

AVIS TECHNIQUE

Oct
2020

Terres rares, énergies renouvelables et stockage d'énergie

Ce qu'il faut retenir

Les terres rares constituent un ensemble d'éléments métalliques du tableau périodique des éléments, aux propriétés chimiques très voisines. Contrairement à ce que leur nom peut laisser supposer, ces éléments ne sont pas rares et leur criticité est principalement liée au quasi-monopole actuel de la Chine pour leur extraction et leur transformation. La Chine réalisait environ 86 % de la production mondiale de terres rares en 2017.

L'extraction des terres rares présente, comme toute extraction minière et procédé de transformation métallurgique, des impacts environnementaux. La spécificité environnementale de l'extraction des terres rares par rapport à d'autres métaux vient de la présence de thorium et d'uranium dans les gisements dits « de roches » qui induisent une pollution radioactive des différents rejets.

En raison de leurs propriétés, les applications des terres rares sont multiples ; on les retrouve notamment dans les aimants permanents utilisés pour réduire le volume et le poids de certains moteurs et générateurs électriques. La consommation de terres rares dans le secteur de la production d'énergies renouvelables réside essentiellement dans l'utilisation d'aimants permanents pour l'éolien en mer. Seule une faible part d'éoliennes terrestre en utilise, environ 6 % en France. A un horizon de 10 ans, selon une capacité éolienne en mer projeté à 120 GW dans le monde, et au regard de la production annuelle mondiale de terres rares, le besoin représente moins de 6 % de la production annuelle en néodyme et plus de 30 % de la production de dysprosium. Dans ce contexte, un fabricant propose déjà des éoliennes n'utilisant pas d'aimants permanents pour une implantation en mer, sachant que des solutions de substitutions existent déjà : générateurs asynchrones ou synchrones sans aimant permanent, par exemple.

Les technologies solaires photovoltaïques actuellement commercialisées n'utilisent pas de terres rares. Parmi les batteries couramment utilisées, seules les batteries nickel-hydrure métallique (NiMH) comprennent un alliage de terres rares à la cathode, mais leur utilisation restera très marginale dans la transition énergétique.

A notre connaissance, aucune autre technologie de conversion des énergies renouvelables n'utilise les terres rares de manière significative.

1. Introduction : Contexte & Enjeux

1.1. Les terres rares d'un point de vue chimique

Les terres rares constituent un ensemble de **15 à 17 éléments métalliques** du tableau périodique des éléments, aux **propriétés chimiques très voisines**, qui se trouvent pratiquement toujours associés dans leurs gisements dans la nature, et qui regroupent :

- le groupe des **lanthanides** (les 15 éléments de numéros atomiques compris entre 57 et 71, du lanthane au lutécium),
- **l'yttrium** (Y, numéro atomique 39), dont les propriétés (atomiques et chimiques) sont proches de ceux des lanthanides et qui s'y trouve toujours associé dans leurs différents gisements.

Certains auteurs ajoutent le **scandium** (Sc, numéro atomique 21) au groupe des terres rares. Toutefois, le scandium ne se concentre pas dans les mêmes gisements, sa problématique d'approvisionnement est distincte de celle des autres terres rares.

1.2. Les gisements de terres rares

Malgré leur nom, les éléments constituant les terres rares ne sont pas rares. Ce sont des éléments relativement abondants dans la croûte terrestre pour certains (lanthane, néodyme, cérium qui représentent 90 % de la production de terres rares dans le monde) avec la même présence que le cuivre, le plomb ou le zinc, mais un faible nombre de minéraux sont constitués de ces éléments et leurs gisements (concentrations naturelles à des niveaux économiquement exploitables) sont très localisés. Par ailleurs, la séparation de ces éléments entre eux est difficile du fait de propriétés chimiques proches.

Tableau 1 : Production minière par oxyde de terres rares (OTR) estimée pour 2012, à +/-15 %, publiée par l'Ad-Hoc Working Groupe sur les métaux critiques de la Commission Européenne en mai 2014, citant Roskill et IMCOA (2013) et USGS pour l'Australie

OTR	Chine	Etats-Unis	Inde	Russie	Australie	Total	%
La ₂ O ₃	29.32 kt	2.66 kt	0.17 kt	0.70 kt	1.04 kt	33.89 kt	25.9%
CeO ₂	41.88 kt	3.93 kt	0.36 kt	1.44 kt	2.04 kt	49.65 kt	37.9%
Pr ₆ O ₁₁	5.70 kt	0.35 kt	0.04 kt	0.10 kt	0.16 kt	6.34 kt	4.8%
Nd ₂ O ₃	19.75 kt	0.96 kt	0.14 kt	0.22 kt	0.60 kt	21.67 kt	16.5%
Sm ₂ O ₃	2.47 kt	0.064 kt	0.020 kt	0.024 kt	0.072 kt	2.65 kt	2.0%
Eu ₂ O ₃	0.34 kt	0.008 kt		0.003 kt	0.016 kt	0.37 kt	0.3%
Gd ₂ O ₃	2.22 kt	0.014 kt	0.009 kt	0.005 kt	0.040 kt	2.28 kt	1.7%
Tb ₄ O ₇	0.34 kt	0.002 kt		0.002 kt	0.004 kt	0.35 kt	0.3%
Dy ₂ O ₃	1.35 kt	0.002 kt		0.002 kt	0.008 kt	1.36 kt	1.0%
Er ₂ O ₃	0.86 kt			0.002 kt	0.008 kt	0.87 kt	0.7%
Ho ₂ O ₃ , Tm ₂ O ₃ , Yb ₂ O ₃ , Lu ₂ O ₃	1.72 kt		0.008 kt	0.011 kt	0.010 kt	1.74 kt	1.3%
Y ₂ O ₃	9.92 kt	0.008 kt			0.002 kt	9.93 kt	7.6%
Total	115.85 kt	8.00 kt	0.75 kt	2.50 kt	4.00 kt	131.10 kt	

En 2017, les réserves étaient estimées à 120 millions de tonnes¹ tous oxydes de terres rares confondus. Il est difficile de d'évaluer les ressources connues car les principales données concernées proviennent de pays dont les systèmes d'évaluation

¹ Mineral commodity summaries 2019, USGS.

minières et statistiques ne sont pas fiables. Cependant, il est possible d'estimer les ressources à plus de 350 millions de tonnes selon plusieurs références².

Les terres rares sont divisées en deux groupes : les terres rares légères³ (dont le néodyme qui entre dans la composition des aimants permanents de type NdFeB – Néodyme-Fer-Bore) et les terres rares lourdes (dont le dysprosium qui vient du grec dus-prósitos, « difficile à obtenir » et se trouve également dans l'aimant permanent NdFeB). L'ensemble des différentes terres rares se retrouve généralement dans les différents minerais, mais les terres rares lourdes sont toujours en teneurs plus faibles que les légères (en général, les terres rares lourdes représentent chacune moins de 1 % du total des terres rares contenues dans les minerais, alors que 3 des terres rares légères sont en général présentes entre 18 et 50 % chacune), excepté dans certains gisements caractérisés par des teneurs en terres rares lourdes plus fortes (mais au maximum 7 %).

Les terres rares lourdes sont ainsi plus critiques que les terres rares légères.

Les terres rares sont extraites conjointement dans les minerais puis séparées par des procédés chimiques en fonction des usages. L'équilibre économique de la chaîne d'extraction s'appuie sur la valorisation de chacune des terres rares, ce qui induit le fait que chaque terre rare constitue un co-produit des autres. Le tiers de la valeur des terres rares extraites dans le monde provient du néodyme, essentiellement utilisé dans les aimants.

Dans certaines exploitations, les terres rares peuvent être un sous-produit (du fer notamment, pour le plus grand gisement mondial en exploitation en Chine) mais cela reste une exception géologique. Dans tous les cas, la criticité des terres rares n'est pas liée à leur rareté physique dans la croûte terrestre ou à leurs modalités d'exploitation. Elle est essentiellement due à la mauvaise répartition géographique des extractions actuelles, qui se trouvent majoritairement en Chine, ce qui induit un risque d'approvisionnement.

La Chine est le premier pays producteur de terres rares, avec environ 86 % de la production mondiale en 2017 (source : Roskill, 2018). Les autres pays producteurs sont principalement l'Australie (dont les minerais sont traités en Malaisie et en Chine) et les Etats-Unis⁴ qui ont été le premier producteur mondial jusqu'au début des années 1990. La Chine compte globalement entre un tiers et la moitié des réserves mondiales mais certains de ses gisements sont plus riches en terres rares lourdes. L'un des grands gisements mondiaux potentiel se situe au Groenland, dans l'exploitation duquel les Chinois ont pris des participations. A noter que des études estiment que jusqu'en 2013, environ la moitié de la production chinoise de certaines terres rares (notamment le dysprosium) faisait l'objet d'exploitations illégales non contrôlées. Cette production aurait baissé de plus de 30 % depuis, la Chine ayant pour objectif d'éradiquer ce type d'exploitation non contrôlée qui induit une importante dégradation des sols. La lutte de l'Etat chinois contre ces pratiques aurait fait baisser la production de dysprosium de 34 % entre 2013 et 2017.

1.3. Les applications

² Adamas Intelligence. (2019). Rare Earth Elements: Small Market, Big Necessity ; Geoscience Australia. (2019). *Australia's identified mineral resources 2018*.

³ Le classement entre terre rare légère ou lourde varie selon les auteurs. Pour tous, les lanthanides de faible numéro atomique (lanthane, cérium, praséodyme, néodyme) sont généralement classés dans les terres rares légères, et ceux de numéro atomique élevé (terbium, dysprosium, holmium, erbium, thulium, ytterbium, lutécium) dans les terres rares lourdes.

⁴ Aux Etats-Unis, on compte une seule mine exploitée par Molycorp, dont l'exploitation a repris en 2012 après 10 ans d'arrêt. La production a été suspendue en août 2015, puis mi-2016 les activités nord-américaines de la société étaient en faillite. L'extraction du minerai a repris en janvier 2018, avec pour partie des capitaux chinois, pour un traitement des minerais en Chine.

En raison de leurs propriétés, les applications des terres rares sont multiples ; voici les principales :

- Aimants permanents (utilisés pour réduire le volume et le poids des moteurs et générateurs électriques)
- Catalyse (pots catalytiques des voitures, craquage pétrolier...)
- Polissage du verre (notamment pour les écrans)
- Certaines batteries
- Certains alliages métallurgiques
- Industries du verre et des céramiques (coloration, décoloration...)
- Des luminophores (lampes, écrans...)
- Les lasers de puissance
- Mais aussi l'imagerie médicale, l'énergie nucléaire, la défense...

1.4. Le contexte économique et politique

Le contexte politique lié aux terres rares s'est tendu au début de la décennie 2010, suite à la mise en place par la Chine de contraintes et de restrictions à l'exportation (quotas d'exportation, taxes à l'exportation etc.), engendrant également une envolée des prix. En 2012, l'UE, les États-Unis et le Japon ont déposé une plainte auprès de l'OMC sur ces pratiques : ils ont obtenu gain de cause en mars 2014, et la Chine a supprimé ses quotas et taxes à l'exportation en 2015. De 3 000 \$/kg en 2011, les prix de l'oxyde de dysprosium sont rapidement redescendus pour se stabiliser autour de 250 \$/kg depuis mi-2016. Cependant, la Chine maintient un quota de production. Cette situation a déclenché de nombreuses recherches minières, augmentant les ressources connues, mais au cours actuel des terres rares, la concrétisation des projets est très aléatoire.

Aujourd'hui, le **recyclage des terres rares est estimé à moins de 1 % des déchets produits et concerne essentiellement les déchets de fabrication**. Le recyclage de produits en fin de vie est rendu difficile par des quantités souvent très faibles ou intimement mélangées à des impuretés dans les produits finaux. L'équilibre économique des filières de recyclage est difficile aux prix actuels du marché des terres rares. Par exemple Rhodia, qui avait démarré un recyclage industriel, de dimension mondiale, des luminophores (phosphates de terres rares utilisés dans les lampes fluorescentes) en France en 2011, l'a arrêté début 2016.

1.5. Terres rares et criticité

Les terres rares sont à distinguer des matériaux et métaux critiques.

Ces premières constituent un ensemble d'éléments chimiques, dont le nom leur avait été donné à l'époque de leur découverte où l'on pensait que ces éléments étaient en effet rares.

Les matières premières critiques sont toutes les substances ou matières répondant à un ensemble de critères de criticité, dont la liste peut varier dans le temps et suivant le pays. Les terres rares ne sont donc pas rares, toutefois elles sont critiques pour l'Europe par exemple mais pas pour la Chine qui applique depuis les années 80 une politique stratégique de long terme pour l'ensemble des matières premières dont les terres rares.

La liste des matières critiques de la Commission européenne comprend 27 matières premières⁵, dont les terres rares lourdes (très critiques), les terres rares légères (moins critiques), mais aussi l'indium ou encore l'antimoine. Les critères d'élaboration

⁵ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52017DC0490>

de cette liste sont, entre autres, l'intérêt stratégique pour l'économie, la concentration de la production ou encore la substituabilité des matières. Pour certains matériaux, comme le silicium métal, l'appréciation de la criticité par la Commission européenne diffère de celle d'experts français⁶.

1.6. Terres rares et impacts environnementaux

L'extraction des terres rares présente comme toute extraction minière et procédé de transformation métallurgique des impacts environnementaux. L'extraction, actuellement toujours à ciel ouvert pour les terres rares, modifie le paysage, les sols et le régime hydrographique local. Les impacts diffèrent suivant les types de gisement. Pour les gisements dits « de roches dures » (exploitant des minerais de monazite, de bastnäsité ou de xénotime), plutôt concentrés en terres rares légères, 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'appuyant sur des traitements pyro/hydro métallurgiques conduisent à rejeter des résidus de traitement polluants, soit dans l'air (du fluor notamment), soit dans des lagunes affectant les eaux souterraines (avec des effluents chimiques). Ces gisements ont la particularité de contenir du thorium et de l'uranium induisant une pollution radioactive des différents rejets. Pour les gisements dits « d'argiles ioniques », exclusivement présents en Chine, les mines sont de tailles plus faibles. Cependant, s'agissant de concentrations de surface, elles dégradent des surfaces importantes mais ne rejettent pas de poussières ni de thorium ou d'uranium. L'extraction du minerai et la séparation des terres rares génèrent elles aussi des effluents chimiques. Par ailleurs les effets des terres rares et de leurs composants sur la santé humaine sont assez peu étudiés, même si des effets neurotoxiques de certains composants chimiques ont été signalés.

2. Les terres rares et les énergies renouvelables

2.1. L'utilisation des terres rares dans les filières de production d'énergie renouvelable

Les énergies renouvelables n'utilisent, pour la plupart, pas de terres rares. La consommation de terres rares dans ce secteur réside essentiellement dans l'utilisation **d'aimants permanents pour certains segments de marchés de l'éolien (essentiellement pour l'éolien en mer), de faible taille actuellement, mais en forte croissance.** A notre connaissance, aucune autre technologie de conversion des énergies renouvelables n'utilise les terres rares de manière significative.

Les technologies solaires photovoltaïques actuellement commercialisées n'utilisent pas de terres rares. Certaines utilisent des métaux qui peuvent être critiques - comme le tellure, l'indium et l'argent pour les couches minces et l'antimoine et l'argent pour la filière silicium - mais il ne s'agit pas de terres rares. Le silicium est considéré comme critique par l'Union européenne, mais pas par la France qui en est le 5^e producteur mondial ; les réserves mondiales de silicium sont importantes, s'agissant du deuxième élément le plus abondant de la croûte terrestre. L'ADEME estime l'utilisation d'argent et d'antimoine moins critique, ces éléments étant substituables.

Les éoliennes produisent du courant via un alternateur, qui peut être un générateur synchrone ou asynchrone. Les générateurs synchrones à aimants permanents (*permanent magnet generator*, PMG) sont apparus dans les années 2000 pour, entre autres, améliorer les rendements de conversion, réduire le poids et les besoins de maintenance, et allonger la durée de vie des systèmes. Seules les éoliennes à aimants permanents utilisent des terres rares. Cependant, tous les générateurs synchrones ne contiennent pas des aimants permanents (c'est le cas des générateurs bobinés d'Enercon). Les

⁶ BRGM : http://www.mineralinfo.fr/sites/default/files/upload/documents/Fiches_criticite/fichecriticitesiliciummetal-publique20190729.pdf

quantités d'aimants permanents intégrées dans les générateurs synchrones varient en fonction du mode de transmission de la chaîne cinématique :

- Entraînement direct sans multiplicateur (*direct-drive* PMG-DD)
- Semi-rapide avec un étage de multiplication (*medium speed* PMG-MS) ;
- Rapide avec un multiplicateur comprenant plusieurs étages de multiplication (*high-speed* PMG-HS).

Une étude de la Commission Européenne⁷ aboutit aux chiffres suivants :

Tableau 2 : Masse d'aimants permanents selon le type de générateur (Pavel et al. 2017)

Typologie de générateurs à aimants permanents	Masse d'aimants permanents [kg/MW]
Entraînement direct (PMG-DD)	650
Semi-rapide (PMG-MS)	160
Rapide (PMG-HS)	80

Ces aimants contiennent principalement du néodyme, mais aussi du dysprosium, qui sont des terres rares. Le dysprosium étant beaucoup plus rare dans les gisements que le néodyme⁸. Or, le dysprosium est également l'élément fondamental car c'est lui qui garantit aux aimants permanents de bonnes performances électromagnétiques lorsque les températures sont élevées.

Cette même étude propose la composition typique des aimants permanents en terres rares :

Tableau 3 Composition typique des aimants permanents en terres rares (Pavel et al. 2017)

Élément	Pour 1 kg d'aimants permanents
Néodyme – Praséodyme (< 1 %)	29 – 32 %
Dysprosium	3 – 6 %

Les éoliennes à aimants permanents sont toutefois très peu répandues dans l'éolien terrestre en France. D'après les données des éoliennes raccordées au réseau électrique français au 31 décembre 2019, 387 aérogénérateurs totalisant une capacité installée de 1 020 MW contiennent des aimants permanents, ce qui représente 6,2% de la capacité installée totale du parc éolien français. Parmi celles-ci, les éoliennes embarquant des générateurs à aimants permanents à entraînement direct (soit celles qui contiennent le plus de terres rares) représentent 510 MW soit 3,1% du parc éolien français fin 2019.

La masse d'aimants permanents nécessaires à tout le parc éolien français installé fin 2019 (16,5 GW, terrestre), selon la composition indiquée ci-avant, est estimée à 372 tonnes, ce qui représente environ 112 tonnes de néodyme et 17 tonnes de dysprosium, soit au total moins de 2 % du marché annuel mondial de chacun de ces éléments⁹ (2 % pour le dysprosium et moins de 0,5 % pour le néodyme).

⁷ Claudiu C. Pavel, et al, 2017, Substitution strategies for reducing the use of rare earths in wind turbines, Resources Policy, DOI 10.1016.

⁸ La part d'oxydes de dysprosium consommée dans le monde est de 1,0 % du total des oxydes de terres rares tandis que la part de l'oxyde de néodyme est de 16,5 % (Tableau 1).

⁹ Demande mondiale annuelle Nd : 25 700 tonnes (2015). Demande mondiale annuelle Dy : environ 854 tonnes en 2014 (fiche criticité BRGM 2016 citant Roskill 2015).

L'analyse du marché des turbines à venir pour l'éolien terrestre, qui va présenter des rotors de diamètres supérieurs à 130 m et des capacités unitaires supérieures à 4 MW, ne montre pas un besoin nettement plus important en aimants permanents. En effet, les constructeurs ont anticipé la problématique suite à la flambée des prix du dysprosium en 2011 en proposant des technologies plutôt classiques même sur les machines les plus puissantes (Nordex). Les constructeurs qui développent des technologies à aimants permanents des éoliennes de nouvelles générations proposent aussi des technologies asynchrones (Siemens Gamesa) ou sans dysprosium (Enercon) ou associées à un multiplicateur de vitesse pour limiter les quantités d'aimants (Vestas). **La problématique de l'utilisation des aimants permanents a donc été bien prise en compte par les constructeurs. Ce n'est donc pas un sujet critique pour les éoliennes terrestres.**

Le marché de l'éolien en mer est en forte croissance mais devrait rester minoritaire dans les années et décennies à venir (moins de 20 % du marché global de l'éolien à l'horizon 2030¹⁰) ; toutefois, les derniers modèles d'éoliennes en mer (pour des puissances par machine de 6 à 12 MW) utilisent pour beaucoup des aimants permanents : ceci leur permet de réduire les coûts des opérations de maintenance, mais également de réduire la masse et l'encombrement des nacelles, permettant ainsi de diminuer le dimensionnement global du mât et des fondations. Cependant, d'autres technologies utilisant moins d'aimants permanents sont déjà développées pour l'éolien en mer (par exemple par MHI Vestas).

La capacité des premiers parcs d'éoliennes en mer à installer en France avant 2026 est de 3 623 MW. Ceci comprend les 4 parcs attribués lors du 1^{er} appel d'offres (Courseulles, Fécamp, Saint Nazaire, Saint Brieuc), les 2 parcs attribués lors du 2^{ème} appel d'offres (Dieppe Le Tréport, Yeu et Noirmoutier), les quatre fermes pilotes éoliennes flottantes et le parc de Dunkerque attribué en 2019.

La masse totale d'aimants permanents nécessaire, selon la composition proposée dans le tableau 2, et sous l'hypothèse que tout le parc français utilise une technologie à aimants permanents à attaque directe (pour le parc français, le ratio est d'environ 638 kg/MW d'aimants permanents), est d'environ **2 312 tonnes** dont **705 tonnes de néodyme** et **104 tonnes de dysprosium**.

Si on se réfère aux prospectives de la PPE, on peut estimer que la capacité totale installée en mer à l'horizon 2028 s'établira autour de 5,7 GW, ce qui correspond à un besoin annuel d'aimants permanents de 463 t/an (sous l'hypothèse que tout le parc français utilise une technologie à aimants permanents à attaque directe). Ce besoin annuel se décline en 141 t/an en néodyme et 21 t/an en dysprosium.

Cette demande totale pour le marché français couvrant 8 années doit être mise en parallèle de la demande mondiale annuelle qui s'établit actuellement à 25 700 tonnes en 2015¹¹ pour le néodyme (l'élément et non sous forme d'oxyde) et à 854 tonnes en 2014¹² pour le dysprosium (l'élément et non sous forme d'oxyde). Elle représente moins de 1 % de la demande annuelle en néodyme et un peu moins de 4 % de la demande annuelle en dysprosium.

Concernant le besoin mondial en terres rares pour le développement de l'éolien en mer, nous prenons comme hypothèse :

- 80 % de part de marché à 650 t/GW d'aimants permanents (PMG-DD)
- 20 % de part de marché à environ 150 t/GW d'aimants permanents (PMG-MS)
- 120 GW d'éolien en mer à installer dans le monde en 12 ans (à l'horizon 2030) or 23 GW ont déjà été installés en date de 2018.

Ceci aboutit à un besoin annuel en aimants permanents de 4 462 t/an se déclinant en 1 428 t/an en néodyme et 268 t/an en dysprosium. Au regard de la production annuelle mondiale de terres rares, ce besoin représente moins de 6 % de la production annuelle en néodyme et plus de 30 % de la production annuelle en dysprosium.

¹⁰ IRENA (2014), REmap 2030: A Renewable Energy Roadmap, Summary of Findings, June 2014. IRENA, Abu Dhabi. www.irena.org/remap

¹¹ BRGM Panorama du marché des terres rares 2016, citant Kingsnorth 2016.

¹² BRGM, Fiche de synthèse sur la criticité des métaux - Le dysprosium, 2016 citant Roskill 2015.

2.2. L'utilisation des terres rares dans les dispositifs de stockage de l'énergie renouvelable

L'usage du stockage stationnaire d'énergie en France réside essentiellement dans les lacs d'éclusés, barrages avec réservoirs et stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) pour le stockage massif et les batteries au plomb pour les usages de secours. Pour autant, dans une perspective à long terme de forte pénétration des énergies renouvelables sur le réseau et de l'élimination du recours aux moyens thermiques, le déploiement de capacités de stockage d'énergie de masse ne semble nécessaire avant 2030 que pour les zones non interconnectées¹³ et plutôt après 2040-2045 pour la France métropolitaine.¹⁴ Cette nécessité s'appuie essentiellement sur un besoin de stockage journalier, mais aussi pour contribuer aux services systèmes dans l'objectif de stabilité du réseau.

Le stockage électrochimique (ou batteries) constitue le deuxième moyen de stockage d'électricité le plus répandu dans le monde. Sur le territoire français seuls sont déployés à titre expérimental quelques batteries de l'ordre du MW/MWh. Malgré un déploiement tardif par rapport à d'autres pays, le stockage d'énergie en réseau commence à se développer en France, notamment dans les zones non-interconnectées où sa généralisation devrait débuter au début des années 2020 dans le contexte des objectifs d'autonomie énergétique fixés par ces territoires à l'horizon 2030. A l'étranger, des projets de grande ampleur sont déjà déployés, et le plus important en développement porte sur 4 GWh en Australie (technologie Lithium-ion).

Les technologies les plus déployées dans l'usage du stockage d'énergie renouvelable sont aujourd'hui les batteries Lithium-ion (Li-ion), sodium-soufre (NaS) et plomb-acide (PbA). Les terres rares n'entrent pas, ou qu'en très faibles quantités (éventuellement comme additif), dans la composition de ces batteries. Parmi les batteries couramment utilisées, seules les batteries nickel-hydrure métallique (NiMH) comprennent un alliage de terres rares à la cathode. Ces batteries ont surtout été utilisées dans les véhicules hybrides et dans les équipements électroportatifs, mais leur utilisation à des fins de stockage d'énergie renouvelable restera très marginale, en raison notamment de leur coût élevé par rapport aux batteries Li-ion, dont les caractéristiques et performances sont plus adaptées à cet usage.

Ainsi, l'utilisation de métaux critiques ou stratégiques (tels le Cobalt dans les batteries Lithium-ion) apparaît nettement plus problématique que celle des terres rares dans le stockage d'énergie renouvelable où elles sont très marginales. Les industriels poursuivent les recherches pour réduire la consommation ou substituer ces éléments dans les batteries.

3. Quelles conséquences pour le développement des énergies renouvelables ?

Les aimants permanents sont l'application principale des terres rares au niveau mondial. Ils représentent 89 % des applications pour le néodyme et 98,5 % pour le dysprosium¹⁵.

Comme la production annuelle d'aimants pour les éoliennes est actuellement faible¹⁶ (voir section 2.1) au regard de l'ensemble de la production pour les autres usages industriels, le risque d'approvisionnement peut être important pour

¹³ Vers l'autonomie énergétique des ZNI : <https://www.ademe.fr/vers-lautonomie-energetique-zni-zones-non-interconnectees>, ADEME, 2019.

¹⁴ Trajectoires d'évolution du mix électrique à horizon 2020-2060 : <https://www.ademe.fr/trajectoires-devolution-mix-electrique-a-horizon-2020-2060>, ADEME, 2018.

¹⁵ BRGM, Fiche de synthèse sur la criticité des métaux – Le néodyme, 2015.
BRGM, Fiche de synthèse sur la criticité des métaux – Le dysprosium, 2016.

¹⁶ Permanent magnet materials and current challenges : 9,6 % du marché mondial des aimants aux terres rares lesquels sont fabriqués à 80 % en Chine, 17 % au Japon et 3 % en Europe – Allemagne. Steve Constantinides et John De Leon de Arnold, Magnetic Technologies (2014).

l'industrie éolienne qui ne possèdent pas la capacité pour négocier des accords commerciaux favorables avec les pays producteurs.

Dans le secteur des aimants permanents, les technologies sans terres rares restent moins performantes à coût comparable. Des recherches et projets sont toutefois menés, notamment suite à la hausse des prix des années 2010-2011, pour **diminuer les quantités de dysprosium nécessaires voire le supprimer¹⁷, ou pour réduire fortement ou supprimer le recours aux aimants permanents** sans réduction des performances¹⁸.

Les facteurs influençant l'utilisation des terres rares pour l'éolien sont multiples : évolution des technologies d'aimants permanents, niveau d'utilisation de ces aimants, remplacement par de nouvelles technologies, concurrence d'usage au niveau mondial, évolution de l'approvisionnement à horizon 20 à 30 ans...

Dans ce contexte, une éventuelle tension forte sur les terres rares ne semble pas devoir compromettre le développement de l'éolien, en raison notamment de technologies alternatives pour les générateurs électriques (générateurs asynchrones ou générateurs synchrones sans aimant permanent) :

- En terrestre, aucune modification majeure de la structure du parc éolien n'est prévue pour les années à venir, et les aimants permanents devraient rester très largement minoritaires.
- En mer, étant donné la faible masse des aimants permanents par rapport à l'ensemble des matériaux utilisés dans les machines¹⁹, le coût des machines dépend peu de celui des terres rares. Les solutions de substitution actuelles auraient surtout un effet sur la masse de la turbine qui conduirait à un renchérissement des coûts de structure (mât, fondation ou flotteur). Pour les très fortes puissances, d'autres innovations technologiques (bobinages supraconducteurs) sont attendues en relais des technologies actuelles.

Les industriels consommateurs de terres rares peuvent craindre davantage la **dépendance à la Chine en situation de quasi-monopole** car elle réalisait en 2017 plus de 86 % de la production mondiale annuelle de terres rares²⁰ et d'aimants permanents, qu'une pénurie physique des ressources.

En ce qui concerne **le recyclage des terres rares**, au-delà des contraintes d'équilibre économique, il connaît des contraintes technologiques, et surtout un manque de gisement concentré de taille industrielle disponible à l'heure actuelle et sur au moins les deux décennies à venir qui permettrait d'envisager un déploiement économique des infrastructures de recyclage.

4. Pour en savoir plus

1. Bru K., Christmann P., Labbé J.F., Lefebvre G. (2015) - Panorama mondial 2014 du marché des Terres Rares. Rapport public. BRGM/RP-65330-FR.
2. Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques. *Les enjeux des métaux stratégiques : Le cas des terres rares*. Compte rendu de l'audition publique du 8 mars 2011 et de la présentation des conclusions, le 21 juin 2011 par MM. Claude Birraux et Christian Kert, députés.

¹⁷ K.P. Skokov and O. Gutfleish, Heavy rare earth free, free rare earth and rare earth free magnet – vision and reality, *Scr Mater*, 154 (2018) ; J. Mohapatra and J.P. Liu, Rare-earth-free permanent magnet : the past and future, *Handbook of Magnetic Materials*, Editions E. Bruck, Elsevier, 2018.

¹⁸ Projet JEOLIS (financé par l'ADEME dans le cadre des Investissements d'Avenir coordonné par Jeumont Electric).

¹⁹ Le coût des aimants permanents est estimé à moins de 5 % du coût total d'une éolienne de 6 MW à attaque directe : *Improved Cost of Energy Comparison of Permanent Magnet Generators For Large Wind Turbines*, Université de Strathclyde, 2014.

²⁰ Roskill, *Rare Earths: Global Industry, Markets & Outlook 2018*.

3. <http://www.senat.fr/rap/r10-782/r10-782.html>
4. <http://www.societechimiquedefrance.fr/extras/Donnees/mine/tera/textera.htm>
5. <http://decrypterlenergie.org/la-rarete-de-certains-metaux-peut-elle-freiner-le-developpement-des-energies-renouvelables>
6. *Terres rares : enjeux stratégiques pour le développement durable*. Conférence donnée par Patrice Christmann, directeur adjoint à la Stratégie du BRGM, dans le cadre des Grands Séminaires de l'Observatoire Midi-Pyrénées du CNRS, le 17 septembre 2013.
7. <http://www.brgm.fr/video/terres-rares-enjeux-strategiques-developpement-durable>
8. <http://www.ewea.org/news/detail/2011/10/31/rare-earths-wind-power-industry-not-a-major-user/>
9. http://europa.eu/rapid/press-release_IP-14-599_fr.htm
10. N. Goudarzi · W. D. Zhu, 2013, A review on the development of wind turbine generators across the world, *Int. J. Dynam. Control*, DOI 10.1007/s40435-013-0016-y.
11. Claudiu C. Pavel, et al, 2017, Substitution strategies for reducing the use of rare earths in wind turbines, *Resources Policy*, DOI 10.1016.
12. Xu Yang et al, 2012, Permanent Magnet Generator Design and Control for Large Wind Turbines, *IEEE*, 978-1-4673-1130-4/12.

