

Le recyclage des terres rares : une stratégie d'approvisionnement à la taille de leurs enjeux

Lama ITANI, Olivier LARCHER et Renaud ROHE

Lama Itani, Solvay, Rhodia Opérations, Terres Rares Business Line

Olivier Larcher, Solvay, Rhodia Opérations, Terres Rares Business Line

Renaud Rohe, Solvay, Rhodia Opérations, Terres Rares Business Line

1 Généralités sur les terres rares

Les terres rares (TR) sont les éléments chimiques du tableau périodique compris entre le lanthane et le lutétium (**Figure 1**). Elles se divisent en TR légères (La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm) et TR lourdes (Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu). Par ailleurs, on considère le plus souvent l'yttrium comme faisant partie de la famille des terres rares. Ces éléments sont nommés « rares » en dépit d'une abondance naturelle proche de celle du nickel ou du cuivre. Cette appellation pourrait résulter du fait que les terres rares existent à

des concentrations très faibles dans les minerais et du fait qu'elles sont assez difficiles à extraire, séparer et purifier. Dans les minerais de terres rares, le rapport des teneurs entre les TR légères et les TR lourdes est en moyenne d'environ 98/2.

Les TR présentent une configuration électronique très particulière. La couche externe est bien souvent identique, ce qui explique leurs propriétés chimiques très similaires. En revanche, grâce à des orbitales « f » partiellement ou totalement remplies, les TR possèdent de nombreuses propriétés (magnétiques, redox, optiques et physiques)



Figure 1

Les terres rares ou lanthanides dans le tableau périodique.
 Source : extrait de OD6 Metals Limited (<https://www.od6metals.com.au/rare-earths/rare-earths-rees.>)

qui les rendent uniques. Elles sont de ce fait irremplaçables dans différentes applications (Figure 2) telles que :

- La catalyse hétérogène :
 - Certaines terres rares, grâce à leurs propriétés redox, sont utilisées comme support pour optimiser l'activité du

catalyseur trois voies dans le contrôle des émissions automobiles.

- D'autres terres rares sont utilisées pour stabiliser les zéolithes, catalyseurs du craquage pétrolier.

- Le polissage :
 - L'oxyde de cérium est le matériau privilégié pour le polissage des couches minces de silicium des semi-conducteurs présents dans la majorité des équipements électroniques.
 - L'oxyde de cérium est également utilisé comme poudre de polissage de certains verres de spécialités (verres optiques, électroniques, etc.)

- La luminescence :
 - Grâce à leurs propriétés optiques et leurs émissions, certaines terres rares sont indispensables comme luminophores (ou pigments luminescents) dans les écrans

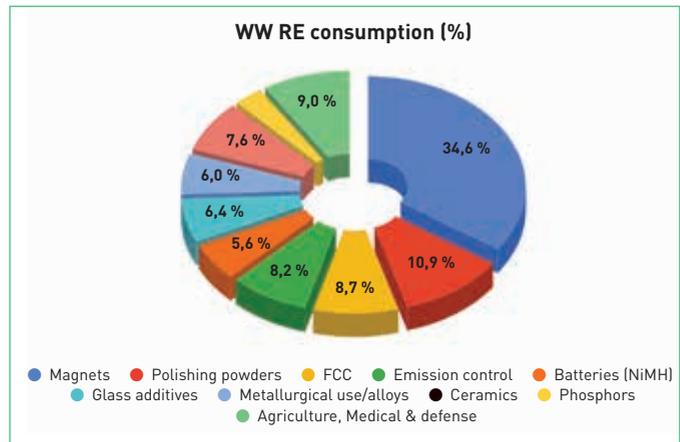


Figure 2

Les principales applications des terres rares¹.

1. 2019-08- IHS CEH Rare Earth Minerals & products.

plats, les appareils à rayons X ou certaines lampes.

- L'industrie du verre :

Les terres rares sont utilisées comme constituants du verre pour augmenter la brillance, l'indice de réfraction ou comme agents de coloration ou de décoloration.

- Les aimants permanents :

L'utilisation des terres rares dans les aimants permanents est détaillée dans le paragraphe 2.

2 Les aimants permanents

Un aimant est un matériau qui comprend une forte concentration d'atomes paramagnétiques. Un atome paramagnétique est un atome présentant des électrons non appariés. Un aimant permanent est un aimant qui conserve sa magnétisation une fois le champ magnétique externe supprimé.

Il existe actuellement quatre principales familles d'aimants permanents :

- Les aimants ferrites comme les ferrites de baryum ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) ou de strontium ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$).
- Les aimants AlNiCo comprenant principalement les éléments aluminium, nickel et cobalt (ex. : $\text{Al}_7\text{Ni}_{14}\text{Co}_{24}\text{Cu}_3\text{Fe}_{51}$ et $\text{Al}_7\text{Ni}_{15}\text{Co}_{36}\text{Cu}_4\text{Ti}_6\text{Fe}_{32}$).
- Les aimants SmCo à base de terres rares notamment de samarium (ex. : SmCo_5 ou $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$).
- Les aimants NdFeB à base de terres rares notamment de néodyme (ex. : $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$). Il est important de noter que, pour des raisons de limitation de

coût, très souvent, dans ces aimants, le néodyme (Nd) est remplacé par du didyme qui est un mélange de Nd et de praséodyme (Pr) dans un ratio tel que naturellement extrait des minerais ($\text{Nd/Pr} = 75/25$ à $80/20$ en fraction massique relative exprimées en oxyde). Il est également important de noter que pour les applications qui nécessitent une bonne stabilité thermique (conservation du pouvoir magnétique à haute température), les aimants NdFeB sont dopés avec du terbium (Tb) et du dysprosium (Dy).

La performance d'un aimant permanent est principalement mesurée par¹ :

- 1) Sa rémanence (Br) : la rémanence est le champ magnétique généré par l'aimant. Plus la rémanence est élevée, plus l'aimant est puissant.
- 2) Sa densité énergétique (BHmax) : la densité énergétique est le pouvoir d'aimantation par unité de volume ou par unité de masse. Elle est proportionnelle à la rémanence.
- 3) Sa coercivité (Hc) : la coercivité est la force magnétique nécessaire pour annuler l'aimantation d'un aimant. Plus la coercivité est élevée, plus l'aimantation est stable.
- 4) Sa température maximale d'utilisation (Tmax) : l'exposition d'un aimant permanent à des températures élevées dans son application entraîne une baisse de sa rémanence et de sa coercivité avec le temps. La température maximale d'utilisation est la température

1. *Techniques de l'ingénieur, Aimants Permanents – Matériaux et Propriétés. Ref: D2100V2.*

à laquelle l'aimant peut être utilisé sans que la perte de coercivité et de rémanence impacte sa performance dans une application donnée.

Grâce aux propriétés magnétiques des terres rares préablement citées (Nd, Pr, Tb, Dy et Sm), les aimants permanents à base de TR sont les plus performants en termes de rémanence, coercivité et densité énergétique (*Figure 3*). Ainsi, pour obtenir la même densité énergétique, il est nécessaire d'utiliser approximativement dix fois plus de volume ou de masse d'aimant ferrite que d'aimant NdFeB.

Leur densité énergétique sans équivalent rend l'utilisation des aimants permanents à base

de terres rares indispensable lorsqu'une forte puissance magnétique doit être couplée à une minimisation du poids ou du volume d'aimants.

C'est pourquoi les aimants permanents à base de terres rares sont essentiels pour de nombreuses applications comme les moteurs électriques (véhicules électriques ou éoliennes), les pompes, les compresseurs, les climatiseurs et les équipements électroniques et robotiques. Actuellement, 70 à 80 % des véhicules électriques et 100 % des éoliennes « off-shore » fonctionnent grâce aux aimants à TR.

3 Approvisionnement des terres rares et rôle de Solvay

Comme expliqué ci-dessus, plusieurs développements technologiques stratégiques, tels que les véhicules électriques ou les éoliennes, nécessitent l'utilisation d'aimants permanents de plus en plus puissants, en quantités de plus en plus importantes. Plusieurs études^{2,3,4} projettent un besoin mondial et en Europe en terres rares (notamment Nd et Pr) multiplié par quatre entre 2020 et 2030 (*Figure 4*).

À ce jour, l'Europe n'extrait pas de terres rares en dépit des gisements identifiés en Europe du Nord (Norvège, Suède...). La Chine concentre à elle seule

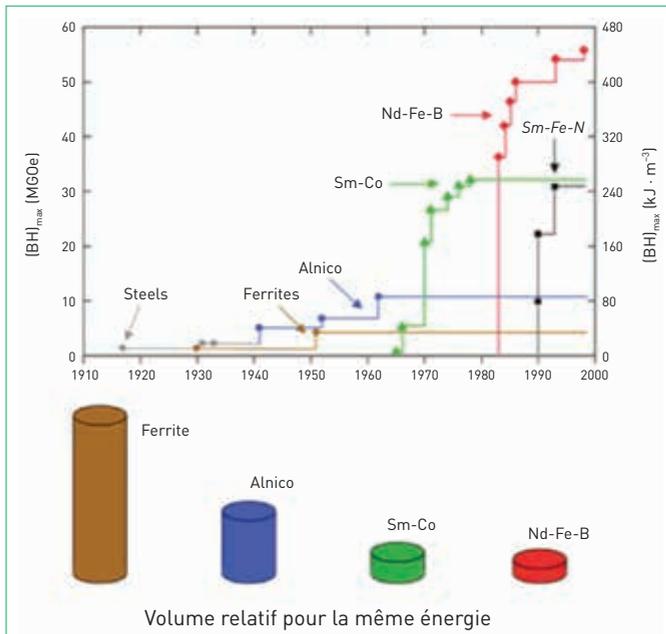


Figure 3

Propriétés des quatre principales familles d'aimants permanents (BH_{max} = pouvoir d'aimantation par unité de volume. $1 \text{ MGOe} = 7,958 \text{ kJ/m}^3$).

<https://www.sdmmagnetic.com/2020/11/27/grain-boundary-diffusion-process/>

2. Global rare earths strategic planning outlook to 2050, Wood Mackenzie.

3. Rare Earths analytics, Argus 2023.

4. RE permanent magnets supply chain Deep Dive Assessment - US DOE.

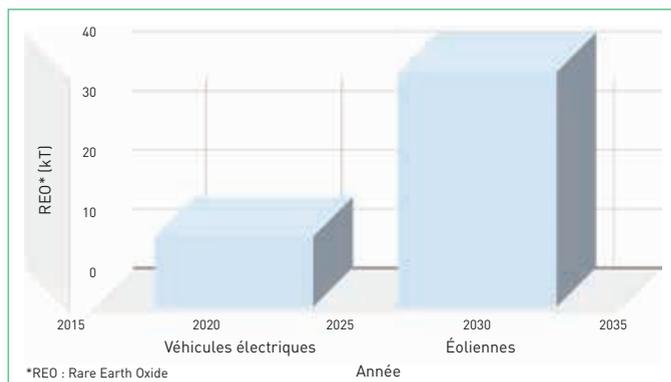


Figure 4

Demande globale en terres rares pour les véhicules électriques et éoliennes.

60 % de l'extraction minière des terres rares, 85 % de leur séparation/purification et 98 % de la fabrication d'aimants en contenant (Figure 5).

Comme bien expliqué dans l'article de Y. Shen *et al.*⁵, la Chine a instauré des quotas d'exportation dès 1999 pour lutter contre la production et l'exportation illégale des

terres rares. La diminution de ces quotas en 2010 a provoqué une très forte augmentation des prix, communément appelée « crise des terres rares ». Suite à une plainte à l'OMC, la Chine a été contrainte de les suspendre en 2015. Cependant, la persistance des quotas de séparation a provoqué la concentration forcée des entreprises autorisées à séparer les terres rares en Chine. De ce fait, le marché intérieur chinois continue à

5. *Mineral Economics* (2020) 33:127-151. <https://doi.org/10.1007/s13563-019-00214-2>.

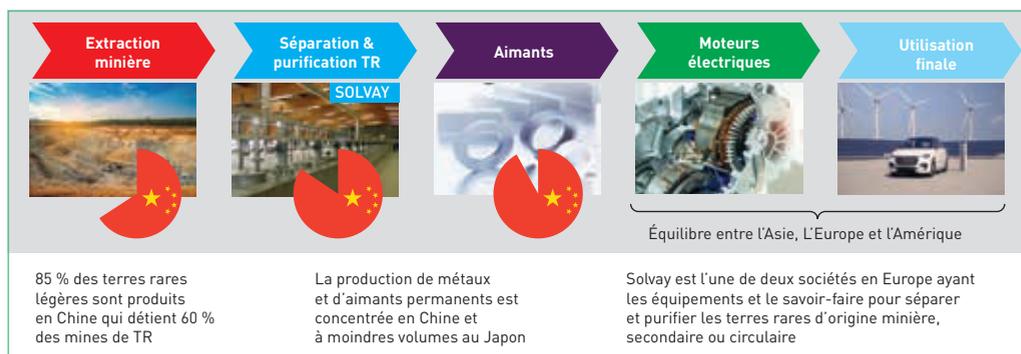


Figure 5

Chaîne de valeur et d'approvisionnement des aimants permanents. La Chine contrôle 60 % des mines de terres rares mondiales (illustration créée par Solvay).

dicter les prix internationaux. Ainsi, courant 2021, les prix des éléments Nd, Pr, Tb et Dy ont connu une forte augmentation qui s'explique par la reprise de la demande mondiale post-Covid début 2021, puis par l'introduction par la Chine de plusieurs mesures réglementaires.

En conséquence, la Commission européenne a classé les terres rares lourdes et légères à la deuxième place dans la liste des matières premières critiques pour les technologies clés européennes⁶.

Solvay a au cœur de sa vision et de sa stratégie le développement de solutions durables pour accompagner la transition énergétique, la mobilité verte et lutter contre le réchauffement climatique.

L'usine de La Rochelle a une expertise reconnue dans la séparation et la purification des terres rares et la fabrication de produits de haute technologie. Créée en 1948, elle emploie plus de 300 collaborateurs et produit des milliers de tonnes de produits à base de terres rares pour les marchés de la catalyse automobile, du polissage et de l'électronique. C'est la seule usine hors de Chine ayant, à ce jour⁷, l'expertise pour réaliser industriellement toutes les séparations. Ses capacités ont notamment été utilisées dans les années quatre-vingt, puis entre 2012 et 2016 pour

l'activité de séparations des TR lourdes issues du recyclage des luminophores. Elles servent aujourd'hui majoritairement à séparer et purifier les TR avant leur transformation en produits complexes. Fort de ses décennies d'expertise, Solvay a lancé en 2022 un projet d'investissement à La Rochelle afin d'entrer dans la chaîne de valeur des aimants permanents à base de terres rares en Europe visant à produire, en France, les terres rares purifiées, nécessaires aux marchés des aimants permanents, de l'hydrogène, de l'électronique et du médical (*Figures 6 et 7*).

Un des objectifs de ce projet est de sécuriser l'accès à ces TR.

Pour cela, la stratégie de Solvay est basée sur deux principes complémentaires :

- Le développement de partenariats avec des mines hors Chine pour s'approvisionner en TR d'une façon durable et responsable. Cet approvisionnement hors Chine contribue à la politique européenne de regain de la souveraineté de l'Europe vis-à-vis de l'accès aux matériaux critiques et stratégiques. Dans ce cadre, nos partenaires sont sélectionnés selon des critères exigeants de durabilité économique, environnementale et sociétale incluant un niveau de maturité conforme aux standards du développement durable de l'industrie, l'adhésion au Code d'intégrité des affaires des fournisseurs du Groupe Solvay, une fourniture responsable exempte des « minerais de conflits », la mesure de l'impact carbone de la matière première dans le

6. CRM web page: https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_en.

7. Rapport n° 617 (2015-2016) du Sénat.

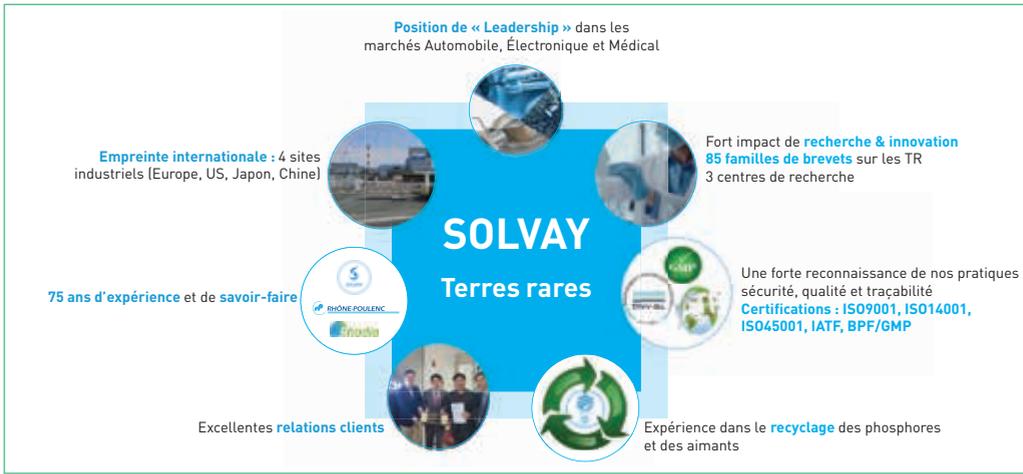


Figure 6

Solvay dans le domaine des terres rares (Illustration créée par Solvay).

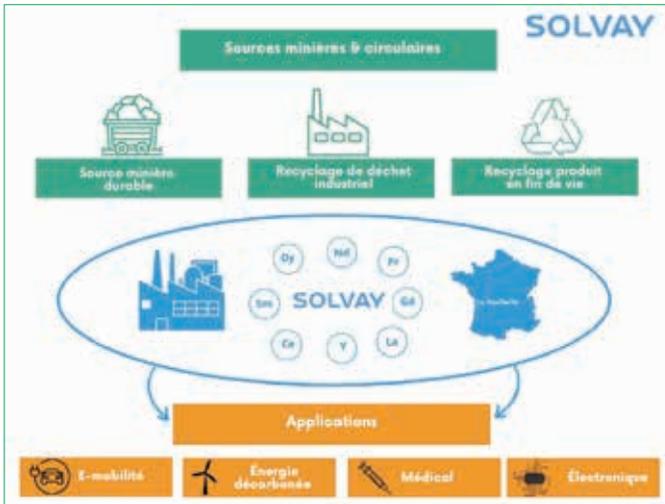


Figure 7

Mobilisation de l'expérience de Solvay La Rochelle dans le domaine des terres rares pour servir les marchés stratégiques de la mobilité électrique, l'énergie verte et la digitalisation, les applications en imagerie médicale par résonance magnétique (IRM) (Illustration créée par Solvay).

cycle de vie du produit final et le cas échéant l'engagement d'actions d'amélioration de l'empreinte environnementale des matières premières et réactifs.

- Le recyclage des aimants issus des équipements en fin de vie ou des déchets de production ; les mines urbaines

dont l'exploitation contribuera à la préservation des ressources naturelles et le développement d'une économie circulaire.

La suite de ce rapport se focalise sur le recyclage des TR et en particulier des TR issues des aimants permanents.

4 Le recyclage des terres rares

4.1. Les sources de recyclage des terres rares

Les flux pour le recyclage des terres rares se trouvent majoritairement dans deux catégories de déchets (**Figure 8**) :

- **Les déchets industriels** : ces déchets comprennent les déchets miniers contenant des terres rares, les déchets de fabrication des aimants permanents et les déchets de fabrication des équipements qui contiennent des terres rares.
- **Les équipements en fin de vie** : il s'agit en particulier des aimants permanents en fin de vie.

D'après une étude réalisée par le CEPS pour la Commission européenne à l'origine du *Critical Raw Materials Act*⁸ (**Figure 9**), les aimants à base de terres rares sont actuellement présents principalement

8. CRM web page : https://single-market-economy.ec.europa.eu/sectors/raw-materials/areas-specific-interest/critical-raw-materials_en.

dans les déchets électroniques mais aussi dans les véhicules thermiques en fin de vie (hauts-parleurs et accessoires électroniques). Dans quelques dizaines d'années, seront disponibles les aimants permanents des moteurs des véhicules électriques en fin de vie. Et plus tard, pourra être envisagé le recyclage des aimants des moteurs d'éoliennes. Ceci est en complément du recyclage des déchets de production.

Selon cette même étude, en termes de volumes, le flux de recyclage ne représente, à ce jour, que 10 % du besoin européen. Il est ainsi important, comme mentionné précédemment, de développer plusieurs stratégies :

- l'extraction minière responsable et indépendante ;
- le recyclage des aimants permanents qui devrait constituer une solution évidente lorsque les volumes du flux de recyclage deviennent importants ;
- l'innovation et le développement de technologies avec moins de terres rares ou exemptes de terres rares.

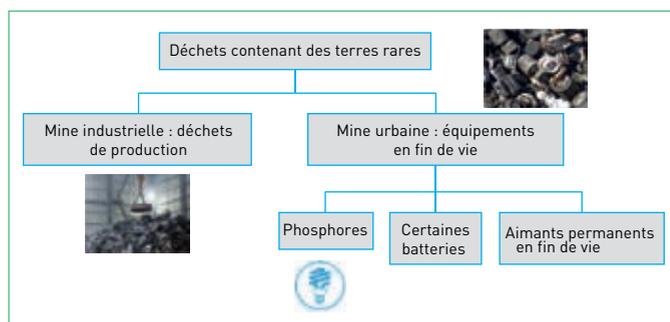


Figure 8

Sources de terres rares pour le recyclage (Illustration créée par Solvay).

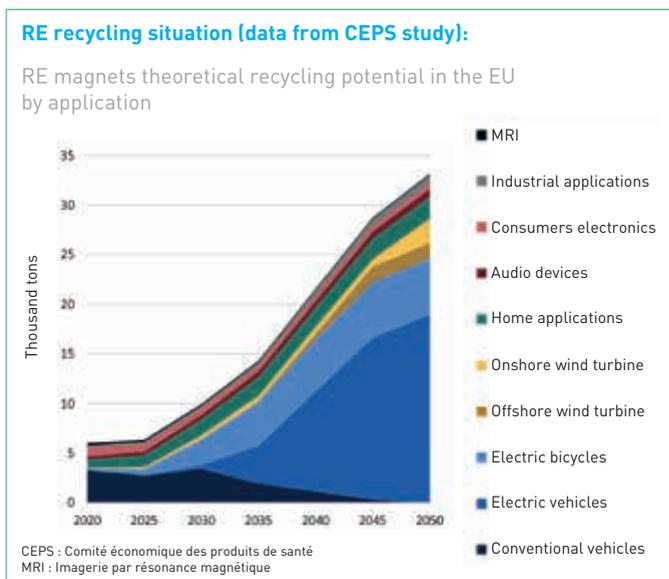


Figure 9

Répartition par application et par année du potentiel flux de recyclage des aimants permanents en Europe*.

* CEPS In Depth Analysis - Developing A Supply Chain for Recycled Rare Earth Permanent Magnets in the EU: Challenges and Opportunities. Vasileios Rizos, Edoardo Righetti, Amin Kassab December, 2022 - 07.

4.2. Les procédés de recyclage des aimants permanents à base de terres rares^{9,10,11}

Il existe deux procédés pour recycler les aimants permanents en fin de vie ou les déchets de production des aimants (Figure 10).

- Le procédé dit « **recyclage direct ou boucle courte** » qui consiste à broyer l'aimant et à réinjecter la poudre d'aimant au niveau des étapes de fabrication des aimants (soit au

niveau de la préparation d'un nouvel alliage par *strip-casting*, soit au niveau du façonnage d'un nouvel aimant).

D'une part, le principal avantage du recyclage direct serait un impact environnemental moindre étant donné que ce dernier présente moins d'étapes de procédés et consomme moins de réactifs chimiques. D'autre part, les principaux inconvénients seraient :

(i) peu de tolérance et de versatilité envers le contenu des déchets ou des aimants à recycler en termes de teneur en impuretés ou de nature de terres rares ;

(ii) le recyclage direct ne permet pas systématiquement d'atteindre les mêmes performances d'aimants qu'avec des sources primaires surtout si les déchets ou aimants à recycler sont dans un état d'oxydation avancé.

9. Saito et al. The extraction of Nd from waste Nd-Fe-B alloys by the glass slag method. *J Alloy Compd* 353:189-193 (2003).

10. Saito et al. Extraction of Sm from Sm-Fe alloys by the glass slag method. *J Alloy Compd* 387:274-278 (2005).

11. Takeda et al. Recovery of neodymium from a mixture of magnet scrap and other scrap. *J Alloy Compd* 408-412:387-390 (2006).

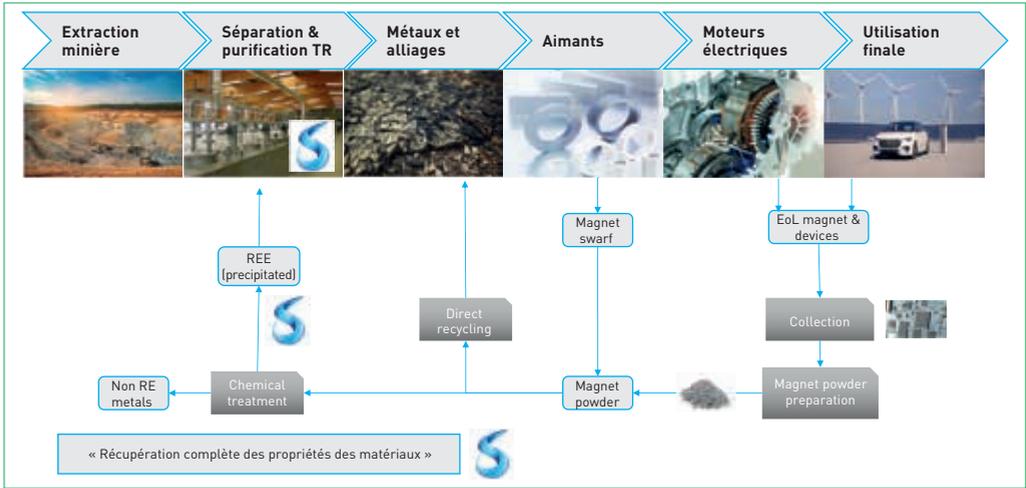


Figure 10

Les déchets contenant des terres rares à recycler sont d'abord convertis en « poudre d'aimant » (flèches bleues du haut vers le bas de la figure). Cette poudre d'aimant peut être récupérée directement (direct recycling schématisé par une flèche allant du bas vers le haut) ; c'est le schéma de la boucle courte. Elle peut aussi être conduite vers une opération chimique (chemical recycling) préalable dans le schéma de boucle longue (Illustration créée par Solvay).

- Le deuxième procédé dit « boucle longue » (Figure 11) consiste à extraire sélectivement de la poudre d'aimant les terres rares présentes sous forme d'un mélange d'oxydes, d'oxalates, de sulfates doubles

ou autres. Cette extraction pourrait se réaliser :

- soit par pyrométallurgie où la poudre d'aimants est chauffée à des températures très élevées (jusqu'à 800-2 000 °C) en présence d'agents d'alliage (Mg) ou d'agents de scorification (B, Ca) pour extraire les terres rares sous forme d'alliage (Mg-Nd) ou de scories. Les alliages ou les scories sont par la suite dissous, souvent en milieu acide, pour extraire les terres rares ;
- soit par hydrométallurgie qui consiste à dissoudre la poudre d'aimants dans un milieu très acide ou très basique.

Dans les deux cas, les terres rares sont ensuite sélectivement précipitées sous forme d'un mélange d'oxydes, d'oxalates, de sulfates doubles ou autres. Le mélange de terres rares ainsi obtenu est ensuite séparé et purifié par extraction

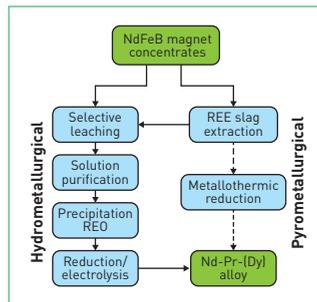


Figure 11

Étapes de recyclage des aimants permanents selon une boucle longue.

Source : J. Sustain. Metall., 2017, 3:122–149

liquide-liquide afin d'obtenir des terres rares individuelles et pures, rendues à l'état initial des matières premières primaires pour être utilisées dans la fabrication de nouveaux aimants permanents. Ainsi l'avantage premier de ce procédé réside dans le fait que tout type d'aimant en fin de vie peut être recyclé quels que soient son état d'oxydation, sa teneur en impuretés ou sa composition en terres rares. De plus, ce procédé permet de garantir que l'aimant produit à partir de ces terres rares recyclées sera aussi

performant que celui produit à partir de terres rares primaires. En revanche, comparé au recyclage direct, le procédé de recyclage par boucle longue comporte plus d'étapes et consomme plus de réactifs.

Le principe et les étapes d'attaque et de séparation du procédé de recyclage par la boucle longue sont proches de ceux de l'extraction des minerais de terres rares. Se focalisant sur son expertise et son savoir-faire, Solvay intègre le recyclage des aimants par la boucle longue dans son projet.

Conclusion

Les terres rares sont des éléments utilisés dans la fabrication de certains aimants permanents. Ces derniers sont des composants essentiels des moteurs électriques, ce qui les rend indispensables dans certaines applications telles que les véhicules électriques, les éoliennes, les moteurs industriels, la robotique et l'électronique.

L'accès aux terres rares pour l'Europe est contrôlé par la Chine qui concentre la majorité des minerais exploités ainsi que les étapes de séparation, purification et fabrication des aimants. Tenant compte de l'importance de ces éléments pour les objectifs européens de transition énergétique, d'électrification et de digitalisation, l'Europe soutient une stratégie d'approvisionnement diversifiée, indépendante de la Chine et intégrant l'économie circulaire via le recyclage des aimants permanents. Solvay, leader mondial dans la fabrication de produits de spécialité à base des terres rares pour les marchés automobile, électronique et autres, contribuera à cette stratégie.

En effet, Solvay exécute depuis un an et demi un projet qui met à disposition l'expertise et l'histoire de Solvay dans la séparation et la purification des concentrés de terres rares pour produire les matières premières (oxydes) nécessaires à la fabrication des aimants permanents. Pour accéder aux sources des terres rares qui seront séparées, purifiées et formulées dans son usine située à La Rochelle en France, Solvay :

- développe des partenariats avec des mines hors Chine pour s'approvisionner en TR d'une façon durable et responsable ;
- intègre le recyclage des aimants issus des déchets de production ou des équipements en fin de vie via un procédé appelé boucle longue de recyclage.

Ce dernier procédé de recyclage consiste à extraire sélectivement les terres rares de la poudre d'aimant. Cette extraction pourrait se réaliser, soit par un traitement thermique à haute température (pyrométallurgie), soit par un traitement chimique (hydrométallurgie). Dans les deux cas, les terres rares sont ensuite sélectivement précipitées sous forme d'un mélange d'oxydes, d'oxalates, de sulfates doubles ou autres. Le mélange de terres rares ainsi obtenu est ensuite séparé et purifié par extraction liquide-liquide afin d'obtenir des terres rares individuelles et pures, rendues à l'état initial des matières premières primaires pour être utilisées dans la fabrication de nouveaux aimants permanents.

Solvay démarrera la production des oxydes de terres rares pour les marchés des aimants permanents en 2025. À maturité, plusieurs milliers de tonnes d'oxydes de NdPr, Dy et Tb seront produites, contribuant à une part significative du besoin européen futur.