-type: none"> - Contamination aux éléments radioactifs, en particulier au thorium (abandon de nombreuses exploitations de monazite, contenant des éléments radioactifs, dans le passé, notamment en Australie et aux États-Unis) - Transfert des éléments radioactifs majoritairement dans les résidus de traitement - À Bayan Obo : contamination radioactive sur le site et aux alentours du site (sols, plantes, animaux) - Mais une « intensité déchets » pas particulièrement plus élevée (voire moins élevée) que dans le cas d'autres métaux ; et quantité totale de résidus générés à Bayan Obo faible en comparaison des quantités générées par la production des autres métaux dans le monde - Pas de risque de DMA 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de génération substantielle de déchets (lixiviation <i>in situ</i>) - Exploitation des argiles ioniques pour production de TR lourdes peu concernée par les problèmes de radioactivité - Pas de DMA
Risques sanitaires et sociaux	Mine artisanale	Pas de mine artisanale	Exploitations presque artisanales ou à petite échelle sur les argiles ioniques du Sud de la Chine
	Conditions de travail	<ul style="list-style-type: none"> - Conditions de travail à Bayan Obo : travailleurs soumis à des doses radioactives - Conditions précaires dans les mines à TR en Chine (en particulier dans les mines illégales) 	<ul style="list-style-type: none"> - Travail précaire dans les mines à TR en Chine, en particulier dans mines illégales (répandues dans les provinces du sud). - Droit du travail non respecté, pas de représentation des travailleurs, absence de contrats dans certains cas
	Risques sanitaires	<ul style="list-style-type: none"> - Dans le village à proximité du parc à résidus, 61 personnes sont mortes d'un cancer des poumons et/ou du cerveau durant la période 1999-2006. - Un certain nombre de cas de maladies respiratoires et cardiovasculaires, de leucémie, d'ostéoporoses, de cancer des poumons/du foie, à la fois chez les habitants et les animaux autour du parc à résidus ; les cultures autour du parc à résidus sont aussi affectées 	<ul style="list-style-type: none"> - Populations locales directement affectées par contamination des eaux (souterraines, de surface) et des sols - La situation pousse certains villageois à manifester : par exemple en mai 2018 à Yulin, dans la province du Guangxi, contre la pollution générée par l'exploitation de TR - Les TR lourdes sont moins sujettes à des problèmes de radioactivité

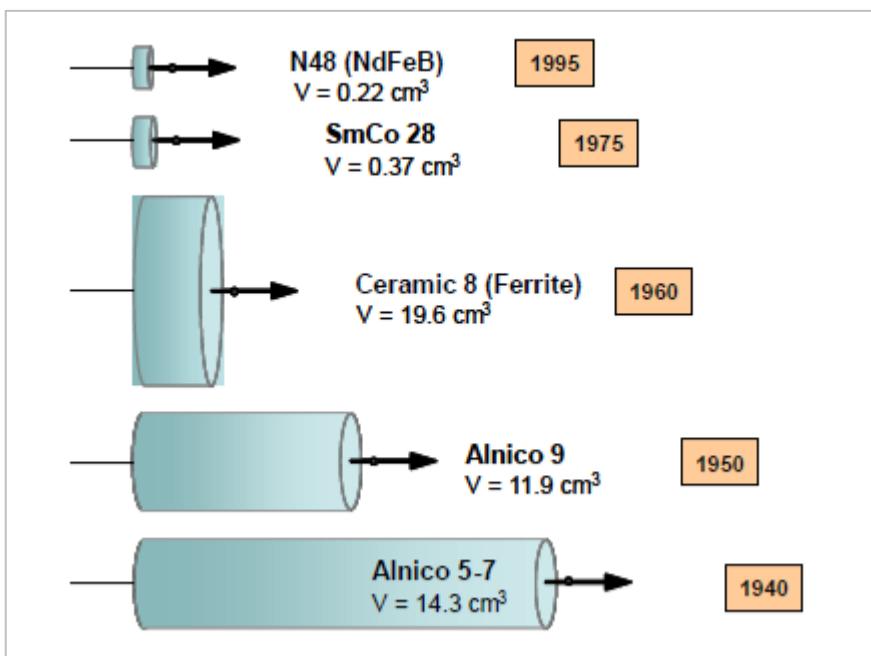
Source : BRGM

fort moyen faible

C. Les aimants permanents

Les aimants NdFeB, sont les aimants permanents dont les performances sont les plus importantes (figure 42).

Figure 42 : comparaison à performances magnétiques équivalentes de différents types d'aimants permanents



Tailles (V = volume) et formes optimales relatives des aimants permanents pour générer un champ de 0,1 tesla à 0,5mm d'une face polaire de l'aimant, selon les technologies et leurs dates de mise au point.
Adapté d'après Arnold Magnetic Technologies

Source : Arnold Magnetic Technologies, BRGM

Ainsi, pour une performance donnée, à savoir un même champ magnétique fourni aux pôles, un aimant NdFeB est 89 fois plus petit qu'un aimant en ferrite du type Ceramic 8.

Deux grands types d'aimants NdFeB existent : les aimants frittés, qui représentent environ 90 % de la production, et les plasto-aimants ou aimants liés (par des résines thermodurcissables ou thermoplastiques), qui sont plus rarement utilisés. L'entreprise française Arelec est un des rares producteurs d'aimants liés. La société germano-slovène Kolektor est une autre entreprise européenne fabriquant ces aimants.

Les aimants frittés sont produits à partir des oxydes, d'abord réduits pour obtenir des métaux de terres rares. Ces métaux sont ensuite broyés et mélangés avec du fer et du bore. La poudre ainsi obtenue est ensuite comprimée à la forme et portée à haute température sous vide⁴⁵ pour obtenir l'alliage de NdFeB qui constituera l'aimant. Cet alliage est ensuite usiné pour obtenir la forme d'aimant souhaitée. Les aimants sont ensuite galvanisés pour les protéger de l'oxydation. En effet, l'alliage de NdFeB s'oxyde rapidement et doit être recouvert d'une fine couche protectrice qui peut être composée de différents métaux, notamment de nickel, de cuivre, de zinc, de chrome, etc. Pour finir, le produit doit être aimanté, par un fort champ magnétique, de l'ordre de cinq tesla. Les procédés de production provoquent environ 20 % de pertes en matières, mais il est possible d'utiliser ces déchets en les réduisant et en les réintégrant dans la boucle de production.

⁴⁵ Étape dite de frittage qui va consolider et densifier la poudre, le vide est nécessaire car certaines poudres métalliques de terres rares peuvent s'oxyder voire s'enflammer au contact de l'oxygène, selon leur taille et leur réactivité.

Les aimants permanents sont utilisés pour, outre la propulsion des véhicules électriques et la génération éolienne, un grand nombre d'applications qui inclut : l'aérospatiale et la défense (boussoles, systèmes de radar, de guidage, etc.), les démarreurs, les systèmes de freinage et les moteurs électriques, les accessoires des véhicules électriques (lève-vitres, essuie-glaces, pompes d'injection, systèmes audio, etc.), les équipements électriques et électroniques (de l'électroménager aux ordinateurs, pour les robots industriels, etc.).

Le marché total des aimants permanents est en volume de l'ordre de 160 kt/an, soit le double de la production de 2010. En valeur ce marché représente de l'ordre de 20 Md\$ de chiffre d'affaires annuel. La production d'aimants permanents se répartit en :

- 155 kt d'aimants NdFeB frittés ;
- 7 kt d'aimants NdFeB liés ;
- 2 kt d'aimants samarium-cobalt (SmCo).

La Chine produit environ 85 % des aimants NdFeB frittés et 65 % des aimants SmCo. Il existerait plus de 130 sites de production en Chine pour les aimants NdFeB frittés, surtout concentrés autour de Pékin, Ningbo et Shanxi. Ils représentent une capacité totale de production de l'ordre de 130 kt/an. Le Japon produit entre 10 et 12 % des aimants NdFeB frittés et liés.

Le principal fabricant européen d'aimants permanents à terres rares frittés est l'entreprise allemande Vacuumschmelze, dont une partie de l'actionnariat et des partenariats sont chinois. Vacuumschmelze réalise environ 330 M€ de chiffre d'affaires, dont environ 50 % sont directement liés aux secteurs automobile et énergétique. Les 4 500 employés de l'entreprise sont répartis à 50 % entre l'Asie (en Malaisie et en Chine) et l'Europe (principalement en Allemagne et en Slovaquie). L'entreprise produit environ 1 kt d'aimants permanents par an et développe également des procédés de recyclage. Les autres entreprises européennes qui fabriquent des aimants permanents sont Magneti Ljubljana, en Slovénie et Magnet Schramberg, en Allemagne.

Pour les éoliennes, les aimants permanents sont des aimants frittés pouvant atteindre 1 m de long, dont le maniement est difficile et dangereux. Le transport se fait principalement en train et par bateau, avec des emballages spéciaux. Ce transport est parfois difficile en raison des interactions magnétiques avec l'environnement (avions, radios, etc.), il semble donc intéressant d'avoir les sites de production proches des sites d'exploitation éolien ou de simplifier les procédés de montage/construction. L'alternative est de livrer les aimants non aimantés que le client aimante après le montage, mais cela est difficile pour les grosses génératrices. Dans ce cas il faut des machines spéciales pour monter les blocs aimantés.

Pour les moteurs électriques, les aimants permanents sont également frittés, mais de formes et dimensions moins standardisées pour convenir aux différentes architectures des rotors et stators. Ces aimants sont de plus petite taille et ne posent a priori pas de difficultés pour leur transport ou leur stockage. Les sous-traitants automobiles européens, tels que Valéo, Bosch, Continental et Siemens se fournissent principalement auprès d'entreprises chinoises, qui fournissent leurs usines implantées en Asie.

D. L'éolien

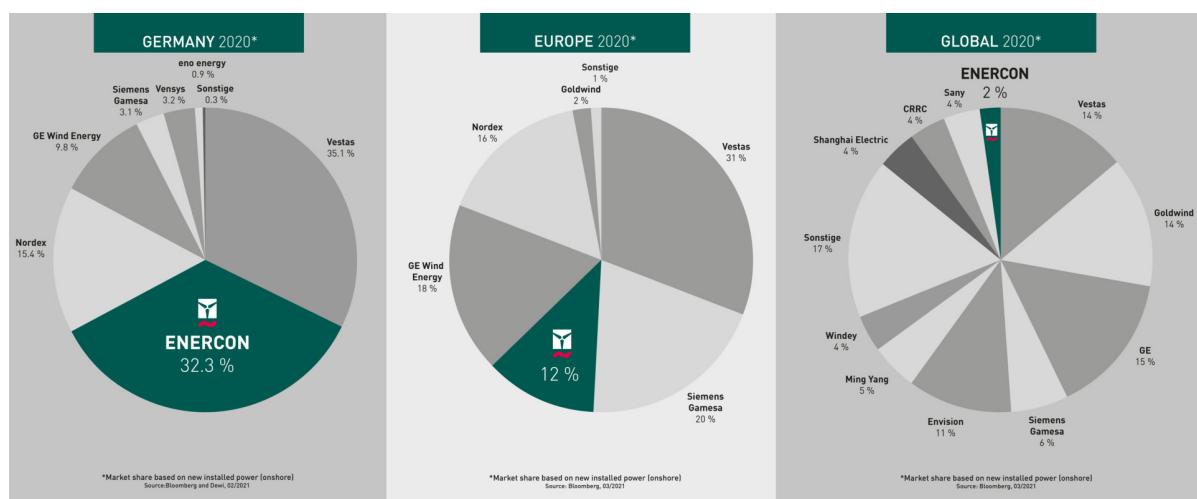
1. L'INDUSTRIE DE L'ÉOLIEN

a) Les producteurs de turbines : l'émergence d'acteurs chinois sur les marchés occidentaux

Les turbines sont l'élément crucial de l'éolien, puisque qu'elles sont nécessaires à la production d'énergie.

Une tendance en cours depuis les débuts de l'éolien, dans les années 2000, est à la consolidation des différents producteurs de turbines, ce qui aboutit aujourd'hui à un oligopole tant pour l'éolien terrestre qu'en mer. Les parts de marché sur différentes échelles géographiques sont décrites *infra* (figure 43).

Figure 43 : parts de marché des différents producteurs de turbines éoliennes, en Allemagne, en Europe et dans le monde



Sources : site Enercon⁴⁶ ; Bloomberg ; Wind Europe

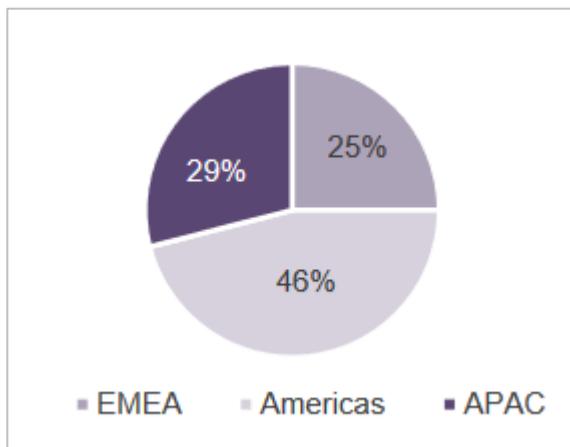
Les marchés des turbiniers apparaissent historiquement comme très segmentés géographiquement entre les trois grandes zones de l'éolien à l'échelle mondiale (Asie, Amérique du Nord et Europe, voir partie II.A.1). La plupart des turbiniers se sont d'abord développés sur leurs marchés locaux, en Europe pour Vestas (Danemark), Nordex (Allemagne), Siemens Gamesa (SGRE, Allemagne et Espagne) et Enercon (Allemagne), en Amérique du Nord pour General Electric (GE, États-Unis), en Chine pour les entreprises chinoises Sonstige, Envision et Ming Yang notamment.

Néanmoins, par les jeux de fusion-acquisition qui ont consolidé le secteur, plusieurs⁴⁷ de ces groupes ont maintenant des positions importantes sur les marchés européens et nord-américains, comme Vestas, GE, ou Siemens Gamesa, qui a même réalisé en 2021 plus d'activités en Amérique du Nord qu'en Europe pour ses turbines terrestres (figure 44).

⁴⁶ www.enercon.de/fr/entreprise/part-de-marche/

⁴⁷ Les données sont issues des derniers rapports d'activité des entreprises, pour l'année 2020 ou 2021.

Figure 44 : part des ventes de turbines onshore de SGRE au 3^e trimestre 2021 en puissance électrique



Source : Q3 activity report – SGRE

Le marché des fournisseurs de turbines pour l'éolien en mer est encore plus concentré, puisqu'en Europe, Vestas et SGRE ont fourni plus de 90 %⁴⁸ des nouvelles installations offshore en 2020. GE devrait cependant gagner des parts de marché avec son nouveau modèle Haliade-X, qui est actuellement la plus puissante éolienne disponible pour l'éolien en mer.

Plusieurs risques peuvent être identifiés à partir de ces évolutions de marché. D'une part, la production de turbines est très capitaliste, les producteurs ont besoin de délivrer des volumes importants pour rentabiliser d'importants investissements, ce qui explique la tendance à la concentration. Cette tendance est également soutenue par les processus d'appels d'offres qui permettent l'octroi de nouveaux projets éoliens aux candidats les mieux-disants à partir de critères économiques, ce qui pousse les turbiniers à proposer des prix bas, qui ne sont atteints que grâce à d'importantes économies d'échelle.

Les investissements des turbiniers continuent par ailleurs, tant au niveau de la R&D qu'avec la création de nouvelles usines pour répondre à la demande croissante du marché (voir partie II.A.1). De fait, les carnets de commande des principaux turbiniers occidentaux (voir tableau 4), même réduits aux seules commandes de turbines (c'est-à-dire sans compter les ventes de services qui incluent les installations et la maintenance) permettent d'anticiper une croissance dans les prochaines années de leurs chiffres d'affaires.

Tableau 4 : comparaison des données financières des principaux fournisseurs de turbines éoliennes cotés en bourse

Consortium	CA (turbines + services) 2019	CA (turbines + services) 2020	Résultat opérationnel 2019/marge opérationnelle	Résultat opérationnel 2020/marge opérationnelle	Free Cash-Flow 2019	Free Cash-Flow 2020	Carnet de commande (turbines) à fin 2020
GE ⁴⁹	15 337 m\$	15 666 m\$	(666) m\$/(-4) %	(715) m\$/(-5) %	(980) m\$	(641) m\$	≈ 17 Md\$
Nordex	3 285 m€	4 651 m€	(20) m€/(0,1) %	(62) m€/(1) %	(516) m€	(126) m€	5,3 Md€
SGRE	10 227 m€	9 483 m€	190 m€ / 2 %	(1 019) m€/(-10 %)	309 m€	(86) m€	15,1 Md€
Vestas	12 147 m€	14 819 m€	1 004 m€/8 %	750 m€/5 %	94 m€	84 m€	19 Md€

Sources : rapports annuels des sociétés

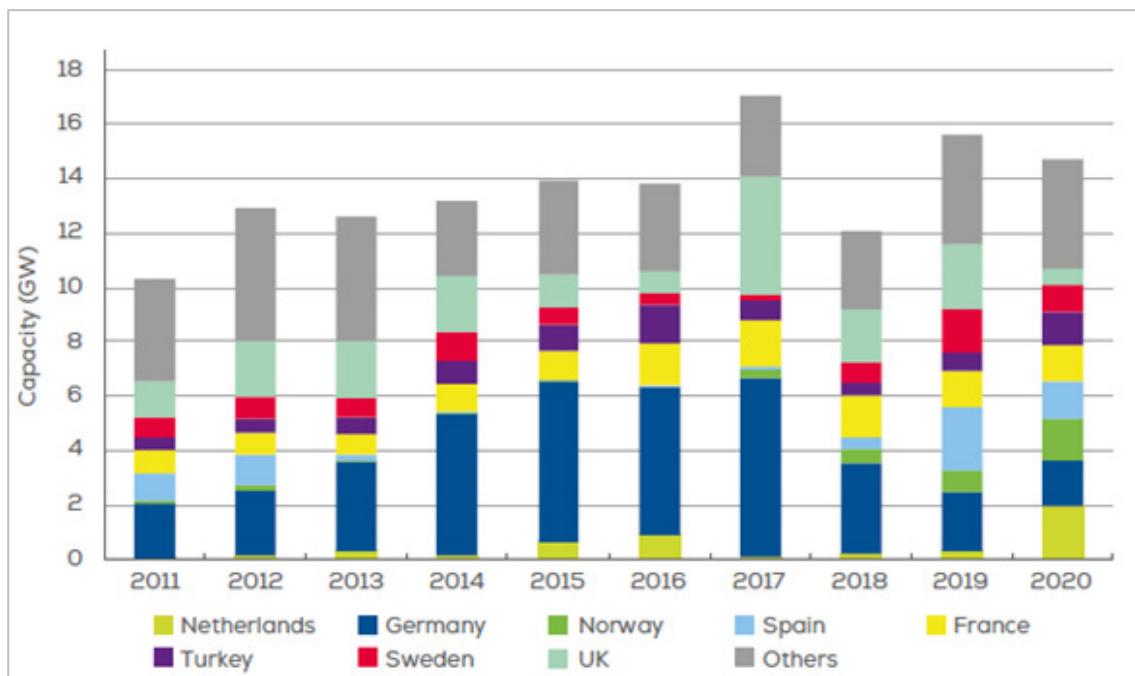
⁴⁸ Selon le rapport annuel de Wind Europe : <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/offshore-wind-in-europe-key-trends-and-statistics-2020/>

⁴⁹ Données pour la division Renewables de GE, dont le CA est composé à environ 75 % par l'éolien et à 80 % par la fourniture de turbines.

À l'exception de Vestas, les marges opérationnelles de ces groupes sont très faibles, voire négatives. Par ailleurs, les *free cash-flows* (FCF), qui correspondent à la somme des flux de trésorerie des activités d'exploitation et des flux de trésorerie d'investissement sont également faibles.

Ces entreprises sont donc proches de leurs points morts opérationnels (leurs seuils de rentabilité) et elles vont donc être particulièrement sensibles à l'évolution de l'activité dans le secteur. Elles pourraient être ainsi fragilisées en cas de retards dans le déploiement de l'éolien et de ralentissement des installations. De fait, les producteurs de turbines opérant sur le marché allemand ont connu une crise au cours des années 2018 et 2019, lorsque les installations annuelles d'éoliennes terrestres sont passées de 6,6 GW en 2017 à moitié moins en 2018 (figure 45).

Figure 45 : distribution par pays des nouvelles installations de puissance éolienne en Europe, de 2011 à 2020



Source : Wind Europe 2020 Statistics

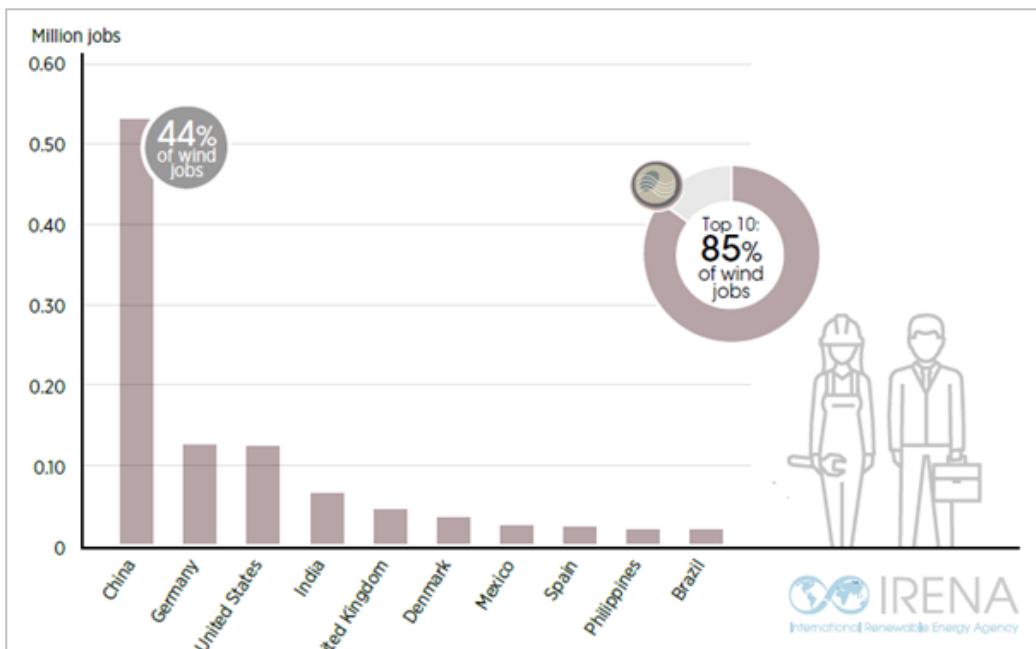
Cette forte réduction des débouchés des entreprises, malgré un marché de l'éolien qui s'est repris au niveau européen dès 2019, a provoqué la faillite du turbinier Senvion⁵⁰, une plus forte compétition entre les turbiniers qui s'est traduite par une contraction des marges des industriels, et environ 40 000 emplois perdus en 2018 et 2019, selon le cabinet de conseil VDMA Power Systems.

Au-delà de la sensibilité des turbiniers aux cycles d'installations d'éoliennes, les industriels chinois pourraient constituer une menace à moyen terme pour les entreprises européennes. En effet, si à l'heure actuelle ceux-ci n'occupent que des positions de marché marginales en Occident (figure 46), le marché intérieur chinois a permis aux acteurs locaux de développer leur expertise et de construire d'importantes capacités de production. En 2020, la Chine comptait pour 56 % de la capacité éolienne installée au cours de l'année dans le monde, selon le GWEC Global Wind Report 2021. Cette part des nouvelles installations en 2020 est du même ordre de grandeur pour l'éolien sur terre et en mer. Le cabinet de conseil Wood Mackenzie⁵¹ note qu'en 2020, 10 des 15 plus importants turbiniers mondiaux sont chinois, même si les cinq autres turbiniers ont une part de marché de 92 % hors de Chine. Ainsi, 44 % des emplois liés à l'éolien dans le monde sont déjà situés en Chine.

⁵⁰ www.reuters.com/article/us-germany-senvion-idUSKCN1RL271

⁵¹ www.woodmac.com/news/opinion/global-wind-turbine-market-state-of-play/

Figure 46 : énergies renouvelables et emplois, bilan annuel 2020



Source : IRENA

L'Ifpen estime que d'un point de vue technologique, l'Europe est encore en avance sur le marché de l'éolien mais une grande vigilance s'impose. Les turbiniers chinois se sont déjà positionnés sur de nouvelles solutions technologiques, avant leurs concurrents européens.

Ming Yang Smart Energy Group Limited, l'un des principaux turbiniers chinois, très présent sur le marché *offshore*, a ainsi récemment annoncé la plus grande éolienne *offshore* du monde, d'une puissance de 16 MW et munie de pales de 118 m de long. Les premiers tests auront lieu au cours de l'année 2022, et l'industrialisation est annoncée pour le premier semestre 2024. Cette turbine serait plus puissante que la Haliade-X de GE, de 12 MW, en phase d'industrialisation, que la SG-14-222-DD de SGRE, de 14 MW prévue pour 2024 également ou la V236-15.0 MW de Vestas, de 15 MW.

Les turbiniers chinois seront donc tôt ou tard compétitifs à l'export, mais ils devront satisfaire aux certifications demandées par les exploitants et financeurs occidentaux pour pouvoir s'implanter en Europe et en Amérique du Nord.

Cette menace des turbiniers chinois pourrait également s'appuyer sur des développeurs et opérateurs de parcs éoliens contrôlés par des entreprises chinoises. EDP Renewables (EDPR) par exemple, le 4^e opérateur éolien du monde est largement contrôlé par China Three Gorges Group (CTG) et est très présent en Europe. CTG a par ailleurs annoncé en juillet 2021⁵² avoir installé sa première éolienne flottante, résistante aux typhons, nommée San Xia Yin Ling Hao. Le flotteur est conçu par CTG, et la turbine fournie par MingYang.

Le turbinier MingYang a par ailleurs obtenu son premier contrat de fourniture d'éoliennes *offshore* en Europe en 2021, pour les dix turbines du projet de Taranto en Italie.

Néanmoins, la situation de la filière éolienne pourrait différer de celle du photovoltaïque (*voir le rapport d'étape n°1*), puisque que l'éolien en mer, qui est le principal relais de croissance de l'industrie éolienne, est une activité de projet qui nécessite des adaptations spécifiques et limite la standardisation et la production de masse. La performance des produits et la démonstration de leur viabilité économique sont autant déterminants que le prix des turbines choisies par les porteurs de projets. Une concentration de la production de turbines en Chine est donc moins probable⁵³, néanmoins ce risque doit être pris en compte par les décideurs publics européens et français.

⁵² www.4coffshore.com/news/china27s-first-floating-turbine-installed-nid23856.html

⁵³ Pour plus d'informations à ce sujet, le rapport de l'Ademe Éolien offshore : analyse des potentiels industriels et économiques en France, paru en décembre 2019.

Finalement, le risque lié à la dépendance des turbiniers européens aux aimants permanents importés de Chine est difficile à estimer. L'entreprise POMA, filiale du groupe HTI et présente dans le domaine de l'éolien terrestre, cherche à développer en interne une solution de recyclage des aimants permanents usagés. General Electric étudie la possibilité d'avoir recours à des technologies supraconductrices en substitution des machines à aimants permanents (*voir partie I.B.2*).

b) La chaîne logistique de l'éolien en mer

Les chaînes logistiques pour l'éolien *offshore* nécessitent une organisation particulière. En effet, outre les dimensions des machines, les installations ne peuvent se faire que lorsque les conditions de mer le permettent, ce qui implique de devoir concentrer les travaux à la fin du printemps et pendant l'été.

Ceci implique un besoin de souplesse de la chaîne des sous-traitants pour répondre aux besoins des donneurs d'ordres, qui doivent pouvoir disposer de suffisamment de composants au moment où l'installation est possible. Cette disponibilité des composants se prévoit plusieurs années à l'avance, tant pour anticiper la réservation des capacités de production que pour s'adapter au temps de réalisation des projets éoliens en mer.

En particulier pour l'éolien flottant, il existe un besoin d'espace afin de recevoir plusieurs flotteurs, pour leur assemblage et ne pas prendre le risque de travailler en flux tendus. Cela peut constituer un problème administratif, car la place peut être disponible mais être préemptée préventivement pour d'autres usages. Le développement du port de Port-la-Nouvelle est jugé très positif par la profession mais présente des limites en matière d'espace de stockage, moins de 20 hectares de disponibles et entre 20 et 25 hectares de disponibles à Brest.

À court terme, un goulot d'étranglement sur les fondations monopiles pourrait se matérialiser. Ces fondations sont les plus courantes pour l'éolien posé en mer. Cette tension serait causée par le démarrage de la filière *offshore* aux États-Unis. En effet, à l'heure actuelle, il n'y a ni bateaux, ni chantiers, ni production de monopiles en Amérique du Nord. Il pourrait donc y avoir une pénurie de bateaux capables de procéder aux installations. Ce goulot d'étranglement pourrait se faire sentir à horizon 2024-2025. Cette tension pourrait se traduire par un décalage dans le temps, et les acteurs asiatiques semblent en mesure d'investir et fabriquer rapidement des jackups (navires capables de prendre appui sur le fond marin pour se stabiliser le temps de l'installation de l'éolienne et des fondations) et des bateaux flottants (équipés de propulseurs (*thrusters*), hélices orientables sous la coque, qui permettent également la stabilisation du bateau) pour répondre à la demande. Mais le plus probable serait que le manque de bateaux d'installation disponibles se traduise par un décalage dans le temps des installations, plus que par le risque d'arrivée d'acteurs asiatiques sur les marchés européens.

Le déploiement de l'éolien flottant va aussi entraîner une hausse de la demande pour des navires à *thrusters*, plutôt que des jackups qui ne peuvent opérer par grands fonds. Plusieurs acteurs, comme Saipem et Subsea7 sont déjà équipés de navires à *thrusters*.

c) Les pales

Les pales des éoliennes sont composées de résine époxy, associée à des fibres de verre et/ou de carbone (*voir partie I.B.2*). Ces composants ne sont pas étudiés dans le présent rapport qui est consacré aux ressources minérales. Néanmoins, plusieurs institutions auditionnées dans le cadre de ce rapport ont signalé un risque de tension au cours des prochaines années sur la fibre de carbone.

La production se fait actuellement essentiellement au Japon et aux États-Unis. La production mondiale de fibre de carbone est de 150 kt/an mais la demande augmente, notamment en raison de la croissance des autres industries utilisatrices. Aussi, les capacités de production pourraient ne plus suffire à l'horizon 2025.

Par ailleurs, le procédé pour obtenir la fibre de carbone est très énergivore. La France aurait donc une carte à jouer en raison de son faible coût de l'énergie, relativement aux autres pays. Les projets actuels de R&D en France visent par ailleurs à réduire les impacts environnementaux de la production.

Il n'existe qu'un seul fabricant de fibres de carbone en Europe. Des projets sont en cours par ailleurs pour industrialiser le recyclage des pales éoliennes, qui est une attente forte, souvent mentionnée dans les débats publics relatifs à l'éolien. Zebra, un de ces projets, est notamment porté par Arkema et l'IRT Jules Verne⁵⁴. Ce projet présente l'avantage de permettre une réutilisation des fibres issues des pales recyclées pour de nouvelles pales d'éoliennes ou d'autres applications à haute valeur ajoutée. Au contraire, plusieurs fabricants de turbines, comme SGRE et Vestas, se sont engagés à utiliser des pales recyclables au cours des prochaines années, mais leurs projets visent à fournir en fibres recyclées d'autres marchés que l'éolien.

L'entreprise française Extracthiv se positionne également sur des procédés de recyclages de composites qui seront utilisables pour les pales d'éoliennes.

2. LES RISQUES ENVIRONNEMENTAUX ET SOCIAUX DE L'ÉOLIEN

Comme les autres technologies de la transition bas-carbone, par exemple le photovoltaïque (*rapport d'étape n°1*) et les réseaux électriques (*rapport d'étape n°2*), l'installation d'unités de production éolienne engendre des impacts sur l'environnement et les populations qu'il faut **évaluer et connaître** pour les **réduire et les éviter** au maximum, objectifs des études d'impacts inhérentes à tout projet d'aménagement et d'infrastructures et dont l'Autorité environnementale est garante.

C'est pourquoi nous étudions maintenant les risques environnementaux et sociaux de l'éolien.

a) Les impacts environnementaux de l'éolien sur la biodiversité

Le deuxième volume du sixième rapport du GIEC, paru en février 2022, indique que si l'augmentation de la température terrestre est de 2°C, 18% des espèces auront un risque élevé d'extinction et près de 50% si elle augmente de 4°C. Déjà en 2015, l'IUCN⁵⁵ estimait que 35 % des oiseaux, 52 % des amphibiens et 71 % des récifs coralliens seraient particulièrement impactés par le changement climatique. Le développement des énergies renouvelables est indéniablement un des enjeux majeurs pour lutter contre le changement et ses effets néfastes sur les écosystèmes.

Néanmoins la production d'énergie renouvelable peut également être source d'impacts notamment sur la biodiversité, les impacts les plus étudiés et les plus traités dans la majorité des EnR et en particulier dans le cas de l'énergie éolienne⁵⁶.

Quels sont ces potentiels impacts ?

D'après le rapport de 2017⁵⁷ de la fondation pour la recherche sur la biodiversité (FRB), les installations d'énergie renouvelable peuvent avoir des effets à la fois positifs et négatifs sur la biodiversité, mais les impacts négatifs, sont encore insuffisamment analysés et connus, notamment dans le cas de l'éolien.

La FRB estime en effet que ces impacts négatifs potentiels devraient être mieux pris en compte lors de l'élaboration des politiques en matière d'énergies renouvelables et fassent l'objet d'études de long terme (y compris une fois les éoliennes installées c'est-à-dire au-delà des études d'impacts réalisées en amont de tout projet d'aménagement), afin notamment d'identifier de potentiels impacts cumulés des différents parcs. Ceci est d'autant plus important que ces filières sont amenées à être déployées à grande échelle pour permettre une transition bas-carbone rapide et indispensable (par exemple : multiplication par cinq du parc éolien offshore européen en 2030 et par 25 en 2050⁵⁸).

Il convient néanmoins de rappeler que chaque parc, sur terre ou en mer, fait l'objet d'une étude d'impact qui doit non seulement quantifier l'impact de celui-ci sur la biodiversité et le paysage mais également justifier de la zone choisie comme une zone de moindre impact (« éviter ») et peut également proposer des mesures de réduction (« réduire ») et de compensation

⁵⁴ www.irt-jules-verne.fr/actualites/lancement-du-projet-zebra-premiere-pale-eolienne-100-recyclable/

⁵⁵ Impacts du changement climatique sur les espèces, IUCN -2015.

⁵⁶ État de l'art des impacts des énergies renouvelables sur la biodiversité, les sols et les paysages, et des moyens d'évaluation de ces impacts, ADEME 2020.

⁵⁷ FRB, Énergie renouvelable et biodiversité : les implications pour parvenir à une économie verte - 2017

⁵⁸ Conseil national de la protection de la nature, Autosaisine sur le développement de l'énergie offshore en France et ses impacts sur la biodiversité, le patrimoine naturel et les paysages, 6 juillet 2021.

(« compenser ») des effets indésirables potentiels du parc (bridage des pâles, dispositifs d'effarouchement, etc.). Ces éléments fondent la décision du préfet d'autoriser ou non le parc qui peut choisir d'imposer des mesures compensatoires ou spécifiques supplémentaires.

L'ÉOLIEN TERRESTRE

Effets négatifs

Selon le rapport de la FRB, les pertes d'habitats liées à l'implantation des parcs éoliens n'induisent que des effets minimes sur les populations d'oiseaux, y compris sur les oiseaux hivernant dans les zones agricoles.

En revanche, les impacts négatifs sur les espèces les plus clairement identifiés sont :

- la collision d'oiseaux et de chauves-souris avec des éoliennes (à proximité des voies de passage fortement utilisées - y compris les routes migratoires - ou dans des zones qui sont utilisées pour l'alimentation ou pour le repos, qu'il s'agisse d'espèces locales ou migratrices) ;
- des traumatismes internes (barotraumatismes) chez les chauves-souris associés à des réductions soudaines de pression de l'air à proximité des pales ;
- la perturbation des voies migratoires pour certaines espèces d'oiseaux et de chauves-souris.

Selon la FRB, on estime que 234 000 oiseaux sont tués annuellement par des éoliennes aux États-Unis. La ligue de protection des oiseaux (LPO) estime, quant à elle, en 2017⁵⁹, que le nombre d'oiseaux tués par an en France par les éoliennes (environ 8 500 mâts à l'époque) est de 60 000, soit en moyenne 7 oiseaux tués par éolienne et par an. Pour la LPO, ce chiffre est faible au regard du nombre d'oiseaux tués par les chats : 75 millions par an en moyenne, mais il n'est pas négligeable rapporté au nombre d'espèces protégées impactées « 81 % des cadavres retrouvés appartiennent à des espèces protégées ou présentant une préoccupation majeure quant à leur état de conservation ».

Les chauves-souris souffrent proportionnellement plus que les oiseaux, l'impact étant de l'ordre de dizaines de morts par turbine et par année.

Des études de long terme sont nécessaires à une évaluation plus précise des différents impacts du déploiement de l'éolien terrestre.

Effets positifs

Selon le rapport de la FRB, « si les éoliennes peuvent avoir des impacts négatifs sur les oiseaux et les chauves-souris, elles peuvent avoir un effet positif pour certains animaux terrestres, tels que les tortues, en raison de la réduction de prédateurs »⁶⁰.

L'ÉOLIEN EN MER

Effets négatifs

D'après le conseil national de la protection de la nature (CNPN)⁶¹, qui rejoint les conclusions du rapport de la FRB, les impacts potentiels sur la biodiversité représentés par le développement de l'éolien en mer en France pour l'horizon 2030 et 2050 peuvent être très importants sur :

- L'avifaune marine reproductrice, migratrice et hivernante provenant de l'Europe entière, sur les chauves-souris résidentes (qui s'alimentent en mer jusqu'à 20 km près des côtes) ou migratrices (qui traversent la mer du Nord), par collision avec les éoliennes ou par perte d'habitat (par évitement des parcs). En mer, les risques de collision sont amplifiés par rapport à la terre en raison des migrations de nuit et des turbulences des éoliennes qui créent des nappes de brouillard, ces deux facteurs réduisant la visibilité des oiseaux. De

⁵⁹ LPO, Le parc éolien français et ses impacts sur l'avifaune, 2007

⁶⁰ Comme autre exemple, Thaker et al. (2018) ont par exemple démontré que dans les Ghâts (chaîne de montagne en Inde) l'abondance des rapaces et leur fréquence de tentatives de prédation sur les proies terrestres étaient presque quatre fois plus faibles dans les parcs éoliens. Ainsi l'abondance du « lézard à gorge en éventail » endémique Sarada superba, était significativement plus élevée dans les sites dotés d'éoliennes.

⁶¹ CNPN, Autosaisine sur le développement de l'énergie offshore en France et ses impacts sur la biodiversité, le patrimoine naturel et les paysages, 6 juillet 2021,

plus, par mauvais temps, les oiseaux en mer ont tendance à voler à basse altitude et à chercher des refuges, les rapprochant de la zone de danger des parcs marins éoliens ;

- Les mammifères marins par perte partielle d'habitats ;
- Les habitats marins et les espèces les composant, notamment les poissons, les crustacés et les mollusques par modifications physiques, hydrologiques et chimiques.

La FRB recense plus précisément les impacts potentiels suivants :

- la perte ou le changement d'habitats associés à la mise en place des fondations des installations ancrées dans le fond marin, la modification des processus hydrodynamiques et de sédimentation ;
- la pollution électromagnétique associée aux câbles sous-marins, et chimique provenant de lubrifiants et de peintures toxiques ;
- le changement de composition des communautés de poissons benthiques en raison de pertes d'habitats ;
- la perturbation des déplacements et de l'alimentation des espèces locales et migratrices.

Pour le CNPN, dans son autosaisine du 6 juillet 2021, les connaissances sur ces impacts négatifs potentiels restent encore très partielles. Des études sur le long terme (sur la construction des parcs éoliens, leur installation et leur maintenance, leur fin de vie) sont nécessaires pour mieux appréhender les particularités des trois façades maritimes françaises concernées par le déploiement des éoliennes en mer. L'observatoire national de l'éolien en mer, instauré en août 2021, prévoit de mener à partir de 2022, des études concernant notamment les impacts des éoliennes sur la biodiversité marine et la ressource halieutique.

Il est à noter par ailleurs que si les projets éoliens en mer français actuels se situent à proximité des côtes (10 à 20 km), les futurs parcs, flottants, pourraient se situer à plus de 40 km des côtes.

Effets positifs

Selon la FRB, certaines études suggèrent que les énergies marines renouvelables auraient des effets positifs par :

- la protection de la biodiversité par la création de zones interdites d'accès aux activités de pêche et de transport ;
- les abris pour certaines espèces notamment autour des parcs éoliens marins.

b) Les autres impacts environnementaux de l'éolien : ACV de l'éolien

Dans son étude de 2015⁶², l'Ademe a mené une analyse de cycle de vie (ACV) d'une installation éolienne incluant les étapes suivantes :

- fabrication des composants du système ;
- installation du système éolien ;
- utilisation ;
- maintenance ;
- désinstallation, traitement en fin de vie.

Les résultats de cette étude sont présentés ci-dessous et résument les impacts cumulés de chaque étape de la vie d'une installation éolienne, puis les impacts affectés à chaque phase du projet éolien.

L'ÉOLIEN TERRESTRE

Toutes étapes du cycle de vie de l'éolienne confondues

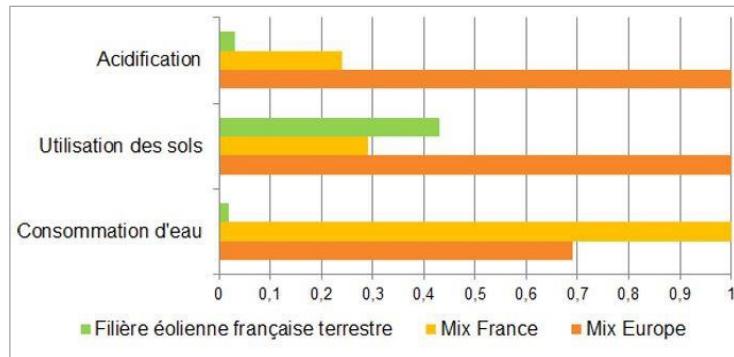
Impacts sur le changement climatique : le taux d'émission du parc français est de 12 gCO₂eq/kWh, un taux d'émission plus faible que celui du mix français, estimé à 79 gCO₂/kWh (avec l'année de référence 2011).

⁶² Ademe, Impacts environnementaux de l'éolien français, 2015.

Impacts sur les sols, l'eau et l'air : en matière d'acidification, l'éolien est nettement moins impactant que le mix électrique français et européen (figure 47). En ce qui concerne l'utilisation des sols, l'impact d'une éolienne est plus important que pour le mix français⁶³ mais l'est moins que pour le mix électrique européen.

L'éolien est économique en eau en comparaison du mix énergétique français, qui mobilise notamment des ressources importantes en eau pour le refroidissement des centrales nucléaires.

Figure 47 : comparaison des impacts sur l'acidification, l'utilisation des sols et la consommation d'eau entre la filière éolienne terrestre française, le mix énergétique en France et le mix énergétique en Europe



Notes :

i) les valeurs données doivent se lire comme des valeurs relatives par rapport à une valeur de référence fixée à 1. Les impacts sont mesurés et comparés en considérant une production d'1 kWh d'électricité.

Exemple de lecture : les impacts d'1 kWh d'électricité produite avec le mix France sont environ égales à 30 % des impacts d'1 kWh d'électricité produite avec le mix Europe.

ii) L'acidification correspond à une augmentation de l'acidité des sols ou des cours d'eau ; l'utilisation des sols se réfère aux surfaces artificialisées ou imperméabilisées ; les consommations d'eau se réfèrent à la fois aux volumes consommés et à la baisse de fonctionnalité pour les utilisateurs.

Source : Ademe

L'impact sur l'air est caractérisé par des émissions de particules fines de 0,01 gPM2,5eq, plus faibles que le mix électrique français (0,023 gPM2,5eq, évalué pour l'année 2011).

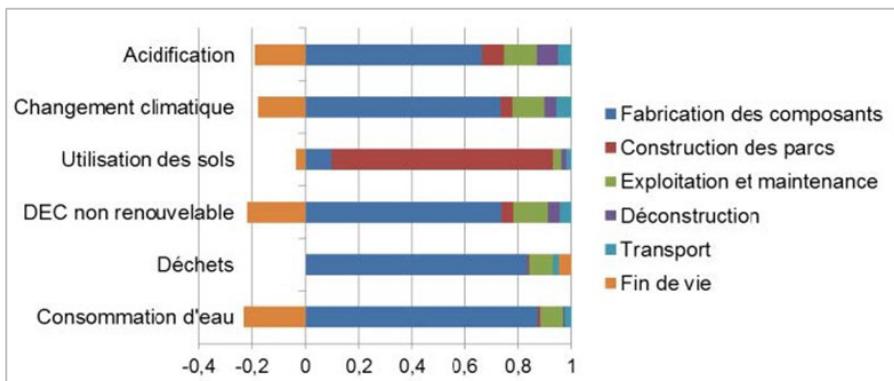
Par étapes de l'ACV

L'étape de fabrication est la plus importante pour tous les indicateurs hors l'utilisation des sols où c'est la construction des parcs éoliens qui a le plus d'impacts (figure 48).

La fabrication est une phase importante en raison de l'énergie provenant des ressources fossiles nécessaires à la fabrication des composants. Les matériaux les plus énergivores sont l'acier (nacelles et mâts) dont le recyclage va réduire l'impact, le béton et les différentes résines constitutives des pales et des nacelles avec notamment une grande partie de composites fibres de verres/époxy incinérées en fin de vie (des possibilités de recyclage émergent depuis l'étude, notamment proposées par Arkema, voir partie IV.B).

⁶³ Par manque de données l'impact a été majoré : on suppose que le sol ne retrouvera pas ses fonctions avant 40 ans et les chemins d'accès sont traités comme des routes et représentent ainsi 50 % de l'impact total.

Figure 48 : comparaison des impacts sur l'acidification, le changement climatique, l'utilisation des sols et la consommation d'eau des différentes étapes de la filière éolienne terrestre française



Notes :

les valeurs données sont relatives, pour 1 kWh d'électricité produite.

i) La longueur des barres à droite correspond à la part relative de chaque étape de la filière éolienne dans les impacts environnementaux négatifs, leur somme étant normalisée à 1. La barre à gauche du zéro (en orange) correspond à la compensation partielle de ces impacts grâce au recyclage.

ii) L'acidification correspond à une augmentation de l'acidité des sols ou des cours d'eau ; le changement climatique est mesuré en équivalent-CO₂ ; l'utilisation des sols se réfère aux surfaces artificialisées ou imperméabilisées ; la DEC (demande cumulée en énergie non renouvelable) englobe les sources d'énergie issues de ressources limitées ; les déchets se réfèrent aux flux de déchets incluant vrac, déchets dangereux et déchets radioactifs ; les consommations d'eau se réfèrent à la fois aux volumes consommés et à la baisse de fonctionnalité pour les utilisateurs.

Source : Ademe

L'ÉOLIEN EN MER

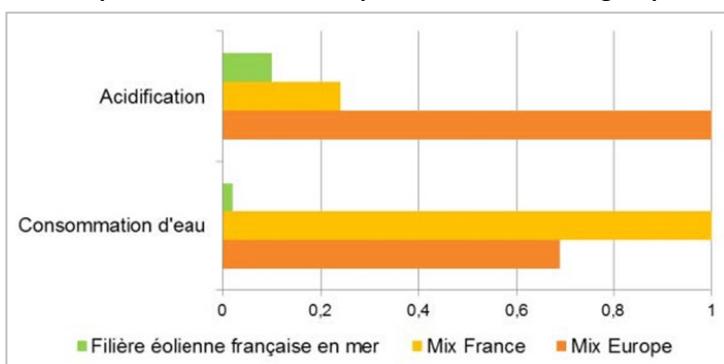
Toutes étapes de l'ACV confondues

Impacts sur le changement climatique : le taux d'émission du parc français est estimé à 14,8 gCO₂eq/kWh et reste faible par rapport à celui du mix français.

Impacts sur l'acidification et sur l'eau : l'indicateur d'acidification de l'éolien en mer est moins bon que celui de l'éolien terrestre, du fait de la combustion de carburant par les navires de construction et de maintenance ; il reste néanmoins plus faible que celui du mix électrique français et global (figure 49).

L'éolien en mer reste beaucoup plus économique en eau que le mix énergétique français et européen.

Figure 49 : comparaison des impacts sur l'acidification, l'utilisation des sols et la consommation d'eau entre la filière éolienne en mer française, le mix énergétique en France et le mix énergétique en Europe



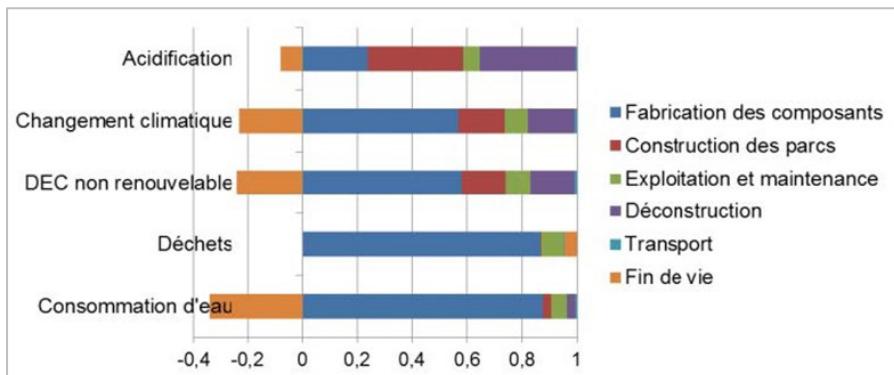
Note : pour la lecture et la définition des indicateurs, voir les notes de la figure 47.

Source : Ademe

Par étapes de l'ACV

Comme pour l'éolien terrestre, l'impact de la filière éolienne maritime provient en majeure partie de l'étape de fabrication et de l'énergie nécessaire à la construction des composants (figure 50). Cependant, les étapes de maintenance, de construction et déconstruction des parcs pèsent un peu plus que pour l'éolien terrestre dans les impacts, en raison des consommations de carburants des navires utilisés pour ces étapes.

Figure 50 : comparaison des impacts sur l'acidification, le changement climatique, l'utilisation des sols et la consommation d'eau des différentes étapes de la filière éolienne en mer française



Note : pour la lecture et la définition des indicateurs, voir les notes de la figure 48.

Source : Ademe

c) Les risques sociaux liés à l'éolien

LES IMPACTS PAYSAGERS

L'impact visuel d'un projet éolien sur le paysage⁶⁴, comme le montre la photo ci-dessous, est souvent le premier impact évoqué.

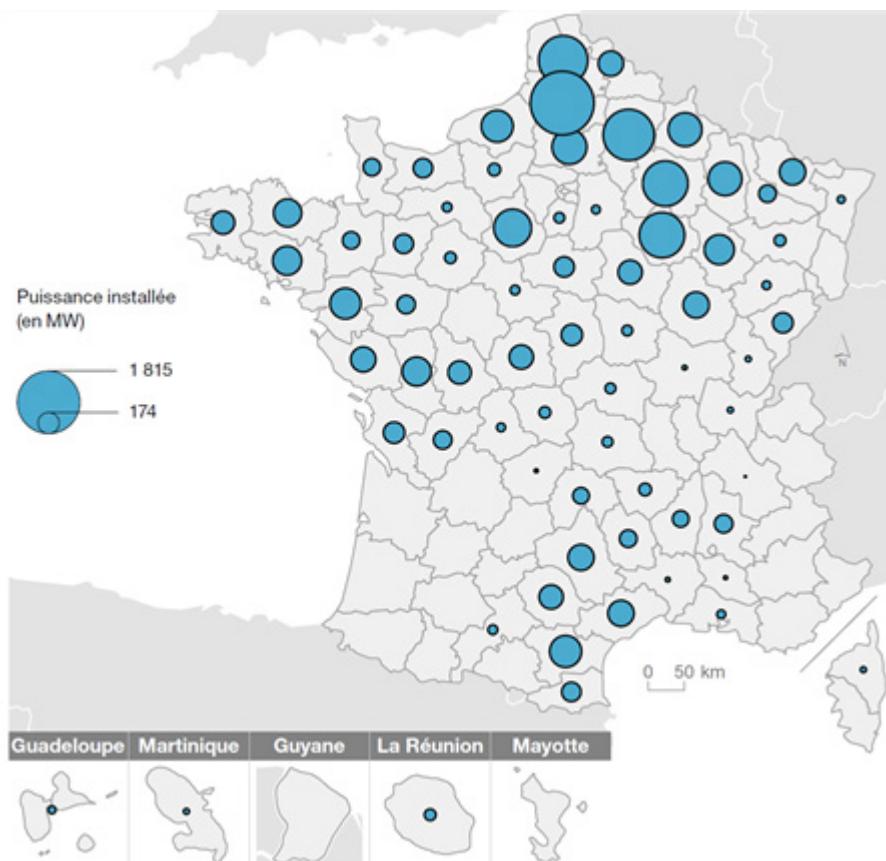


Source : photothèque Terra

Dans des conditions météorologiques standard, et hors particularités du relief, des éoliennes de plus de 100 mètres de hauteur peuvent en effet être visibles jusqu'à une distance de 30 km. C'est d'autant plus vrai sur les territoires qui ont connu un développement relativement plus important, comme en Hauts-de-France, 1^{re} région productrice d'énergie éolienne en France (figure 51).

⁶⁴ Selon la convention européenne du paysage reprise par l'article L. 350-1 du Code de l'environnement, « le paysage est une partie de territoire telle que perçue par les populations, dont le caractère résulte de l'action de facteurs naturels et/ou humains et de leurs interrelations ».

Figure 51 : répartition de la puissance éolienne installée en France, en MW et par département



Source : Chiffres clés des énergies renouvelables, édition 2022, Datalab, CGDD

Le CNPN, cité supra, relève également l'inquiétude de la Commission supérieure des sites, perspectives et paysages quant à « l'impact important de l'éolien en mer sur le paysage, et du fait que cet impact sera décuplé avec le déploiement massif de l'éolien en mer d'ici 2050 ».

L'argumentaire de « saturation visuelle » se développe de plus en plus devant les tribunaux pour fonder l'annulation d'une autorisation environnementale⁶⁵.

Les porteurs de projets doivent pourtant intégrer les enjeux patrimoniaux et paysagers lors de leur étude d'impact (à l'aide notamment de simulations visuelles) : le respect des lignes de fuites, la création de perspective, la cohérence et l'uniformité du parc sont autant de moyens permettant d'assurer une insertion paysagère satisfaisante et de limiter l'impact visuel des éoliennes sur les paysages.

L'ACCEPTABILITÉ SOCIALE DE L'ÉOLIEN

Au niveau national, les éoliennes bénéficient d'une image très positive, le baromètre IRSN 2021 sur la perception des risques et de la sécurité par les Français en atteste. Un parc éolien est, en effet, le mode de production d'énergie jugé le plus acceptable avec 41 % d'adhésion, contre 16 % pour une centrale nucléaire par exemple. De même le sondage Harris interactive, paru en janvier 2021 et commandé par le ministère de la Transition écologique et l'Ademe indique que 73 % des Français ont une bonne image de l'énergie éolienne.

Au niveau local, le développement de l'éolien (terrestre et offshore) de ces dernières années a suscité en revanche une opposition de plus en plus vive à ces projets, notamment dans certains territoires où l'éolien se concentre comme les Hauts-de-France.

⁶⁵ En décembre 2020, le tribunal administratif d'Amiens a donné gain de cause aux opposants d'un projet de parc éolien, pour le motif « d'encerclement ».

Actuellement, près de 70 % des autorisations délivrées font l'objet de recours devant les tribunaux administratifs. Selon la Fédération environnement durable, 1 600 actions en justice ont été lancées depuis le début de l'année 2021.

Béatrice Canel-Depitre⁶⁶, qui se base sur une large revue de littérature, ainsi que le CESE dans ses 23 préconisations⁶⁷ du 23 mars 2022 sur « l'acceptabilité des nouvelles infrastructures de la transition énergétique », estiment que le syndrome NIMBY (*Not In My BackYard*) ne suffit pas à expliquer ces oppositions. Parmi les autres explications figurent un sentiment d'injustice chez les riverains opposés aux éoliennes avec l'idée que d'autres en profitent (les urbains plus nombreux) quand eux ne récoltent que les inconvénients ou l'impact paysager sur le cadre de vie. Selon Béatrice Canel-Depitre, « les riverains développent un lien affectif et symbolique avec leur lieu de vie auquel se rajoute un sentiment d'encerclément du fait de la taille des éoliennes ». Comme nous l'avons vu précédemment, la notion de « saturation visuelle » fait désormais l'objet de motifs d'annulation de permis par les tribunaux administratifs.

Les tensions entre les acteurs locaux notamment les riverains, les promoteurs et les décideurs politiques génèrent des coûts, qui paralysent temporairement, voire parfois de façon permanente, l'avancement des projets. Une étude de la *London School of Economics and Political Science* de novembre 2021⁶⁸ estime entre 10 à 29 % de coûts supplémentaires pour les projets éoliens en raison des contestations locales. La conséquence directe est l'allongement des projets éoliens avec une durée moyenne de 7 à 9 ans en moyenne entre le lancement d'un projet et la mise en service d'un parc en France, contre 3 à 4 ans en Allemagne. En effet, les contentieux qui en découlent retardent souvent significativement le développement des projets⁶⁹, et sont source d'instabilité pour les porteurs de projets, ce qui se répercute sur les industriels de la filière.

L'acceptabilité sociale s'est donc imposée comme une condition incontournable pour le développement et l'exploitation d'un site, notamment pour de grands projets dont les projets d'éoliennes

Des solutions existent pour améliorer et préparer l'acceptabilité des projets éoliens, en particulier dans les régions où l'énergie éolienne est déjà fortement développée, un des leviers majeurs est la planification de son développement. L'échelle pertinente est au minimum celle de l'intercommunalité, demandée pour l'application de la séquence « éviter, réduire, compenser ». La planification à cette échelle, voire aux échelles supérieures (département, région, etc.) est nécessaire afin de limiter la saturation de certaines zones. Elle permet également d'orienter les porteurs de projets vers les zones qui seront considérées comme de moindre enjeu (paysager mais également environnemental) ce qui peut favoriser une meilleure acceptabilité des projets se développant. Cette planification permet donc une cohérence générale du développement de l'éolien à l'échelle du territoire. Au début de l'année 2021, il a d'ailleurs été demandé aux préfets de région de réaliser une cartographie des zones favorables au développement de l'éolien en région.

En plus d'une planification territoriale, l'amélioration de l'acceptabilité de l'éolien passe aussi par une bonne appropriation des projets par une pluralité d'acteurs locaux (riverains, élus locaux, associations de protection de l'environnement, professionnels concernés par les projets comme les pêcheurs par exemple pour un projet d'éolien offshore, etc.) et par l'ancrage local des sociétés de développement. Les développeurs en ont pleinement pris conscience. Ils consacrent de plus en plus de temps et d'énergie à renforcer la concertation (plateforme digitale pour déposer les avis, porte-à-porte pour expliquer les projets, etc.), à mener des actions de pédagogie (organisation de visites de parcs déjà en service par exemple). D'autres actions sont nécessaires comme la mobilisation de relais locaux autour de l'éolien, en associant une pluralité d'acteurs locaux aux décisions, l'élaboration d'un « nouveau contrat social territorial autour d'un modèle économique équilibré et équitable » recommandé par le CESE dont un exemple pourrait être d'adosser les coûts des chantiers d'exploitation à des emplois locaux.

⁶⁶ Béatrice Canel-Depitre, Le processus de construction de l'inacceptabilité sociale d'un projet de production électrique éolien en Haute Saintonge. *Annales des mines*, 2017/4, n°130, pages 15-31.

⁶⁷ http://www.lecese.fr/sites/default/files/pdf/Avis/2022/2022_05_infrastructures_transition_energetique.pdf

⁶⁸ The Economic Costs of NIMBYism: Evidence from Renewable Energy Projects, Stephen Jarvis, *London School of Economics and Political Science*, novembre 2021.

⁶⁹ Par exemple : www.journal-eolien.org/les-actus/herault-%20%20%80%20%A8la-justice-exige-un-demantlement/

Ces solutions illustrent également quelques-unes des dix mesures⁷⁰ que la ministre de la Transition écologique, Barbara Pompili, a présentées, en lien avec la filière de l'éolien, le 5 octobre 2021, pour un développement maîtrisé et responsable de l'éolien, dont :

- la mise en place d'un bonus de notation dans les appels d'offres pour les « parcs citoyens » : la part d'implication des citoyens compterait pour 2 à 5 % de leur note, au moment de la sélection des lauréats des appels d'offres ;
- la création d'un médiateur de l'éolien ;
- la création d'un « fonds de sauvegarde du patrimoine naturel et culturel » qui financerait la restauration et la protection du patrimoine des communes dotées de parcs éoliens terrestres ou en mer.

Points essentiels

- Les terres rares comprennent 17 éléments, qui sont répartis en terres rares légères (dont le néodyme et praséodyme) et lourdes (dont le dysprosium et le terbium).
- Les aimants permanents au néodyme-fer-bore (NdFeB) constituent le plus important usage en valeur des terres rares. Les terres rares contenues dans ces aimants sont le néodyme, le praséodyme, le dysprosium et le terbium. Les aimants NdFeB sont plus performants que leurs alternatives à volume et masse constants, ce qui explique leur usage dans des industries de pointe et dans lesquelles des contraintes en termes de taille et poids sont critiques.
- La chaîne de valeur des aimants permanents au NdFeB, peut être présentée en six étapes : la mine de terres rares, le raffinage (purification et séparation), la production de métaux de terres rares, la métallurgie d'alliages magnétiques et finalement la production d'aimants permanents.
- La Chine est le principal extracteur des terres rares, mais sa position de force est le raffinage avec 85 % des capacités mondiales. Elle est notamment en monopole pour le traitement des terres rares lourdes. L'aval de la chaîne de valeur des aimants permanents est également largement dominé par des acteurs chinois, qui cumulent 90 % de part de marché à chaque étape. Les acteurs chinois, peu nombreux, sont souvent des entreprises publiques intégrées verticalement, de la mine à la fabrication d'aimants permanents.
- Le marché des terres rares et de leurs composés dépend donc fortement de l'activité chinoise et des actions d'un nombre restreint d'acteurs. Les prix de marché sont peu transparents et les quotas imposés par les autorités chinoises contraignent l'extraction des terres rares dans leur pays.
- Si de nombreuses espèces minérales contiennent des terres rares, leur exploitation est rarement viable sur le plan économique. Les terres rares sont toujours associées dans les gisements, mais en proportions variables. L'extraction et le raffinage de terres rares lourdes sont aujourd'hui concentrés dans le sud de la Chine.
- De nombreux projets de mines et d'usines de raffinage de terres rares existent dans le monde. Les principaux acteurs occidentaux sont australiens et nord-américains et certains possèdent déjà des mines et usines en activité. En Europe, plusieurs gisements à fort potentiel sont identifiés en Scandinavie et au Groenland, mais leur exploitation n'interviendra pas avant plusieurs années au minimum. La France ne dispose pas quant à elle de potentiel minier pour les terres rares. La viabilité des projets occidentaux dépendra

⁷⁰ Ministère de la Transition écologique, Dix mesures pour un développement maîtrisé et responsable de l'éolien (2021).

des prix de marché des terres rares et de leurs éventuels coproduits, ainsi que des contraintes en matière d'impacts environnementaux et d'acceptabilité sociale.

- Les impacts environnementaux de l'extraction des terres rares ont principalement été étudiés en Chine. Les étapes de raffinage par hydrométallurgie sont les plus impactantes le long de la chaîne de valeur. L'exploitation de certains gisements entraîne le rejet de composés radioactifs et les déchets doivent être rigoureusement traités pour éviter des pollutions. Néanmoins, les impacts environnementaux totaux de l'extraction des terres rares restent limités par rapport aux impacts des autres industries minières, car les tonnages traités annuellement sont faibles.
- Le marché des producteurs de turbines éoliennes est très concentré et géographiquement segmenté, particulièrement pour l'éolien en mer. Pour répondre à la forte croissance, les turbiniers ont réalisé des investissements importants et de nombreuses opérations de consolidation ont eu lieu au cours des années 2010. Comme l'a montré la situation des turbiniers allemands lors des années 2018 et 2019, ces entreprises sont fragiles en cas de retournement de marché ou de retards dans la réalisation de nouveaux projets.
- La chaîne logistique de l'éolien en mer peut entraîner des retards dans le déploiement de l'éolien *offshore*. Les espaces nécessaires dans les zones portuaires ainsi que le nombre de bateaux d'installation pourraient constituer des goulets d'étranglement provisoires à l'horizon 2025. Une tension sur la production de polymères pour les pales est également possible à cette échéance.
- Des études de long terme sont nécessaires à une meilleure compréhension des impacts environnementaux de l'éolien. L'installation d'éoliennes a des impacts potentiellement négatifs sur la biodiversité, notamment sur l'avifaune (oiseaux et chauves-souris principalement), mais également des impacts potentiellement positifs, en réduisant l'exploitation de certaines zones et en éloignant certains prédateurs.
- Les analyses de cycle de vie concluent que l'éolien permet globalement une baisse des impacts environnementaux du système électrique français. Les principaux impacts sont liés à la fabrication des composants de l'éolien et à l'utilisation des sols.
- La puissance éolienne installée en France est inégalement répartie sur le territoire. La question de l'acceptabilité des nouveaux projets est déterminante pour la tenue des objectifs de déploiement de l'éolien en France et éviter des retards ou l'annulation de projets.

IV.

Les opportunités industrielles

Les chaînes de valeur étudiées dans ce rapport, des terres rares aux aimants permanents à destination de l'éolien et des moteurs électriques, présentent plusieurs caractéristiques communes :

- Une forte implication des pouvoirs publics, tant en soutien du déploiement des technologies bas-carbone, que par la régulation du secteur énergétique et automobile. Le soutien des pouvoirs publics est, et demeurera pour les prochaines années, déterminant pour le déploiement du véhicule électrique et de l'éolien ;
- L'industrie des aimants permanents, du véhicule électrique (à batterie et hybride) et de l'éolien est en très forte croissance. Celle-ci mobilise de très importants investissements, mais le poids économique de la production vendue est actuellement relativement faible et la part de la valeur ajoutée relative aux composants constituant les aimants permanents est assez faible. Par exemple, les véhicules électriques ne représentaient que 3,5 % du total des ventes de véhicules neufs en 2019⁷¹, malgré une progression exponentielle. Les fabricants de turbines éoliennes et de véhicules électriques (et leurs équipementiers) sont pour le moment faiblement rentables sur ces activités et leur viabilité de long terme va dépendre des volumes vendus, d'évolutions de modèles d'affaire et de leur capacité à adapter leur outil industriel ;
- Les filières restent largement en cours de structuration et sont marquées par des mouvements d'alliances et de concentration. Ces filières sont par ailleurs fortement capitalistiques et exposées au cycle économique, par les dépenses des ménages pour l'automobile et par le cycle d'investissement et les conditions de financement pour l'éolien ;
- Les principaux débouchés de l'éolien et du véhicule électrique sont les trois principales grandes zones économiques : l'Amérique du Nord, l'Europe et l'Asie de l'Est (principalement la Chine et le Japon) ;
- Le déploiement de l'éolien et du véhicule électrique induit des impacts importants pour la société. Ces impacts se traduisent par des débats vifs qui menacent certains projets spécifiques mais aussi les politiques publiques de soutien au développement de l'éolien et du véhicule électrique. Néanmoins, des sondages montrent que les Français ont une image positive de l'éolien⁷² et du véhicule électrique⁷³ ;
- Le déploiement de ces technologies se déroule alors que l'opinion publique est de plus en plus sensible et sensibilisée aux enjeux écologiques. La capacité des industriels à se fournir et à réaliser leur production selon des critères ESG (environnementaux, sociaux et de gouvernance) devient de plus en plus importante tant pour les consommateurs que pour les apporteurs de fonds aux industriels et projets ;
- Des changements techniques et technologiques très importants caractérisent les évolutions actuelles. Le secteur le plus touché est celui de l'automobile, qui réalise une transition du moteur à combustion vers les moteurs électriques. Cette transition nécessite des investissements en R&D et en nouvelles capacités de production. Des impacts en matière d'emploi sont également prévisibles pour la filière automobile. Comme nous l'avons vu, plusieurs technologies de moteurs électriques et de génératrices éoliennes coexistent actuellement et selon les projections de la partie II.B.1, cette situation devrait perdurer car aucune technologie ne semble prendre l'ascendant sur les autres ;
- Les secteurs énergétique et automobile sont fortement régulés et réglementés. L'évolution de ces réglementations et des mécanismes incitatifs déployés par les pouvoirs publics est déterminant pour la vitesse d'adoption de ces technologies. La situation des acteurs industriels dans ces filières peut notamment être fragilisée en cas de modifications brusques des réglementations.

⁷¹ www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/proportion-of-vehicle-fleet-meeting-5/assessment

⁷² presse.ademe.fr/wp-content/uploads/2021/10/Rapport_Harris_Les_Franc%CC%A7ais_et_le%CC%81nergie_e%CC%81olienne.pdf

⁷³ www.vinci-autoroutes.com/fr/actualites/environnement/electrique-enquete-ipso/

A. La chaîne des terres rares et le recyclage des aimants permanents

1. HISTORIQUE

L'amont de la production des aimants permanents, la métallurgie des oxydes de terres rares, avait été dominé par le français Rhône-Poulenc (repris par le groupe Solvay) avec son usine de La Rochelle, lors des années 1970 et 1980. Cette usine avait fermé en raison de coûts de production prohibitifs face à la concurrence chinoise et d'un recentrage des activités chimique du groupe propriétaire. La Chine a mené dans les années 1990-2000 une politique de développement agressive de la filière qui lui a permis de concentrer les étapes amont et la production d'aimants permanents sur son territoire.

Aujourd'hui, Solvay possède certaines des compétences en électrométallurgie des terres rares de l'époque, ainsi que Rio Tinto, qui a repris les activités aluminium de Péchiney. Le centre de recherche de Rio Tinto en France emploie toujours des personnes qui ont travaillé sur les procédés métallurgiques qui permettent de passer de l'oxyde au métal utilisé pour les aimants.

Cependant, une limite à l'implantation en France d'entreprises de métallurgie de terres rares est celle des compétences. Les formations dans les grandes écoles françaises n'offrent pas de spécialités dans les domaines du magnétisme et des terres rares, ni même dans les filières spécialisées dans les matériaux, au contraire de la Chine. L'université North-East à Chenvang dispose d'ouvrages et de parcours spécialisés dans les aimants et le magnétisme. Le CEA, qui possède une ligne de production pilote (qui permet d'obtenir des AP à partir d'alliages) pourrait délivrer des formations plus spécifiques en France.

Comme évoqué dans *la partie III.A.3.b*), il n'existe pas de ressources minières de terres rares identifiées en France métropolitaine.

2. L'INDUSTRIE DES TERRES RARES LOURDES EN FRANCE

Aujourd'hui, plusieurs entreprises établies en France travaillent encore sur des terres rares, notamment lourdes, mais pas nécessairement pour la fabrication d'aimants permanents. Ces entreprises peuvent inclure Solvay, qui avait repris les activités de Rhône-Poulenc/Rhodia, Arkema (pour des catalyseurs) et Merck Performance Materials, filiale du groupe Merck située à Trosly-Breuil dans l'Oise et spécialisée dans les matériaux à destination de l'électronique.

L'étude des importations et exportations françaises entre 2016 et 2019 permet de mettre en évidence que la France est exportatrice nette en valeur de composés de terres rares lourdes⁷⁴. Le tableau 5 présente quelques chiffres-clés issus des données publiées par le service statistique des douanes françaises.

⁷⁴ Au sens de la catégorie statistique 28469020 en nomenclature NC8 « Composés, inorganiques ou organiques, de l'euroium, du gadolinium, du terbium, du dysprosium, de l'holmium, de l'erbium, du thulium, de l'ytterbium, du lutétium ou de l'yttrium ». Cette catégorie n'inclut pas les métaux de terres rares purs ou alliés entre eux, ni les minéraux ou oxydes de terres rares, ni les aimants permanents. La recommandation 7 vise à étudier le contenu de cette catégorie et à identifier les industriels français.

Tableau 5 : chiffres clés des exportations françaises de composés de terres rares lourdes

	2019	2018	2017	2016
Valeur (en €)	8 229 131	9 301 892	8 895 225	13 294 914
Masse (en kg)	46 857	49 442	76 683	86 147
Valeur massique moyenne (en €/kg)	176	188	116	154
Valeur massique moyenne des importations de composés de terres rares (en €/kg)	17	28	39	46
Principal importateur en valeur (en % du total)	États-Unis (49 %)	États-Unis (43 %)	États-Unis (45 %)	États-Unis (30 %)
Second principal importateur (en % du total)	Allemagne (24 %)	Allemagne (21 %)	Allemagne (22 %)	Allemagne (15 %)
Troisième principal importateur (en % du total)	Italie (12 %)	Espagne (10 %)	Italie (11 %)	Italie (7 %)

Source : données du commerce international, Direction générale des douanes et droits indirects

Les entreprises implantées en France créent donc des produits de forte valeur ajoutée comprenant des terres rares lourdes, puisque le prix au kilo des exportations est très supérieur au prix au kilo des importations. La plus grande partie des exportations sont à destination des États-Unis et de l'Allemagne.

L'histoire du groupe Rhône-Poulenc ainsi que les statistiques du commerce permettent donc de conclure que la France possède des atouts dans la chimie, la métallurgie et le traitement de composés de terres rares lourdes. Comme nous l'avons constaté, la vulnérabilité des acteurs occidentaux étant plus marquée pour les terres rares lourdes que légères, cette spécificité française pourrait être mise à profit (voir partie III.A.3).

Cependant, une étude plus approfondie serait nécessaire afin de déterminer quels composés sont produits en France et quelles sont les explications à la baisse de ces exportations au cours des dernières années. Il serait ainsi possible de déterminer comment ce point fort français peut être exploité, et si de potentielles synergies avec de nouveaux projets, au niveau des procédés de traitement ou de la sécurisation d'approvisionnement pourraient être étudiées.

3. LES ENTREPRISES FRANÇAISES PORTENT DES PROJETS ÉMERGENTS POUR LE RECYCLAGE DES AIMANTS PERMANENTS

Finalement, la R&D actuelle en France est très tournée vers les applications de recyclage, ainsi que sur la limitation des quantités de matières nécessaires. En Chine, le recyclage en boucle longue semble être la voie majoritaire choisie par les industriels, essentiellement pour les chutes de production.

Plusieurs jeunes sociétés françaises se positionnent sur le marché du recyclage et des procédés liés à la métallurgie des terres rares. Néanmoins, la part des aimants permanents actuellement collectés et recyclés en Europe est estimée à moins de 1 % par les entreprises auditionnées.

Carester : son activité est centrée sur la définition de procédés pour le compte d'entreprises minières et juniors pour l'extraction et/ou la purification des terres rares. Le recyclage fait partie des champs couverts par l'entreprise, notamment en boucle longue. Selon les éléments communiqués par Carester lors de son audition, le procédé de recyclage en boucle longue développé par l'entreprise ne serait pas plus cher que les procédés liés à la ressource primaire, mais avec l'avantage d'être moins polluant, tant en consommation d'eau qu'en rejets de CO₂. Carester aurait en effet mis au point un procédé permettant de réduire de 30 % les émissions de

CO_2 par rapport à l'existant et de faire en sorte qu'il n'y ait pas d'effluents liquides, ce qui limite les risques de pollution. Une unité de recyclage conçue par Carester pourrait entrer en production en 2024 et serait la première unité de production de terres rares lourdes en dehors de la Chine. Ce projet, appelé Carmag, prévoit une production nominale (qui pourrait être doublée) de 320 t d'oxydes de terres rares par an, qui permettront à terme la production de l'ordre de 1000 t d'aimants permanents avec environ 30 % de la masse des aimants en néodyme, praséodyme, dysprosium et terbium. La montée en régime se fera sur trois ans, la principale contrainte actuellement identifiée étant celle des approvisionnements en intrants, particulièrement en aimants permanents usagés.

MagREEsouce est un *spin-off* du CNRS qui a développé un business model dit *Magnet-to-Magnet*. Avec la licence exclusive du savoir-faire de l'Institut Néel sur la décrépitation à l'hydrogène, MagREEsouce a breveté un procédé de recyclage des déchets d'aimants à TR pour obtenir une poudre d'aimants, qui va ensuite être réutilisée directement par fabrication additive ou frittage haute performance pour obtenir de nouveaux aimants personnalisés selon les demandes des clients. Ainsi les déchets d'aimants issus du démantèlement d'éoliennes à travers l'Europe peuvent servir à refabriquer des aimants en Europe grâce à ce modèle d'économie circulaire en boucle courte, économique et efficiente, et participer à la création d'une filière métallurgique souveraine.

Daimantel France est implantée en Moselle et propose des services de sécurisation des stocks, de collecte et de démantèlement des aimants permanents à base de terres rares. La société propose notamment des services de démagnétisations et de traitements des aimants permanents usagés, qui peuvent ensuite être injectés dans une boucle de recyclage. Les étapes de collecte et de préparation des systèmes contenant les aimants permanents usagés seront déterminants pour permettre la bonne alimentation des entreprises de recyclage (*voir partie III.A.3.d*)).

Suez, le BRGM et le laboratoire Liten du CEA ont mené le projet Valomag avec d'autres acteurs européens, dont Kolektor Magnet Technology GmbH et CRM Group (Belgique). Le projet vise le recyclage d'aimants permanents issus des turbines éoliennes, de moteurs électriques et de déchets électroniques, tant par des boucles courtes qu'en boucle longue selon les compositions et la qualité des aimants collectés.

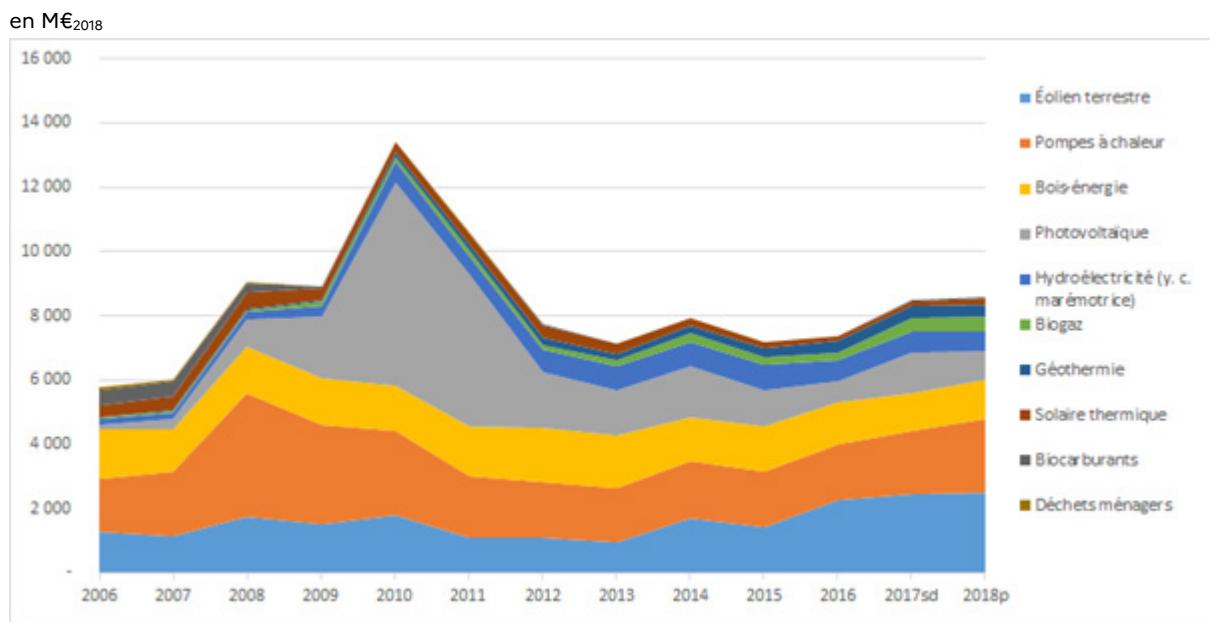
Finalement, Valéo a porté le projet SinterMagRec (recyclage d'aimants NdFeB par frittages non conventionnels) et Véolia (par sa filiale Triade Électronique) a réalisé avec le CEA/Liten le projet RECVAL-HPM (récupération d'AP contenus dans les déchets électroniques), allié à BASF et Bosch. Ces projets ont été soutenus par les investissements d'avenir et l'ANR.

B. L'industrie éolienne en France

1. POIDS DE LA FILIÈRE ÉOLIENNE ET EMPLOIS EN FRANCE

Depuis 2016, l'énergie éolienne est la filière qui mobilise les montants d'investissement dans des capacités de production d'énergie renouvelable les plus importants avec près de 30 % du total (figure 52).

Figure 52 : investissements en capacité de production EnR

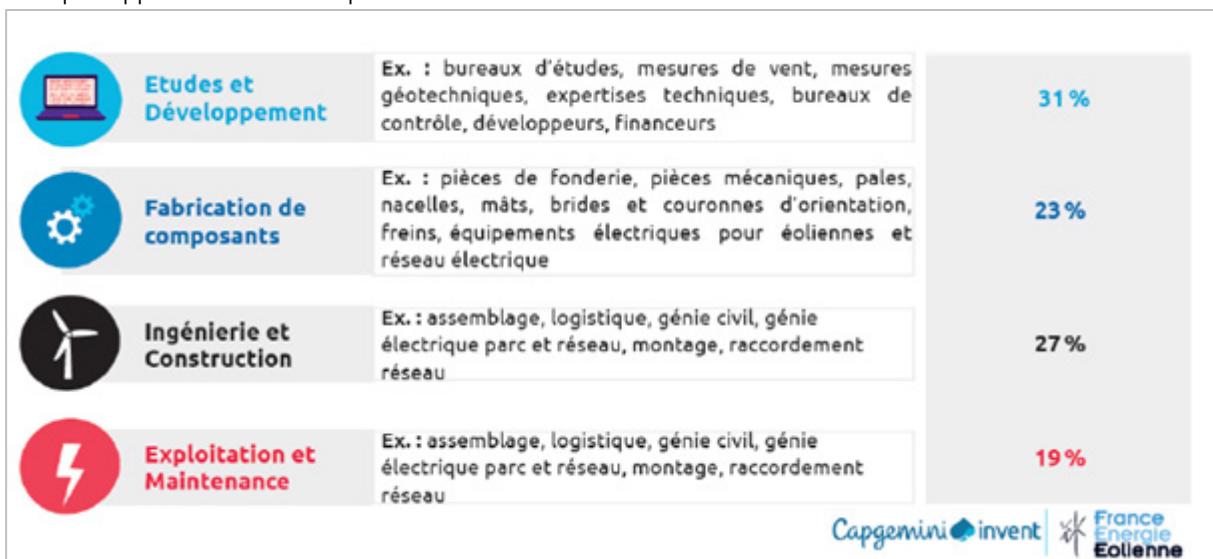


Sources : Chiffre clés des énergies renouvelables, édition 2021, Datalab, CGDD ; Ademe, Marchés et emplois concourant à la transition énergétique, édition 2020

Une étude de Capgemini de septembre 2020 pour France Énergie Éolienne (FEE, association regroupant plus de 300 entreprises de l'éolien) montre que le nombre d'emplois dans la filière éolienne en France est passé de 15 000 en 2016 à plus de 20 000 en 2019. Les emplois indirects pourraient être de 1 pour 3, mais des études complémentaires seraient nécessaires pour confirmer ce chiffre. La répartition de ces emplois par domaine d'activité est donnée *infra* (figure 53).

Figure 53 : répartition des emplois en France dans le secteur éolien

En % par rapport au total des emplois



Source : étude Capgemini et FEE, 2020

2. LES ENTREPRISES FRANÇAISES DE L'INDUSTRIE ÉOLIENNE

De nombreuses entreprises tant françaises qu'étrangères sont actives sur le territoire français et la France dispose d'une certaine base industrielle, principalement dans l'éolien en mer.

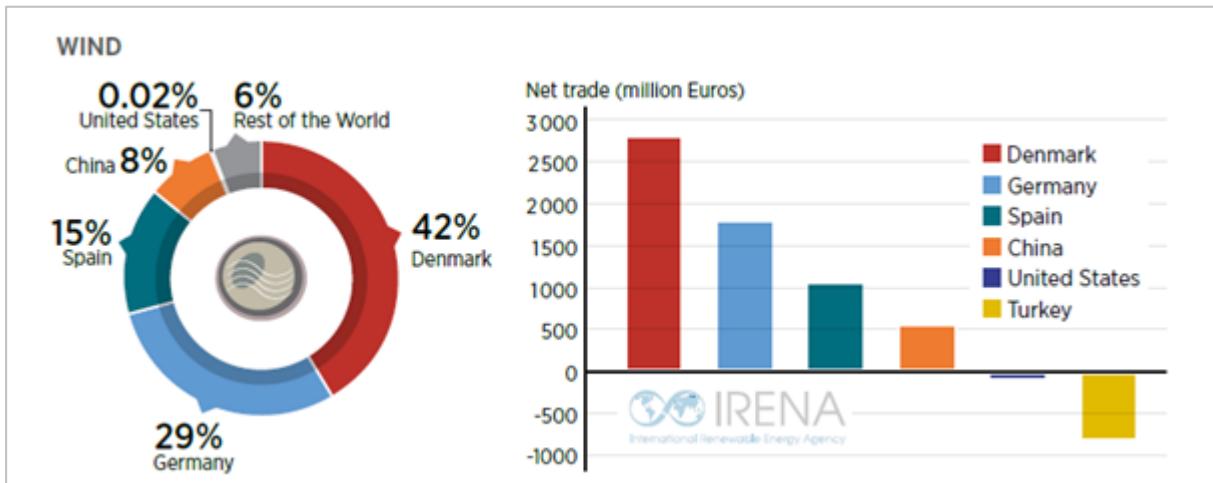
Aujourd'hui, la majorité des parapétroliers s'intéresse à l'éolien *offshore* comme l'Italien Saipem pour le posé et le flottant. D'autres grandes entreprises comme TotalEnergies ont un savoir-faire issu du pétrole *offshore* qu'ils réemploient pour l'éolien *offshore*. En France, Engie est le premier exploitant éolien terrestre et l'entreprise est lauréate de certains appels d'offres en France et à l'étranger. Pour l'éolien *offshore*, Engie a créé une *joint-venture* avec EDPR (Ocean Winds) et EDF Renouvelables dévelope plusieurs projets en France et dans le monde.

Les usines de fabrication de composants sont essentiellement liées aux AO *offshore*, et deux des trois principaux turbiniers pour le marché de l'éolien en mer ont investi dans des capacités de production, à Cherbourg pour des pales (LM Wind, filiale de GE, jusqu'à 800 emplois sur le site), à Montoir-de-Bretagne pour les nacelles de GE (400 emplois annoncés) et au Havre pour la fabrication de pales, nacelles et génératrices de Siemens Gamesa (SGRE). L'usine de fabrication de pales de Cherbourg a été la première à fabriquer des pales LM 107.0 P de 107 m de long, qui sont les plus grandes actuellement industrialisées.

Les Chantiers de l'Atlantique sont également impliqués sur le marché de l'éolien pour la fabrication de pièces métalliques et de sous-stations électriques.

Cependant, le retard de développement des projets éoliens en mer en France fait qu'en 2016, elle n'est pas exportatrice de turbines éoliennes, contrairement aux places fortes des turbiniers que sont le Danemark et l'Allemagne (figure 54).

Figure 54 : commerce international de l'éolien en 2016



Source : IRENA Renewable Energy and Jobs, annual review 2019

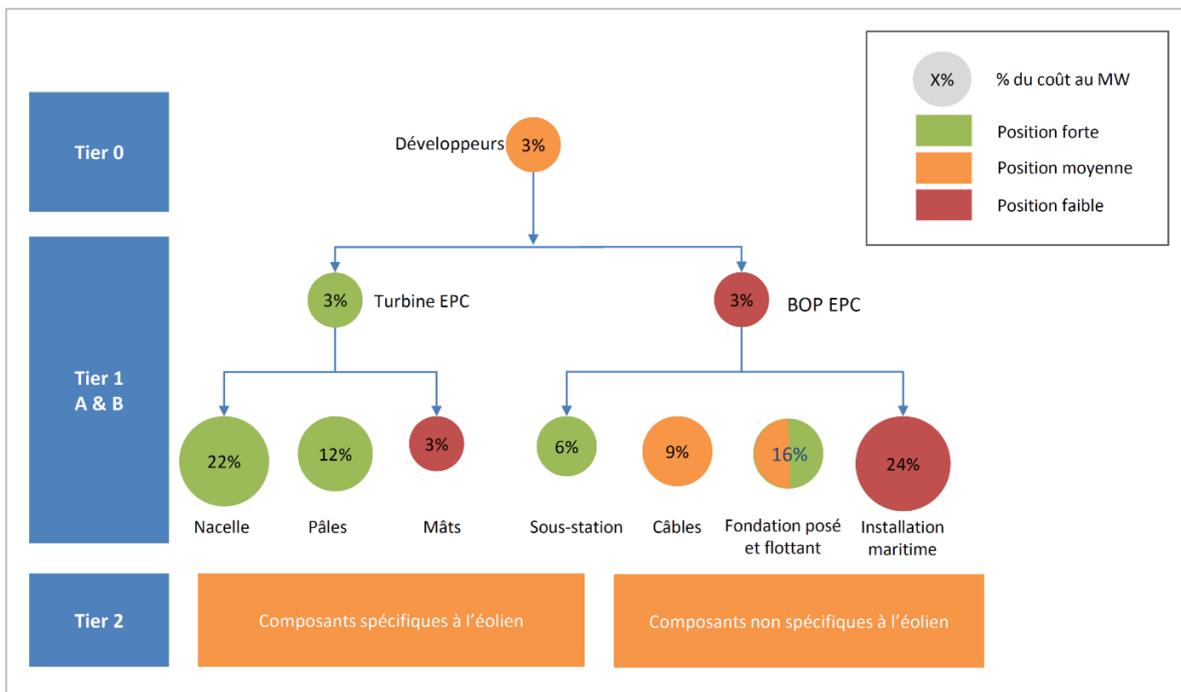
Un fabricant notable de pièces mécaniques est Rollix, du groupe Defontaine (filiale française de ThyssenKrupp), important acteur mondial des couronnes de rotation de nacelles (qui permettent d'orienter le rotor dans le sens du vent).

Plusieurs industriels français se sont positionnés sur les projets de fermes pilotes flottantes en France. Naval Group a notamment développé un flotteur au sein de sa filiale Naval Énergies, qui a été acquise par une filiale de Saipem en 2021. Eiffage Métal va également réaliser les flotteurs en acier pour le projet de ferme pilote d'Engie dans le golfe du Lion et assembler les flotteurs du projet Provence Grand Large. Bouygues se positionne pour sa part sur des flotteurs en béton, après avoir déjà travaillé sur des fondations gravitaires pour l'éolien posé.

Les opportunités industrielles pour le territoire français sont principalement liées à l'éolien en mer. Le rapport de l'Ademe avec le cabinet de conseil ICC, *Eolien offshore : analyse des potentiels industriels et économiques en France*⁷⁵ paru en décembre 2019 fait un inventaire du positionnement des industriels français sur la chaîne de valeur de l'éolien en mer (figure 55).

⁷⁵ <https://librairie.ademe.fr/energies-renouvelables-reseaux-et-stockage/4638-eolien-offshore-analyse-des-potentiels-industriels-et-economiques-en-france.html>

Figure 55 : répartition des coûts d'investissement pour l'éolien offshore et positionnement des industriels français



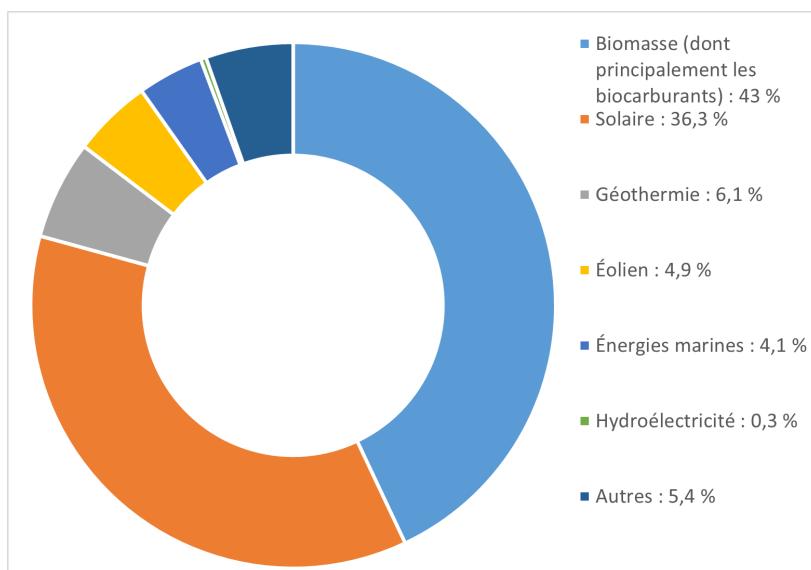
Source : rapport Ademe-ICC, décembre 2019

Le potentiel en matière d'emplois de la filière offshore française est estimé dans ce rapport à 11 300 ETP en 2030. L'essentiel de la valeur ajoutée et des emplois concerne la nacelle, les fondations/flotteurs et les pales.

3. INNOVATION ET R&D

Finalement, il n'y a pas de technologie de rupture attendue pour l'éolien (voir partie I.B.2). La R&D est principalement menée afin de réaliser des améliorations incrémentales. La filière éolienne bénéficie ainsi d'une part très faible des 123 M€ de dépenses publiques en R&D dans les énergies renouvelables en 2019 (figure 56).

Figure 56 : les dépenses publiques de R&D en énergie en France en 2019



Source : Chiffres clés des énergies renouvelables, édition 2021, Datalab, CGDD

Il convient néanmoins de nuancer ce constat, puisque plusieurs innovations majeures sont en cours de développement pour l'éolien en mer flottant. Nous avons précédemment évoqué les flotteurs, dont plusieurs concepts sont portés par de jeunes entreprises françaises. Idéol (racheté par le Norvégien BW Offshore) et Eolink par exemple, sont soutenus par le ministère de la Transition écologique et ont bénéficié du programme d'investissement d'avenir pour leurs projets de démonstrateurs. Le concept innovant d'Eolink, dont un prototype à échelle réduite a déjà été testé, est illustré *supra* (figure 56).

Figure 57 : illustration du concept flotteur-turbine développé par Eolink



Source : © Eolink

C. Les moteurs électriques

La filière automobile est une composante majeure de l'économie française. Au-delà des deux grands constructeurs historiques (aujourd'hui appelés Renault et Stellantis), de nombreux équipementiers ont une envergure internationale (Valéo, Plastic Omnium, Faurecia, Michelin, etc.) et de nombreuses ETI plus spécialisées et PME (Akwel, Delfingen, etc.) complètent la chaîne de sous-traitance. De nombreuses autres entreprises dépendent du secteur automobile, comme les fabricants d'acier ou d'aluminium, des entreprises de service numérique, les concessionnaires et les prestataires de services, sans compter les nouveaux producteurs de batteries qui émergent. Le comité des constructeurs français d'automobiles (CCFA) estime que plus de deux millions de personnes avaient un emploi assuré par l'automobile en 2018⁷⁶, soit 8 % de la population active occupée en France.

D'autres économies européennes, comme l'Allemagne, sont également fortement dépendantes de l'industrie automobile. Le stock de véhicules permettant le transport de passagers par la route est de l'ordre de 260 millions d'unités en service en Europe en 2019⁷⁷ et 15 millions de nouveaux véhicules ont été mis en service durant cette année 2019. Les évolutions de l'industrie automobile sont donc d'une importance majeure sur le plan économique, tant pour la France que pour l'Europe.

1. L'ÉLECTRIFICATION EST UNE RUPTURE POUR LES INDUSTRIELS DE L'AUTOMOBILE

La transition de motorisations thermiques vers l'électrique est une rupture technologique majeure pour l'industrie automobile. Les principaux constructeurs ont entamé leur transition vers le véhicule électrique (*figure 58*). Certains ont déjà annoncé la fin de la commercialisation de modèles à combustion à partir des années 2030.

Figure 58 : ventes de véhicules, de véhicules électriques et objectifs annoncés par les principaux constructeurs automobiles en 2018

Group	2018 Annual Sales (All Passenger Vehicles)	2018 Annual Sales (EV Only)	EV Sales and Deployment Targets
Renault – Nissan	9.84 million	0.40 million	Aims for 20% of sales in 2022 to be EVs
Volkswagen	10.40 million	0.09 million	Targeting sales of 2 to 3 million EVs annually by 2025; plans to only offer B/PHEVs from 2030
Toyota	10.01 million	1.38 million	All vehicles electrified by 2025; targeting sales of 5.5 million BEVs and PHEVs per annum by 2030
GM	6.54 million	0.07 million	Plans to offer 20 BEV models by 2023; targeting sales of 1 million BEVs annually by 2026
Hyundai – Kia	7.04 million	0.26 million	Targeting 14 BEV models and 24 PHEV, HEV, and FCEV models by 2025
Ford	5.57 million	0.08 million	Plans to offer 16 BEV models and 24 PHEV and HEV models by 2022
Honda	5.26 million	0.28 million	Aims for two-thirds of sales to be EVs by 2030
PSA	3.57 million	0.01 million	Plans to offer an electrified variant of every model it produces by 2025
Daimler	2.77 million	0.04 million	Plans to offer an electrified variant of every Mercedes-Benz model by 2022
BMW	2.21 million	0.13 million	Aims for 15% to 25% of group sales to be EVs by 2025
BAIC	1.21 million	0.17 million	Targeting sales of 0.5 million B/PHEVs by 2022; plans to only offer B/PHEV from 2025
Changan	1.14 million	0.04 million	Plans to only offer B/PHEV from 2025
Volvo	0.67 million	0.04 million	Plans to only produce EVs from 2019; targeting sales of 1 million EVs annually by 2025
Tesla	0.25 million	0.25 million	Targeting production of 0.5 million BEVs in 2018 and 1 million BEVs in 2020

Source : Adamas Intelligence, Marklines, EV-Volumes, CAAM

Cette évolution se traduit d'abord par une évolution dans les chaînes de production, puis dans les services et usages des véhicules.

⁷⁶ <https://ccfa.fr/dossiers-thematiques/la-filiere-automobile-principal-contributeur-d-emploi-en-france-2/>

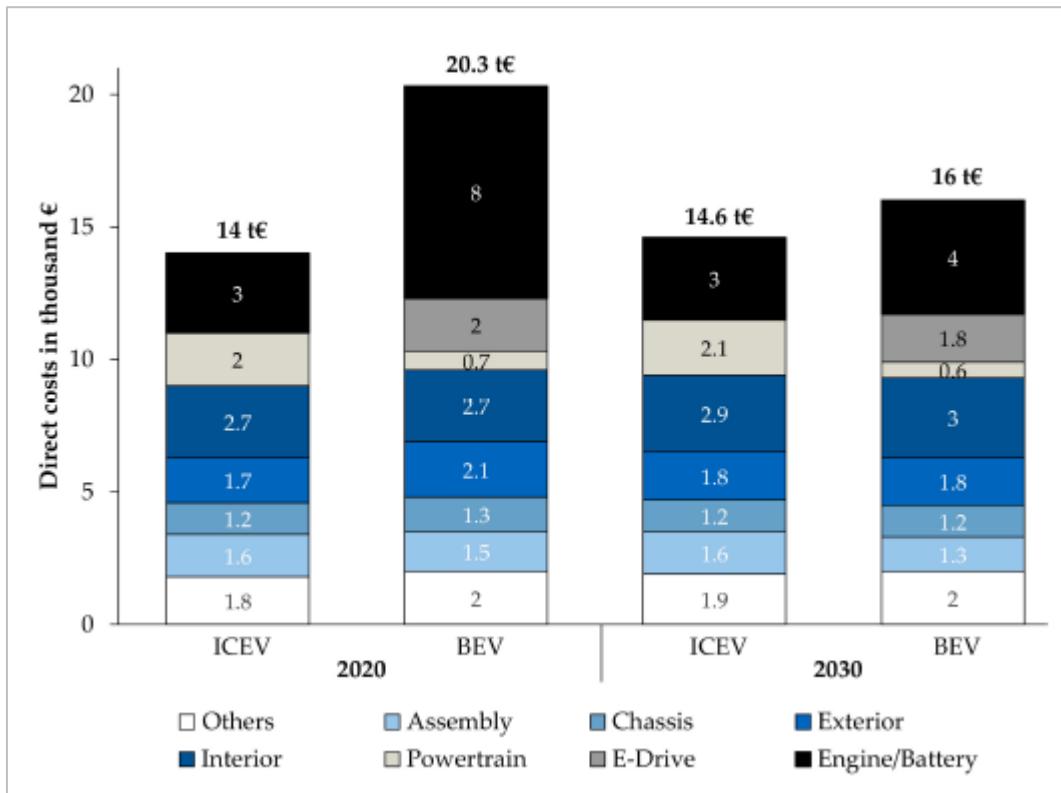
⁷⁷ À partir des données Eurostat, disponibles sous : https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Passenger_cars_in_the_EU#Overview:_car_fleet_grows.2C_alternative_fuels_still_have_a_low_share

2. LES IMPACTS POUR LA FILIÈRE

Tout d'abord, le coût de fabrication d'un véhicule électrique est plus important que pour un véhicule conventionnel. Nous avons étudié dans le rapport d'étape n°3 l'impact de l'intégration d'un système de batteries, mais le système de propulsion (*powertrain*) est également très différent de celui des véhicules thermiques.

Si la plus grande part de l'écart de coûts de production s'explique par le système de batterie des véhicules électriques, le système de propulsion (*powertrain + e-Drive*) est également plus couteux que son équivalent thermique, d'environ 35 %. Mais en 2020, le surcoût dû au système de propulsion n'explique qu'environ 10 % du surcoût des véhicules électriques (figure 59).

Figure 59 : comparaison des coûts directs de production par poste de véhicules conventionnels (ICEV) et électriques à batteries (BEV) en 2020 et prévus en 2030



Source : An Overview of Parameter and Cost for Battery Electric Vehicles (2021), A. König et al.

Le cabinet de conseil McKinsey, en partenariat avec le *Entrepreneurship Research Institute of the Technical University of Munich*, a publié en mai 2021 un rapport⁷⁸ sur les impacts de l'électrification du système de propulsion dans le secteur automobile. Parmi les enseignements de ce rapport, le nombre de composants-clés d'un système de propulsion électrique (9) est beaucoup plus faible que pour un moteur à combustion (30). Ceci implique que moins d'étapes de montage seront nécessaires. Par ailleurs, McKinsey estime que les investissements en outils de production vont baisser, puisque le moindre nombre de composants mécaniques dans les moteurs électriques permet de s'affranchir de certaines étapes d'usinage.

Finalement, le nombre moindre de composants-clés, ainsi que la réduction du nombre d'étapes de montage pourrait inciter les constructeurs à réinternaliser certaines étapes de production.

⁷⁸ www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/electromobilitys-impact-on-powertrain-machinery

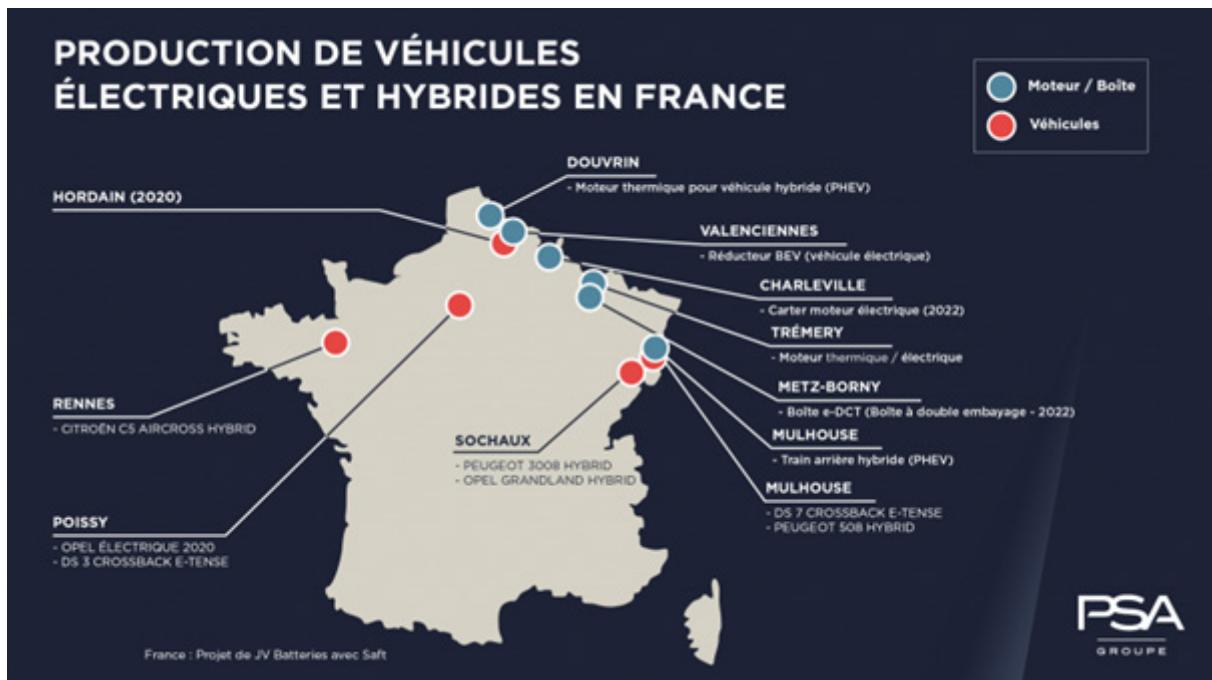
3. DES ENTREPRISES FRANÇAISES IMPLIQUÉES DANS LA PRODUCTION OU L'ASSEMBLAGE DE MOTEURS DE TRACTION ÉLECTRIQUES

Plusieurs entreprises françaises annoncent produire des moteurs électriques en France.

Le groupe Renault assemble ses moteurs électriques, notamment à destination des Zoe, dans son usine de Cléon, en Seine-Maritime, qui produit également des moteurs thermiques. Néanmoins des adaptations ont été nécessaires, ainsi qu'un effort de formation⁷⁹.

Le groupe Stellantis (ex-PSA) possède plusieurs sites de production à destination des véhicules électriques (figure 60).

Figure 60 : sites de production de véhicules électriques et hybrides PSA en France



Source : groupe PSA

Valéo a pour sa part plusieurs projets concernant la motorisation électrique. L'entreprise a créé en 2016 une joint-venture avec le groupe Siemens (Valeo Siemens eAutomotive) et revendique équiper deux véhicules électriques sur trois⁸⁰. Cette coentreprise compte huit usines dans le monde, dont cinq en Chine, emploie 4 500 personnes et vise plus d'un milliard de chiffre d'affaires en 2022.

Le groupe Valéo se positionne par ailleurs sur les petits moteurs électriques, à destination de l'hybridation légère et de la mobilité douce⁸¹.

⁷⁹ www.renaultgroup.com/news-onair/actualites/a-cleon-60-ans-dexperience-au-service-de-lelectrique

⁸⁰ www.lesechos.fr/industrie-services/automobile/le-grand-pari-de-valeo-dans-les-moteurs-pour-voitures-electriques-1349916

⁸¹ www.ifpennergiesnouvelles.fr/breve/systeme-48-volts-hybride-leger-fort-potentiel

Points essentiels

- La France a historiquement été un haut-lieu de la métallurgie des terres rares, grâce à l'usine Rhône-Poulenc de La Rochelle dans les années 1970 et 1980. Si les activités ont depuis été transférées en Chine, la France bénéficie toujours d'atouts, notamment pour le traitement des terres rares lourdes.
- Plusieurs entreprises françaises capitalisent sur des compétences acquises lors des années 1980. Ces entreprises se tournent notamment vers le recyclage en boucle courte ou longue des aimants permanents à terres rares. Si le recyclage ne sera pas suffisant pour subvenir aux besoins en aimants permanents, il permettra de réduire la dépendance aux importations.
- Une étape importante pour lancer la filière française du recyclage des aimants permanents est la sécurisation des aimants usagés, qui sont les intrants indispensables pour les industriels. Cette sécurisation doit permettre d'éviter l'export d'aimants permanents usagés qui pourraient être recyclés en France. Les principaux débouchés identifiés pour de tels aimants sont les moteurs électriques de la mobilité légère (vélos à assistance électrique, trottinettes, etc.), les moteurs électriques des voitures électriques et hybrides ainsi que les aimants permanents des éoliennes qui en contiennent.
- L'industrie éolienne française est la filière EnR qui a mobilisé le plus d'investissements au cours des dernières années. Plus de 20 000 emplois existent déjà en France en lien avec l'éolien. Néanmoins, la plupart des emplois industriels créés par la filière éolienne en France le seront grâce au développement de l'éolien en mer et surtout de l'éolien flottant.
- Les atouts des entreprises françaises incluent l'expérience de projets offshore, la participation aux premiers projets pilotes d'éolien flottant, la maîtrise de la construction de structures comparables aux flotteurs et des sous-stations électriques. Plusieurs concepts innovants de systèmes éoliens flottants sont par ailleurs développés en France.
- La filière automobile est une industrie majeure en France, dont dépendent plus de 2 millions d'emplois. L'électrification de la motorisation automobile constitue donc un tournant critique dans lequel se sont engagés la majorité des constructeurs.
- Ce tournant impacte les coûts de production des véhicules, mais également les procédés et modèles d'affaire des constructeurs et de leurs sous-traitants.

V.

Recommandations

L'objectif des recommandations est de contribuer, par la prise en compte des enjeux matières des terres rares, à la réduction des risques économiques, sociaux et environnementaux qui leur sont associés et de permettre de saisir les opportunités liées aux aimants permanents, à l'industrie de l'éolien et à l'électrification de la motorisation des véhicules.

L'intervention des pouvoirs publics reste nécessaire pour atteindre les objectifs ambitieux de déploiement de l'éolien et de décarbonation des transports par la massification des véhicules électriques. Mais la tenue de ces objectifs dépend de trois paramètres déterminants.

Le premier enjeu est de garantir l'approvisionnement des industriels européens en aimants permanents à terres rares, qui sont les plus performants et qui constituent des composants-clés pour les éoliennes et les véhicules électriques. La concentration des activités de raffinage des terres rares et de production des aimants permanents en Chine, ainsi que la forte croissance de la demande en aimants permanents pour l'industrie de l'éolien et l'industrie automobile, poussent à s'interroger quant à la sécurité de cet approvisionnement.

Le second enjeu déterminant est celui de la réalisation des projets de parcs éoliens en France. Pour des raisons réglementaires, d'acceptabilité sociale ou de prise en compte des impacts environnementaux, le délai de réalisation des projets éoliens en France est supérieur à celui de la plupart des autres pays, notamment l'Allemagne. Ces retards et l'incertitude qu'ils entraînent représentent un risque pour les acteurs industriels qui investissent dans de nouvelles capacités de production pour répondre à l'augmentation de la demande. La réalisation des opportunités industrielles qu'ouvre le développement de l'éolien dépend donc de la capacité à sécuriser les porteurs de projet, afin de garantir au mieux la visibilité des carnets de commandes des industriels. Les retombées économiques du déploiement de l'éolien en mer en France, et notamment l'industrialisation de l'éolien flottant, sont conditionnées à la structuration de la filière, qui doit faire l'objet d'un travail commun entre acteurs publics et privés.

Finalement, l'étude de la chaîne de valeur des aimants permanents pour l'éolien et les moteurs électriques ne permet pas à elle seule de saisir tous les enjeux relatifs aux terres rares. D'autres industries comme l'électronique, l'aéronautique et la défense dépendent également de ces métaux stratégiques, mais leurs besoins et leurs chaînes de valeur sont moins bien connus. De plus, la concentration des activités liées aux terres rares en Chine ainsi que la rupture historique que constitue la motorisation électrique dans l'industrie automobile rendent nécessaires la mise en place ou l'adaptation de formations spécifiques afin de répondre aux besoins en main d'œuvre de ces secteurs.

Les propositions ci-dessous s'inscrivent dans ce cadre. Elles se structurent donc autour de trois axes :

- sécuriser les approvisionnements en aimants permanents et en terres rares, notamment en développant une filière de recyclage des aimants permanents ;
- limiter les risques et saisir les opportunités engendrées par le déploiement rapide de l'éolien ;
- mener des études complémentaires pour mieux connaître les industries utilisatrices de terres rares et anticiper les besoins en formation pour accompagner les transformations de l'industrie automobile.

A. Sécuriser l'approvisionnement en aimants permanents et en terres rares

Comme le mentionne le rapport de l'*European Raw Materials Alliance (ERMA), Rare Earth Magnets and Motors: A European Call for Action*, paru en 2021⁸², la chaîne de valeur des terres rares est considérée comme hautement stratégique par la Chine. Des entreprises publiques dominent la chaîne de valeur des aimants permanents et le ministère chinois de l'industrie et des technologies fixe des quotas de production. C'est pourquoi une intervention des pouvoirs publics est justifiée dans ce domaine.

Cette intervention doit se faire au niveau national et européen. Le niveau européen peut notamment permettre une complémentarité entre les différents pays, qui sont présents sur des étapes différentes de la chaîne de valeur des aimants permanents.

En effet, les ressources minières en terres rares en Europe sont concentrées en Scandinavie et au Groenland. Des usines actives dans la séparation et la purification des terres rares sont situées en Estonie (Silmet, groupe Neo Performance Materials) et en France (l'usine Solvay de la Rochelle). Plusieurs projets d'usines de raffinage et de purification sont également envisagés, en Pologne et en Scandinavie. Finalement, les seuls fabricants européens d'aimants permanents sont allemands et slovènes.

La coopération européenne peut donc contribuer à la sécurisation de cette chaîne de valeur en évitant que certains maillons reposent uniquement sur des acteurs extra-européens. La coopération au niveau européen peut aussi faciliter la rencontre entre financeurs potentiels et porteurs des nouveaux projets de mines ou d'usines. Cette rencontre pourra se réaliser à travers des financements et prises de participation directs ou la signature de contrats d'approvisionnement de long terme qui permettent de sécuriser tant les nouveaux projets, en Europe ou ailleurs, que les industriels consommateurs d'aimants.

RECOMMANDATION 1: RENFORCER LA COOPÉRATION EUROPÉENNE DES ACTEURS DE LA CHAÎNE DE VALEUR DES AIMANTS PERMANENTS AU SEIN DU CLUSTER « RARE EARTH MAGNETS AND MOTORS » DE L’EUROPEAN RAW MATERIALS ALLIANCE

Impliquer les acteurs français du public et du privé dans les travaux du cluster « *Rare Earth Magnets and Motors* » de l'ERMA.

Cette participation devra permettre de mettre en avant les compétences des entreprises françaises dans la chaîne de valeur des terres rares et le recyclage, mais aussi de faciliter la mise en relation avec des acteurs européens et extra-européens aux activités complémentaires.

Cette participation doit aussi permettre de renforcer et coordonner les capacités de veille économique, géopolitique et technologique en appui aux filières industrielles européennes. Ce travail débouchera sur une organisation capable de piloter la gestion de crise en cas de difficultés d'approvisionnement.

Si la coopération européenne est nécessaire pour le développement de filières intégrées et la réponse aux situations de crise, les différents enjeux soulevés dans ce rapport montrent l'importance de poursuivre les efforts en recherche et innovation. Ces efforts doivent porter sur l'ensemble de la chaîne de valeur des terres rares, de l'exploration du sous-sol européen aux nouvelles technologies de machines électriques, en passant par des procédés d'extraction et de traitement des terres rares moins nocifs pour l'environnement et plus compétitifs.

⁸² Roland Gauß, Carlo Burkhardt, Frédéric Carencotte, Massimo Gasparon, Oliver Gutfleisch, Ian Higgins, Milana Karajić, Andreas Klossek, Maija Mäkinen, Bernd Schäfer, Reinhold Schindler, Badrinath Veluri, *Rare Earth Magnets and Motors: A European Call for Action*. A report by the Rare Earth Magnets and Motors Cluster of the European Raw Materials Alliance. Berlin 2021.

La coopération européenne existe déjà pour des projets de R&D et son intensification doit permettre la mutualisation des efforts en R&D comme accélérateur de l'innovation au service des acteurs industriels européens de la filière. La mise en commun des compétences et des connaissances au niveau européen doit aussi permettre une meilleure caractérisation des ressources primaires et secondaires disponibles sur le continent européen, mais aussi des impacts potentiels des produits de substitution aux aimants permanents à terres rares.

RECOMMANDATION 2 : INTENSIFIER LES EFFORTS DE R&D ET DE COLLECTE DE CONNAISSANCE SUR LE MARCHÉ DES AIMANTS PERMANENTS

Dans le cadre de la coopération européenne au sein des différentes institutions telles que le *Joint Research Centre (JRC)*, l'*European Institute of Innovation and Technology Raw Materials (EIT RM)* et l'*European Raw Materials Alliance (ERMA)* :

- contribuer aux efforts de R&D destinés à sécuriser des approvisionnements européens durables et responsables en terres rares (explorations, inventaires et procédés) ;
- augmenter les efforts de R&D sur la filière des aimants permanents (technologies innovantes, produits de substitution, réduction de l'utilisation de terres rares, recyclage) ;
- étudier les impacts environnementaux et en matière de dépendance d'approvisionnement des produits de substitution ;
- caractériser les stocks d'aimants permanents en circulation en Europe et évaluer le potentiel de marché du recyclage dans l'Union européenne ;
- proposer des normes et standards européens permettant de soutenir les travaux d'écoconception dans les industries utilisatrices d'aimants permanents, notamment par la prise en compte des enjeux environnementaux et sociaux.

L'Europe est le principal marché mondial pour l'éolien en mer et les véhicules électriques. Le continent est donc la zone qui concentre le plus d'aimants permanents en usage, ce qui constitue un gisement secondaire majeur, bien que mal connu, de terres rares à travers les aimants permanents usagés. Plusieurs projets de recyclage sont en cours, notamment en France, afin de mettre à profit ce gisement. Dans l'attente de la mise en service de mines et usines de traitement en Europe, ce gisement est le seul exploitable pour les industriels européens.

Si ce gisement ne peut pas subvenir à la forte croissance de la demande en aimants permanents, il peut permettre une sécurisation d'un volume minimal qui ne dépendrait pas des aléas des chaînes d'approvisionnement intercontinentales.

Néanmoins, cette filière européenne du recyclage des aimants permanents est actuellement embryonnaire. Elle doit donc être accompagnée afin de lui permettre d'émerger et d'atteindre une taille critique afin d'assurer la viabilité économique de ses acteurs.

Cet accompagnement doit prendre différentes formes, du soutien à la R&D aux aides à l'investissement et au fonctionnement. Mais un point critique est apparu au cours des travaux de ce groupe de travail : celui de la récupération des aimants permanents usés.

Plusieurs gisements potentiels d'aimants sont identifiés. Ceux dans les déchets électroniques semblent difficiles à recycler dans un premier temps car ils sont de très petites dimensions, de compositions variables et insérés dans des systèmes variés desquels il est difficile de les séparer.

Au contraire les aimants permanents des grandes génératrices, particulièrement dans l'éolien, présentent beaucoup d'intérêt : les aimants sont de grande taille et homogènes au sein d'une machine. Ainsi, il est possible de récupérer près de 1 800 kg d'aimants permanents contenant environ 600 kg de terres rares lors du démantèlement d'une éolienne de 3 MW. Malgré les difficultés de manipulation et de transport d'aimants de grande dimension, l'éolien, et notamment l'éolien en mer peut constituer une source importante d'aimants permanents usagés. L'inconvénient de ce gisement est son immobilisation, particulièrement en France où aucune turbine éolienne en mer ne sera démantelée avant plusieurs décennies. L'intérêt à long terme de ce gisement justifie cependant que les aimants permanents de ces éoliennes en mer soient sécurisés et puissent être recyclés en Europe.

Finalement, les aimants permanents des moteurs électriques utilisés dans la mobilité (vélos, trottinettes, voitures électriques, etc.) présentent l'avantage d'être nombreux et les véhicules qui les contiennent sont déjà recyclés en fin de vie. Ce gisement est donc le principal disponible en France à l'heure actuelle pour amorcer la filière du recyclage. Néanmoins, la diversité des moteurs, des types d'aimants utilisés et l'intégration des aimants dans des pièces métalliques rendent le tri et l'extraction de ces aimants permanents plus complexes que pour les éoliennes. Il reste néanmoins important d'éviter que les véhicules usagés contenant des moteurs à aimants permanents soient exportés vers des pays qui n'assureront pas le recyclage de ces aimants.

RECOMMANDATION 3 : SÉCURISER LE GISEMENT DES AIMANTS PERMANENTS USAGÉS EN EUROPE POUR SON RECYCLAGE

Afin de permettre le déploiement de la filière européenne du recyclage des aimants permanents, il convient de sécuriser le stock d'aimants usagés présents en Europe.

Ce sujet peut être notamment porté à l'occasion de la révision de la directive européenne relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), ainsi que dans ses déclinaisons au niveau national. La priorité est d'éviter que des véhicules usagés contenant des moteurs à aimants permanents ou que les génératrices éoliennes démantelées utilisant des aimants permanents soient exportés par défaut vers des pays qui ne disposent pas des capacités de recyclage pour ce type d'aimants.

À plus long terme, le gisement des aimants permanents contenus dans les éoliennes en France doit aussi être sécurisé pour les recycleurs européens. Cette sécurisation peut passer par des clauses dédiées dans les appels d'offres ou par des mesures réglementaires dans le cadre des autorisations.

Plusieurs mesures sont par ailleurs envisageables à plus long terme afin de rendre plus efficace le recyclage des aimants permanents, notamment ceux contenus dans les véhicules électriques. Ces mesures doivent être accompagnées par l'incitation des industriels à se tourner vers des solutions compatibles avec le recyclage de leurs produits, notamment à travers des démarches d'écoconception.

RECOMMANDATION 4 : ENCOURAGER L'ÉCOCONCEPTION DANS LES INDUSTRIES UTILISATRICES D'AIMANTS PERMANENTS

Cet encouragement peut débuter par la normalisation de l'information en contenus « matières » des produits mis sur le marché européen. L'introduction d'une notation environnementale des produits, qui dépendrait de la facilité à les intégrer dans une chaîne de recyclage peut aussi répondre à ces besoins. Ceci peut notamment être discuté dans le cadre de la directive écoconception.

Par ailleurs, l'information sur le degré de nocivité des composants contenus dans les véhicules usagés et autres produits grand public peut contribuer à orienter la demande des particuliers vers des biens éco-conçus.

Un autre moyen envisageable est l'imposition de standards de transparence en matière de chaîne d'approvisionnement et des impacts environnementaux et sociaux des produits vendus en Europe.

Finalement, les travaux évoqués dans la recommandation 2 doivent permettre d'introduire des normes et standards spécifiques aux aimants permanents.

B. Limiter les risques industriels et exploiter les opportunités de la croissance de l'éolien

La forte croissance du marché de l'éolien et les importants investissements consentis par les industriels du secteur entraînent une sensibilité des industriels, et notamment des turbiniers, à l'activité du secteur. Il convient donc d'assurer un développement harmonieux de l'éolien, non seulement pour limiter ses impacts environnementaux et sociaux, mais également pour assurer la viabilité de la filière.

Le développement de la filière de l'éolien en mer peut permettre des retombées industrielles en France. Pour assurer ces retombées, une étude devrait être menée auprès des acteurs afin d'identifier de potentiels freins en matière de chaînes d'approvisionnement, les risques de goulot d'étranglement dans les espaces portuaires et la disponibilité des capacités de production des fondations et flotteurs, ainsi que des bateaux d'installation. Cette étude sera l'occasion d'évaluer le potentiel à l'export de la filière naissante qu'est l'éolien flottant, ainsi que l'attractivité du territoire français pour les industriels de l'éolien.

RECOMMANDATION 5 : FACILITER ET ACCOMPAGNER LA STRUCTURATION DE LA FILIÈRE DE L'ÉOLIEN EN MER EN FRANCE

Poursuivre les efforts de structuration de la filière éolienne en mer française et mener une étude pour identifier de potentiels freins au développement des industriels de l'éolien implantés sur le territoire.

L'atteinte des ambitieux objectifs de déploiement de l'éolien en France est rendue plus difficile par les questions d'acceptabilité⁸³ des nouveaux projets, mais le cadre réglementaire est aussi parfois jugé comme moins favorable que dans d'autres pays. L'AIE souligne dans son rapport de 2021 sur la France que la complexité administrative et le délai de certaines procédures ont pu être des raisons, parmi d'autres, d'un développement de l'éolien moins rapide en France que dans d'autres pays développés (AIE, 2021). Les temps de réalisation des projets sont ainsi plus longs en France que dans d'autres pays européens, ce qui augmente les risques pour les développeurs et leurs sous-traitants qui sont exposés à l'incertitude quant au devenir de leurs projets. Par ailleurs, le réseau très basse altitude de la Défense (RTBA), qui limite les constructions de plus de 90 m de haut peut constituer un frein à l'installation d'éoliennes dans certaines zones autrement propices.

Pour répondre à cet enjeu, la France a depuis plusieurs années entrepris des efforts pour améliorer et accélérer la mise en œuvre de la réglementation et permettre l'atteinte de ses objectifs en matière de déploiement d'énergies renouvelables⁸⁴ : loi d'accélération et simplification de l'action publique (ASAP) du 7 décembre 2020, l'autorisation environnementale unique, la suppression d'un degré de juridiction, etc. Ces efforts vont dans le sens d'une accélération du déploiement des projets et pourront être poursuivis à l'avenir.

⁸³ Mentionnées dans la mission d'information sur les freins à la transition énergétique en 2019.

⁸⁴ OECD (2021), OECD Economic Surveys: France 2021, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/289a0a17-en>

RECOMMANDATION 6 : SÉCURISER LA FILIÈRE DE L'ÉOLIEN PAR LE CADRE RÉGLEMENTAIRE

Poursuivre les efforts en matière de concertation et d'amélioration de l'acceptabilité des projets de parcs éoliens, notamment à travers la planification dans les territoires.

Encourager le recours au médiateur de l'éolien afin d'anticiper les difficultés liées aux nouveaux projets et favoriser leur résolution.

Poursuivre les efforts d'amélioration et de facilitation de la mise en œuvre de la réglementation afin d'accélérer le déploiement, de réduire les délais de réalisation des projets⁸⁵ et de sécuriser les perspectives industrielles de la filière.

Le *repowering* (reconception totale d'un parc éolien et remplacement intégral des machines) et le *revamping* (changement et optimisation de certaines pièces de l'éolienne, comme les pales ou la génératrice) de parcs déjà en service et en fin de vie, peuvent permettre l'augmentation des puissances éoliennes installées sans nécessiter de trouver de nouvelles zones propices. La possibilité d'optimiser les installations existantes permet aussi de limiter l'impact matière et environnemental du déploiement de l'éolien.

Néanmoins tous les parcs ne pourront pas bénéficier de *revamping*. La question du recyclage des éoliennes en fin de vie va donc se poser au cours des prochaines années, alors que les premiers parcs éoliens terrestres commencent à être démantelés.

Le recyclage des éoliennes en fin de vie peut permettre de limiter les impacts environnementaux de l'éolien, qui sont essentiellement engendrés par la fabrication des composants, tout en limitant la consommation de matières.

Parmi les composants des éoliennes, l'équipement électrique (générateur, câblage, sous-stations, etc.) doit être recyclé. Au-delà des aimants permanents que nous avons déjà évoqués, le cuivre est utilisé en grandes quantités et doit être recyclé en raison de son importance croissante (évoquée dans le rapport d'étape n°2 consacré aux réseaux électriques). En effet, le projet SURFER de l'Ademe évalue la consommation de cuivre de l'éolien terrestre installé à 7,6 tonnes par MW pour les génératrices à rotor bobiné, et à plus de 4 tonnes pour les génératrices synchrones à aimants permanents ou asynchrones.

Plusieurs projets, notamment portés par des acteurs français, existent afin de permettre le recyclage des pales, qui sont composées de polymères organiques. La fabrication et certains procédés de recyclage de ces polymères sont fortement énergivores. Le coût relativement moindre de l'énergie en France par rapport à d'autres pays européens peut constituer un avantage comparatif lors du choix des implantations industrielles. Par ailleurs, l'arrivée en fin de vie de nombreuses pales au cours des prochaines années pourrait engendrer des impacts environnementaux importants si ces déchets ne sont pas recyclés.

RECOMMANDATION 7 : RÉDUIRE L'IMPACT MATIÈRE DE L'ÉOLIEN PAR LE RECYCLAGE, LE REPPOWERING ET LE REVAMPING

Encourager le *repowering* et le *revamping* afin de limiter l'impact matière de l'augmentation de la puissance éolienne installée.

Augmenter les efforts de recyclage des éoliennes en fin de vie, particulièrement pour les composants électriques qui contiennent du cuivre et des aimants permanents, mais sans négliger les structures en acier et en béton.

Le recyclage des pales doit être encouragé et soutenu pour limiter les impacts environnementaux de leur enfouissement ou de leur destruction.

⁸⁵ Plus de détails et d'autres recommandations plus ciblées sont disponibles dans le rapport France 2021 de l'AIE, www.iea.org/reports/france-2021

C. Améliorer la connaissance de l'industrie des terres rares et anticiper les besoins en formation

Les travaux menés dans le cadre de ce groupe de travail se sont focalisés sur la chaîne de valeur des aimants permanents, à destination de l'éolien et de la mobilité électrique. Mais, d'autres secteurs sont consommateurs de terres rares et d'aimants permanents, comme l'électronique, la robotique, l'aéronautique, la défense, le médical et la chimie.

Nous recommandons donc d'étendre l'étude qui a été présentée dans ce rapport à ces secteurs, afin d'identifier la consommation et les besoins en terres rares de ces secteurs. Ces études s'intéresseront particulièrement aux terres rares lourdes et leurs usages, ainsi qu'aux synergies envisageables avec les procédés liés aux aimants permanents.

Afin de contribuer à la sécurisation des approvisionnements européens en produits utilisant les terres rares et de mieux intégrer la France dans les chaînes de valeur mondiales, il conviendra d'identifier à partir de ces études les points forts des industriels français, de les renforcer et de les valoriser vis-à-vis des acteurs industriels.

RECOMMANDATION 8 : AMÉLIORER LA CONNAISSANCE DES AUTRES FILIÈRES CONSOMMATRICES DE TERRES RARES

Poursuivre et étendre les travaux menés dans le cadre du présent groupe de travail aux autres industries utilisatrices de terres rares.

Identifier la consommation et les besoins en terres rares des entreprises de l'électronique, de la robotique, de l'aéronautique, de la défense, du médical et de la chimie, afin de mieux protéger et valoriser les domaines d'excellence des industriels français.

Réaliser des travaux de prospective stratégique du secteur afin d'identifier les enjeux futurs, anticiper les évolutions et évaluer la consommation de terres rares des différents secteurs utilisateurs.

Finalement, la problématique des compétences en adéquation avec les industries étudiées dans ce rapport apparaît sous deux angles. D'une part, la forte croissance du marché de l'éolien et la transformation que connaît l'industrie automobile modifient les compétences nécessaires au sein de ces industries. Les impacts en matière d'emplois et de retombées industrielles en France dépendront de la capacité à anticiper les évolutions en cours et à les accompagner par une offre de formations adéquates.

D'autre part, le large transfert des activités en chimie et en métallurgie des terres rares de la France à la Chine au cours des décennies précédentes a limité la transmission des compétences liées à ces activités. La mise en place de formations spécifiques serait un atout afin de faciliter l'implantation d'activités en lien avec le recyclage des aimants permanents, le traitement des terres rares et la production d'aimants en France. Ces formations pourraient bénéficier de l'expertise des spécialistes français qui ont été auditionnés et être adossées au CEA-Liten, qui dispose de compétences et d'une chaîne de production-pilote d'aimants permanents.

RECOMMANDATION 9 – IDENTIFIER ET RÉPONDRE AUX BESOINS EN FORMATION DES INDUSTRIES DES TERRES RARES, DES AIMANTS PERMANENTS, DE L'ÉOLIEN, DE L'AUTOMOBILE ET DU RECYCLAGE

Identifier les besoins en formation pour accompagner les évolutions des marchés et chaînes de valeur étudiés dans ce rapport.

Bibliographie

- Stephen E. Kesler, Adam C. Simon - *Mineral Resources, Economics and the Environment*- Cambridge University Press (2015).
- Carrara S., Alves Dias P., Plazzotta B. and Pavel C., *Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system*, EUR 30095 EN, Publication Office of the European Union, Luxembourg, 2020, ISBN 978-92-76-16225-4, doi:10.2760/160859, JRC119941.
- Alves Dias, P., Bobba, S., Carrara, S., Plazzotta, B. (2020), *The role of rare earth elements in wind energy and electric mobility*, EUR 30488 EN, Publication Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-79-27016-4, doi:10.2760/303258, JRC122671.
- Z.Q. Zhu and D. Howe, *Electrical machines and drives for electric, hybrid, and fuel cell vehicles. Proceedings of the IEEE*, 95:746–765, 2007.
- Austin Hugues, *Electric motors and drives* (3rd edition, 2006).
- Parag Jose, C., & Meikandasivam, S. (2016). *A Review on the Trends and Developments in Hybrid Electric Vehicles. Innovative Design and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering*, 211–229.
- Z., Mounir, El Hachemi Benbouzid, M., Senior Member, Diallo, D., *Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study*, IEEE, vol. 55, no. 6, pp. 1756- 1764, (November, 2006).
- Un-Noor et al, *A Comprehensive Study of Key Electric Vehicle (EV) Components, Technologies, Challenges, Impacts, and Future Direction of Development* (2017).
- Li S, *A Review of Electric Motor Drives for Applications in Electric and Hybrid Vehicles* (2017).
- Ministère de la Transition écologique, *Plan de libération des énergies renouvelables* (2018).
- Agence internationale de l'énergie, *Global EV Outlook 2020*.
- Adamas, *Electric Growth : EVs, Motors and Motor Materials* (2019).
- Seck, G.S., Hache, E., Simoën, M., Bonnet, C., Carcanague S., (2020), *Copper at the crossroads: Assessment of the interactions between low-carbon energy transition and supply limitations*, Resources, Conservation & Recycling, 163, December.
- JRC, CRM factsheets 2020.
- Nicolas Charles, Johann Tuduri, Gaétan Lefebvre, Olivier Pourret, Fabrice Gaillard, et al. *Ressources en terres rares de l'Europe et du Groenland: un potentiel minier remarquable mais tabou ? Sophie Decréé; Philippe Boulvais. Ressources métalliques : cadre géodynamique et exemples remarquables*, ISTE Science Publishing Ltd; Wiley, 2021. hal-03138953.
- Josefine Marx, Andrea Schreiber, Petra Zapp and Frank Walachowicz, *Comparative Life Cycle Assessment of NdFeB Permanent MagnetProduction from Different Rare Earth Deposits*, (2018).
- Bailey, G., Joyce, P. J., Schrijvers, D., Schulze, R., Sylvestre, A. M., Sprecher, B., Vahidi, E., Dewulf, W., Van Acker, K. 2020. *Review and new life cycle assessment for rare earth production from bastnäsite, ion adsorption clays and lateritic monazite*. Resour. Conserv. Recycl., 155 (2020), p. 104675, 10.1016/j.resconrec.2019.

- Nuss, P., Eckelman, M.J. 2014. *Life cycle assessment of metals: a scientific synthesis*. PLoSOne. 2014;9(7):e101298. Published 2014 Jul 7.
- Pigneur, J. 2019. *Mise au point d'une méthode intégrée d'analyse des impacts des filières de matières premières minérales. Gestion et management*. Université Paris Saclay (COMUE), 2019. Français. (NNT : 2019SACL093).
- Findeiß, M., & Schäffer, A. (2017). *Fate and Environmental Impact of Thorium Residues During Rare Earth Processing*. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 3(1), 179-189.
- Open Research Exeter, University of Exeter *Responsible sourcing of rare earths: Exploration-stage intervention including life cycle assessment*, November 2020.
- Huang, X., G. Zhang, A. Pan, F. Chen, and C. Zheng. 2016, *Protecting the environment and public health from rare earth mining*, *Earth's Future*, 4, 532–535.
- Wind Europe, *Offshore wind in Europe, key trends and statistics* (2020).
- Wind Europe 2020 Statistics.
- Ademe, *Éolien offshore : analyse des potentiels industriels et économiques en France*, 2019.
- Fondation pour la recherche sur la biodiversité, *Énergie renouvelable et biodiversité : les implications pour parvenir à une économie verte*, 2017.
- Conseil national de la protection de la nature, *Autosaisine sur le développement de l'énergie offshore en France et ses impacts sur la biodiversité, le patrimoine naturel et les paysages*, 6 juillet 2021.
- Ministère de la Transition écologique, *Dix mesures pour un développement maîtrisé et responsable de l'éolien* (octobre 2021).
- Ligue de protection des oiseaux, *Le parc éolien français et ses impacts sur l'avifaune*.
- Ademe, *Impacts environnementaux de l'éolien français*, 2015.
- CGDD/SDES, *Chiffres clés des énergies renouvelables – Édition 2021*, Datalab, 2021.
- FEE et Capgemini, *Observatoire de l'éolien*, 2020.
- A. König et al, *An Overview of Parameter and Cost for Battery Electric Vehicles* (2021).
- McKinsey, *Electromobility's impact on powertrain machinery*, 2021.
- Roland Gauß, Carlo Burkhardt, Frédéric Carencotte, Massimo Gasparon, Oliver Gutfleisch, Ian Higgins, Milana Karajić, Andreas Klossek, Maija Mäkinen, Bernd Schäfer, Reinhold Schindler, Badrinath Veluri, *Rare Earth Magnets and Motors: A European Call for Action. A report by the Rare Earth Magnets and Motors Cluster of the European Raw Materials Alliance*. Berlin 2021.
- Pavel, C. C., Lacal-Arántegui, R., Marmier, A., Schüler, D., Tzimas, E., Buchert, M., Blagoeva, D. (2017). *Substitution strategies for reducing the use of rare earths in wind turbines*. *Resources Policy*, 52, 349–357. doi:10.1016/j.resourpol.2017.04.010.
- Julien Dive, Bruno Duvergé, *Mission d'information sur les freins à la transition énergétique*, 2019.
- OECD (2021), *OECD Economic Surveys: France 2021*, OECD Publishing, Paris.
- Thaker, M., A. Zambre and H. Bhosale (2018), *Wind farms have cascading impacts on ecosystems across trophic levels*, *Nature Ecology & Evolution*, Vol. 2/12, pp. 1854-1858, <http://dx.doi.org/10.1038/s41559-018-0707-z>.

Abréviations et sigles

ACV	Analyse de cycle de vie
AIE	Agence internationale de l'énergie
AP	Aimant permanent
BGS	<i>British geological survey</i> - institut d'études géologiques britannique
BRGM	Bureau de recherches géologiques et minières
Cu	Cuivre
DMA – drainage minier acide	Le drainage minier acide (DMA) ou encore drainage rocheux acide (DRA) est un phénomène de production d'une solution minérale acide qui s'écoule régulièrement, à la suite d'une production d'acide sulfurique induite par la mise en contact avec l'air de certains minéraux (sulfures métalliques), généralement à l'occasion de grandes excavations (carrières) et travaux miniers ou de stockage de déchets miniers
Dy	Dysprosium
eq/t	Équivalent par tonne
ERMA	<i>European Raw Materials Alliance</i>
Fe	Fer
gCO₂eq/kWh	En équivalent de grammes de CO ₂ émis par kWh produit
GE	General Electric
GES	Gaz à effet de serre
Ifpen	IFP Énergies nouvelles
IPCEI, PIEEC	<i>Important Projects of Common European Interest</i> – Projet important d'intérêt européen commun
JRC	<i>Joint Research Centre</i> (Centre de recherche commun de la Commission européenne)
kgCO₂-eq	En équivalent kilogrammes de CO ₂
kt	Milliers de tonnes
LME	London Metal Exchange
Mt	Millions de tonnes
Nd	Néodyme
NdPr	Néodyme-praséodyme
Ni	Nickel
OTR	Oxydes de terres rares
Pr	Praséodyme
SDES	Service de la donnée et des études statistiques (service statistique des ministères chargés de l'environnement, de l'énergie, de la construction, du logement et des transports)
Tb	Terbium
TR	Terres rares, notamment néodyme, praséodyme, dysprosium, terbium, etc.
USGS	<i>US geological survey</i> - institut d'études géologiques des États-Unis

TABLE DES MATIÈRES

RAPPEL DU CONTEXTE	8
SYNTHÈSE	9
INTRODUCTION	12
I. Les machines électriques et les principes de l'éolien.....	13
A. Les différents types de machines électriques	14
1. Les machines à courant continu.....	15
2. Les machines synchrones	17
3. Les machines asynchrones	18
B. Principes de fonctionnement et technologies de l'éolien	21
1. Principes de fonctionnement	21
2. Technologies et composants de la nacelle	23
3. Les filières de l'éolien : terrestre, en mer posé, en mer flottant	25
a) L'éolien terrestre	25
b) L'éolien en mer posé.....	25
c) L'éolien en mer flottant	27
C. Les moteurs et les systèmes de propulsion des véhicules électriques	29
II. Le marché de l'éolien, la demande en matières de la filière et la demande en terres rares pour la propulsion électrique.....	35
A. Le marché de l'éolien	36
1. Un marché en forte expansion au niveau mondial et particulièrement en Europe	36
2. La France, un marché majeur et des objectifs ambitieux.....	37
a) Le cadre réglementaire en France.....	37
b) Le marché français.....	39
B. Projections de la demande en matières pour l'éolien	41
1. Présentation du modèle MEETIS, scénarios et hypothèses.....	41
2. Résultats généraux sur les consommations en matériaux à horizon 2050.....	42
3. Résultats spécifiques aux terres rares	46
C. Le marché du véhicule électrique et projection du besoin en terres rares et cuivre pour sa motorisation.....	47
1. Le marché du véhicule électrique.....	47
2. Les moteurs utilisés pour la propulsion des véhicules électriques	48
3. Projection du besoin en terres rares et en cuivre	50
D. Conclusion des parties I et II	52
III. Analyse des vulnérabilités le long de la chaîne de valeur des aimants permanents : application à l'éolien	55
A. Les terres rares	57
1. Présentation et usages	57
2. Mécanismes de marché et risques d'approvisionnement en terres rares.....	58
3. Offre de terres rares	60
a) Gisements et extraction minière.....	60
b) Raffinage et purification	61
c) Nouveaux projets et gisements	63
d) Sources secondaires et recyclage	65

B. Les impacts environnementaux et sociaux de l'exploitation des terres rares	67
1. Néodyme et praséodyme – terres rares légères dans des gisements de « roches dures »	67
a) Empreinte carbone	67
b) Résidus de traitement à Bayan Obo, hors contamination des éléments radioactifs	67
c) Contamination aux éléments radioactifs	68
d) Consommation d'énergie primaire.....	68
e) Consommation directe d'eau	68
f) Occupation et changement d'affectation des sols	68
g) Risques sanitaires et sociaux à Bayan Obo	69
h) Les conditions de travail	69
2. Le dysprosium (TR lourdes dans des gisements d'argiles ioniques en Chine)	69
a) Empreinte carbone	69
b) Résidus de traitement	69
c) Émissions directes dues à la lixiviation <i>in situ</i>	69
d) Consommation d'énergie primaire.....	69
e) Consommation directe d'eau	70
f) Occupation et changement d'affectation des sols	70
g) Risques sanitaires et sociaux	70
h) Conditions de travail	70
3. Bilan des points de vigilance des impacts environnementaux et sociaux des TR.....	70
C. Les aimants permanents	72
D. L'éolien.....	74
1. L'industrie de l'éolien	74
a) Les producteurs de turbines : l'émergence d'acteurs chinois sur les marchés occidentaux	74
b) La chaîne logistique de l'éolien en mer	78
c) Les pales.....	78
2. Les risques environnementaux et sociaux de l'éolien	79
a) Les impacts environnementaux de l'éolien sur la biodiversité.....	79
b) Les autres impacts environnementaux de l'éolien : ACV de l'éolien	81
c) Les risques sociaux liés à l'éolien	84
IV. Les opportunités industrielles.....	89
A. La chaîne des terres rares et le recyclage des aimants permanents.....	91
1. Historique.....	91
2. L'industrie des terres rares lourdes en France.....	91
3. Les entreprises françaises portent des projets émergents pour le recyclage des aimants permanents....	92
B. L'industrie éolienne en France	94
1. Poids de la filière éolienne et emplois en France.....	94
2. Les entreprises françaises de l'industrie éolienne.....	95
3. Innovation et R&D	97
C. Les moteurs électriques	99
1. L'électrification est une rupture pour les industriels de l'automobile.....	99
2. Les impacts pour la filière.....	100
3. Des entreprises françaises impliquées dans la production ou l'assemblage de moteurs de traction électriques	101

V. Recommandations.....	103
A. Sécuriser l'approvisionnement en aimants permanents et en terres rares	105
Recommandation 1 : renforcer la coopération européenne des acteurs de la chaîne de valeur des aimants permanents au sein du cluster « <i>Rare Earth Magnets and Motors</i> » de l'European Raw Materials Alliance.....	105
Recommandation 2 : intensifier les efforts de R&D et de collecte de connaissance sur le marché des aimants permanents.....	106
Recommandation 3 : sécuriser le gisement des aimants permanents usagés en Europe pour son recyclage	107
Recommandation 4 : encourager l'écoconception dans les industries utilisatrices d'aimants permanents	107
B. Limiter les risques industriels et exploiter les opportunités de la croissance de l'éolien	108
Recommandation 5 : faciliter et accompagner la structuration de la filière de l'éolien en mer en France ..	108
Recommandation 6 : sécuriser la filière de l'éolien par le cadre réglementaire.....	109
Recommandation 7 : réduire l'impact matière de l'éolien par le recyclage, le <i>repowering</i> et le <i>revamping</i> ..	109
C. Améliorer la connaissance de l'industrie des terres rares et anticiper les besoins en formation	110
Recommandation 8 : améliorer la connaissance des autres filières consommatrices de terres rares	110
Recommandation 9 : identifier et répondre aux besoins en formation des industries des terres rares, des aimants permanents, de l'éolien, de l'automobile et du recyclage	110
Bibliographie	111
ABRÉVIATIONS ET SIGLES.....	113

Photo de couverture :
Parc éolien offshore © Thomas G / Pixabay

