



LE RECYCLAGE DES MÉTAUX EN FRANCE : QUE FAIT-ON AUJOURD'HUI ?

Les métaux bénéficient d'une particularité : ils sont recyclables à l'infini. Leurs filières de recyclage contribuent à diminuer notre niveau de dépendance aux importations, mais quels sont leurs niveaux actuels de performance ?

Recycler, c'est avant tout diminuer les impacts environnementaux des déchets que nous produisons et limiter leur enfouissement ou leur incinération. Le défi principal du recyclage des métaux est d'ordre économique : les métaux recyclés doivent être produits à des coûts de revient équivalents à ceux produits à partir de minerais. En France, les filières de recyclage se mettent en place progressivement, tirées par une demande mondiale qui ne cesse d'augmenter. Depuis plus de 20 ans, nous assistons à une envolée des prix des substances métalliques, initialement liée à une demande chinoise croissante, puis à la crise des terres rares dans les années 2010-2011 et plus récemment à la pandémie de Covid-19 qui a accentué la vulnérabilité de l'économie des pays occidentaux face à leurs approvisionnements. La transition écologique et les politiques publiques qui prônent le déploiement massif des énergies renouvelables et de l'électromobilité vont participer à cette évolution, car toutes ces technologies consomment des quantités importantes de métaux de base et de métaux rares. D'après une récente étude de l'OCDE (2019), l'utilisation de matières premières devrait pratiquement doubler dans le monde d'ici à 2060. Pour ce qui concerne les métaux, la consommation passerait de 7 à 19 milliards

▲ PHOTO 1
L'hétérogénéité des mines urbaines (ici des piles) requiert la mise au point de procédés de recyclage souples et robustes.

© ADOBE STOCK

AUTEUR



Yannick MENARD

Responsable de l'unité Déchets et Matières premières, direction Eau, Environnement, Procédés et Analyses, BRGM
✉ yymenard@brgm.fr

de tonnes par an, faisant peser de sérieuses menaces sur les capacités d'approvisionnement.

Pour réduire la dépendance des économies mondiales aux métaux, le recyclage apparaît comme un levier incontournable.

Bilan du recyclage au niveau mondial

À ce jour, les seules données existantes au niveau mondial sont celles produites par l'UNEP (2011) qui estime le taux de recyclage en fin de vie de tous les métaux (figure 1).

Selon ce rapport, moins d'un tiers des 60 métaux étudiés sont recyclés à 50 % ou plus et 34 éléments ont des taux de recyclage en fin de vie inférieurs à 1 %, ce qui signifie qu'ils ne sont pas recyclés. Ainsi, même si le stock de métaux potentiellement recyclables présents dans nos mines urbaines pouvait servir à diminuer la pression sur l'exploitation des ressources naturelles, on observe qu'il demeure des écarts considérables à combler et qu'une « société du recyclage autosuffisante » reste aujourd'hui loin d'être une réalité.

Bilan du recyclage au niveau européen

L'Europe importe 50 % de sa consommation en matières premières minérales non énergétiques (Eurostat, 2020). Parmi les indicateurs de circularité, celui qui mesure la part de substance recyclée provenant du

traitement d'objets en fin de vie dans le flux total de consommation de ladite substance (EOL-RIR, End-Of-Life Recycling Input Rate, Blengini *et al.*, 2017) permet de rendre compte de la contribution du recyclage à la demande en matière au niveau européen. Ce taux de réincorporation est généralement faible. L'existence de procédés de recyclage robustes et économiquement viables, la performance de filières de récupération et

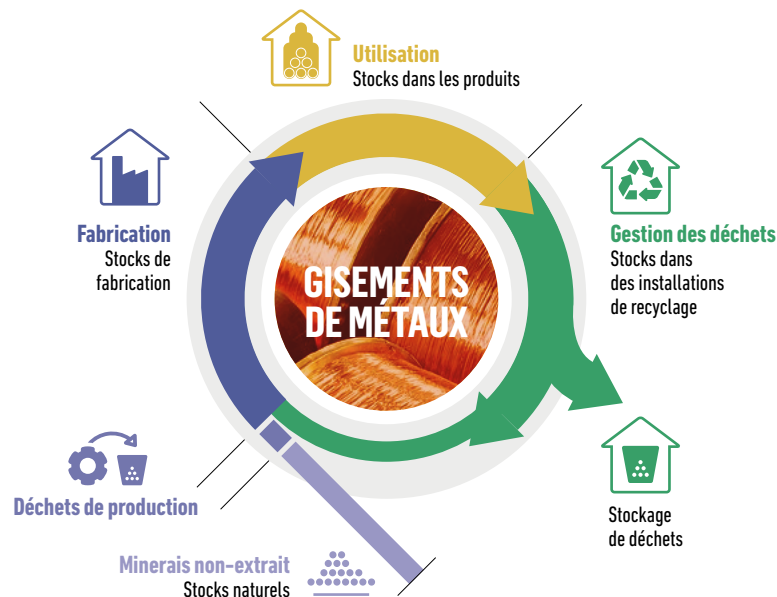
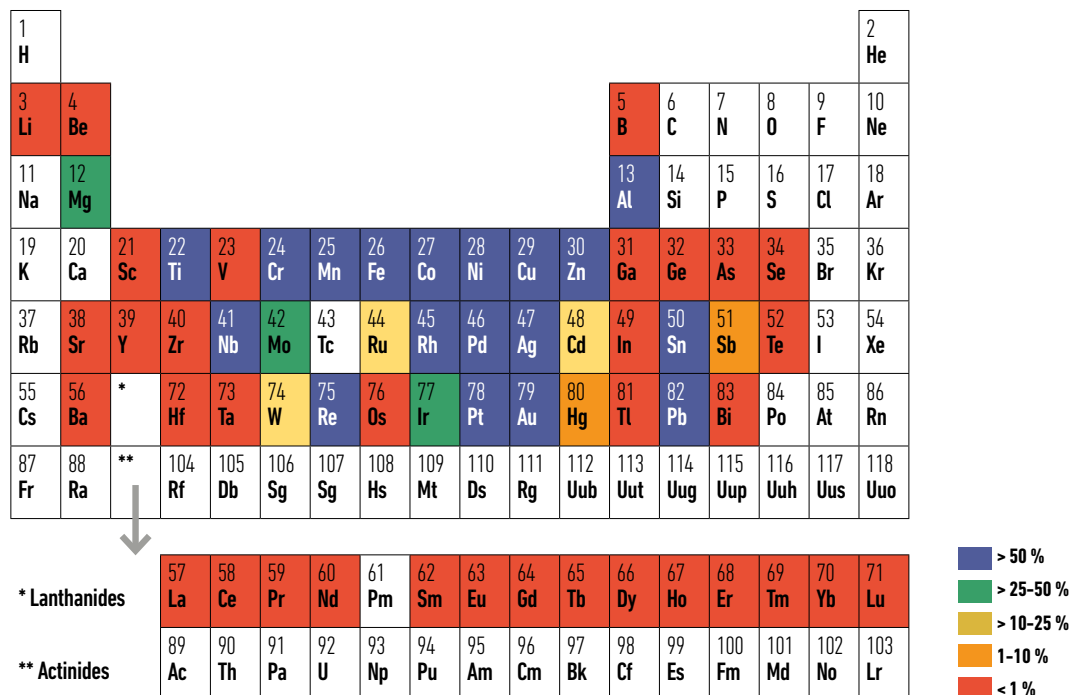


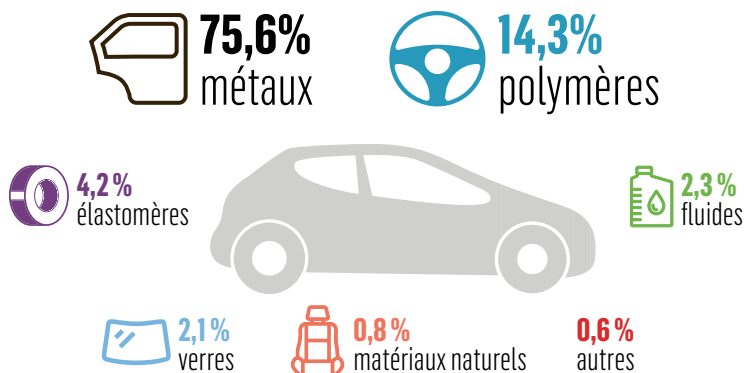
FIGURE 1 Taux de recyclage des métaux issus de produits en fin de vie (UNEP, 2011)



MINE URBAINE

Composition massique d'un véhicule récent

La directive européenne sur les Véhicules Hors d'Usage (VHU) fixe un taux de réutilisation et de recyclage de 95 % en 2015, dont 10 % en valorisation énergétique.



de collecte des objets en fin de vie ou encore le décalage temporel existant entre les besoins à satisfaire en métaux (consommation) et la capacité de les produire à partir de déchets, en plus de la durée de vie des objets manufacturés contenant les métaux en cours d'utilisation, sont autant d'éléments qui peuvent expliquer ce constat. Enfin et surtout, la demande croît tellement rapidement que le recyclage seul serait incapable d'y répondre, quand bien même les stocks de ressources secondaires seraient rendus totalement accessibles et les procédés rentables.

Dans son rapport de 2017 (figure 2), le JRC (Centre commun de recherches de la Commission européenne) conclut que certains métaux critiques pour l'Europe, comme les éléments du groupe des platinoïdes par

exemple, ont des taux de recyclage proches de 95 % pour ceux utilisés dans la catalyse industrielle et de 60 % pour ceux contenus dans les pots catalytiques des véhicules thermiques. Cependant, cet excellent taux de recyclage ne permet pas de répondre à la demande. Ainsi, le taux d'incorporation des platinoïdes issus du recyclage des objets en fin de vie ne dépasse pas 14 %.

À l'opposé, l'indium, largement utilisé sous la forme d'oxyde d'indium dopé à l'étain dans les écrans plats, n'est recyclé que dans quelques infrastructures très spécialisées. Son taux de recyclage est ainsi quasi nul.

Bilan du recyclage au niveau français

En France, le recyclage des métaux offre des situations très contrastées selon qu'il s'agit de métaux de base ou de métaux rares.

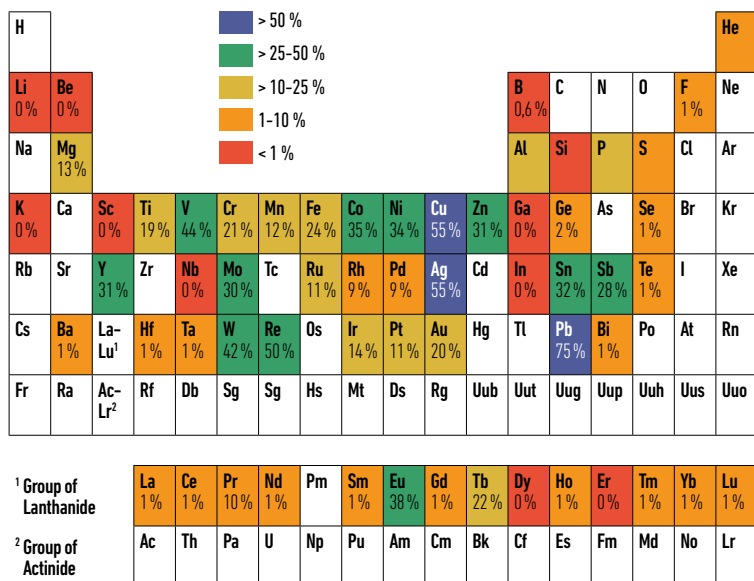
S'agissant des ferrailles, les gisements peuvent provenir de la collecte sélective des produits de consommation en fin de vie, du secteur du bâtiment, des véhicules hors d'usage, de l'industrie ou encore des chutes neuves d'acier ou de fonte récupérées chez les sidérurgistes ou les transformateurs, recyclées en interne ou non. En 2017, sur une production totale de 16 836 kt d'acier brut et de fonte produits en sidérurgie et en fonderie, 8 296 kt (49 %) provenaient du recyclage de ferrailles (ADEME, 2019). Cette même année, 12 563 kt de ferrailles ont été collectées en France, 1 909 kt ont été importées et 6 179 kt ont été exportées. Le taux d'incorporation de ferrailles de recyclage dans la production d'acier en France était de 49 % en 2017 contre 56 % à l'échelle européenne.

La part d'aluminium issue du recyclage dans la production totale est également significative. En 2017, 960 kt d'aluminium ont été produites en France dont 53 % (509 kt) provenant du recyclage de déchets d'aluminium. Les capacités de production évoluent très peu en France comme en Europe et la demande française (1 200 kt en 2017) est largement supérieure à la production nationale.

La production de cuivre est particulièrement intéressante, car c'est un marqueur de nos capacités industrielles perdues pour la production d'autres métaux critiques. Bien que la France possède une importante capacité industrielle de première transformation du cuivre et de ses alliages, la production de cuivre affiné n'a plus lieu en France depuis plus de 20 ans. Nous importons donc du cuivre affiné (226 kt en 2017) et produisons 110 kt de cuivre recyclé par fusion de déchets cuivreux, majoritairement dans des installations de petites tailles comparées aux grands acteurs étrangers. La production de cuivre recyclé souffre d'un déficit (voire d'une absence) de compétitivité liée à notre perte de savoir-faire métallurgique. C'est ce même savoir qui permet aujourd'hui aux grandes sociétés d'affinage européennes localisées en Allemagne (Aurubis), en Belgique (Umicore)

FIGURE 2 Contribution du recyclage, réalisé à partir d'objets en fin de vie, à la demande en métaux critiques de l'Europe (EOL-RIR).

SOURCE JRC 2017



► DE NOMBREUX DÉFIS À RELEVER POUR RECYCLER LES LAMPES À LED

Le marché de l'éclairage vit actuellement une mutation marquée par l'utilisation croissante de la technologie des LED (diode électroluminescente ou *Light-Emitting Diode*). Le taux de pénétration de ce mode d'éclairage devrait dépasser les 85 % en 2030, alors qu'il était inférieur à 2 % en 2012¹ ! Ce déploiement rapide s'explique par les nombreux avantages de la technologie LED par rapport aux autres technologies d'éclairage, tels qu'une faible consommation électrique, une longue durée de vie et l'absence de mercure dans la composition de la lampe. L'éclairage à LED se caractérise également par une grande diversité de produits (formes, matériaux, couleurs de lumière), ce qui favorise son usage.

Conséquence de la forte augmentation de l'utilisation de ces lampes, elles représentent aujourd'hui plus de 4 % du flux de lampes fluocompactes collectées. Contrairement aux lampes fluocompactes majoritairement composées de verre, les lampes à LED sont constituées par l'assemblage de composants dont certains, comme les modules LED ou les cartes électroniques, contiennent des métaux précieux (argent, or), des métaux critiques (indium, gallium, terres rares notamment) et des éléments polluants comme l'arsenic. Aucun procédé de recyclage n'étant actuellement disponible, les lampes à LED sont en général séparées manuellement et stockées dans l'attente d'un procédé de recyclage adéquat. Le développement d'un tel procédé de recyclage a fait l'objet du projet REDLED, financé par l'EIT Raw Materials entre 2019 et 2021².

Un verrou majeur au recyclage des lampes à LED en fin de vie est lié à leur grande hétérogénéité (forme, matériaux utilisés, taille notamment) qui non seulement nécessite que les procédés développés soient suffisamment robustes pour garantir le maintien des performances techniques, mais qui affecte également la rentabilité écono-

mique du traitement. En effet, la composition des lampes à LED a évolué ces dernières années vers une plus grande utilisation de matériaux plastiques qui sont difficilement valorisables. Un autre verrou est lié à la récupération des métaux précieux et critiques contenus dans les LED et les composants des cartes électroniques qui sont fortement dilués lors du broyage des lampes. Pour le gallium par exemple, des teneurs de 0,381 % et de 0,013 % ont été mesurées dans les diodes électroluminescentes et dans la lampe à LED entière respectivement ; la dilution est encore plus forte pour l'yttrium, avec des teneurs de 0,683 % et de 0,005 % respectivement (Cenci *et al.*, 2020)³. Les travaux menés dans le cadre du projet REDLED ont ainsi montré qu'à l'issue des étapes de tri les teneurs des éléments précieux et critiques dans les fractions produites restent

faibles. Enfin, les faibles tonnages collectés (gisement estimé à 54 kt en 2030⁴) fragilisent encore un peu plus l'équilibre économique d'un procédé de recyclage dédié. Les travaux réalisés dans le projet REDLED ont permis de définir les étapes de broyage et de tri ainsi que leur enchaînement afin d'atteindre un taux de récupération plus élevé que dans la filière actuelle de recyclage des lampes. En particulier, ces étapes permettent de récupérer des fractions riches en métaux ferreux, non ferreux, polycarbonate et les cartes électroniques. Des améliorations, en particulier sur les polymères, restent cependant nécessaires pour atteindre le taux de recyclage de 80 % imposé par la Directive DEEE de 2012. —

Kathy BRU
BRGM



© ADOBE STOCK

¹ Zisis, G., Bertoldi, P., Serrenho, T., Update on the Status of LED-Lighting world market since 2018, EUR 30500 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2021, doi:10.2760/759859, JRC122760. ² Les partenaires du projet REDLED sont l'université de Bordeaux (coordinateur), MTB, Coolrec, le BRGM, KU Leuven et le Wuppertal Institute. ³ Cenci et al. (2020) Assessment of LED lamps components and materials for a recycling perspective. Waste Management, 107, 285-293, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.028>. ⁴ REDLED (2020) D3.1. Dynamic input-output analysis.

« Une société du recyclage autosuffisante reste aujourd'hui loin d'être une réalité. »

et en Suède (Boliden) de continuer à traiter des concentrés minéralurgiques de cuivre en pyrométallurgie, mais surtout de récupérer la majeure partie de la valeur ajoutée en métaux contenus dans les déchets collectés en France et que nous exportons faute d'installations dédiées. À titre d'exemple, MTB opère et commercialise des lignes de préparation mécanique de câbles électriques pour en récupérer le cuivre et l'aluminium mais ne produit pas de métal affiné. À l'heure actuelle, seules les sociétés Morphosis et WEEECycling opèrent des procédés qui intègrent une préparation mécanique et un affinage métallurgique des déchets collectés (cartes électroniques principalement) permettant la production d'un grand nombre de métaux critiques affinés.

Peu de données sont disponibles pour caractériser la filière de recyclage du zinc en France. Depuis la fermeture de Métaleurop Nord en 2003, le zinc n'est plus produit par pyrométallurgie en France. À l'heure actuelle, seule la raffinerie Nyrstar d'Auby produit du zinc par hydrométallurgie à partir de concentrés minéralurgiques et d'oxydes livrés par Recytech par

retraitement de poussières d'aciérie de résidus zincifères. Le zinc est le seul métal pour lequel la balance française est positive : nous en exportons plus (85 kt en 2018) que nous n'en importons (75 kt en 2018).

La production française de plomb se fait exclusivement par recyclage de déchets majoritairement issus de batteries en fin de vie. Avec l'or et l'argent, le plomb est un des métaux dont le taux de recyclage est le plus élevé (> 90 % selon l'USGS) et ce recyclage alimente près de 60 % de la consommation. Sa concentration dans des objets faciles à recycler fait qu'il est aisé de le récupérer après usage. Du point de vue de l'efficacité des ressources (celle du plomb), la batterie au plomb peut ainsi être considérée comme un objet éco-conçu.

En 2020, le traitement des piles et accumulateurs portables, industriels ou automobiles, était assuré par dix opérateurs (dont Recylex, SNAM, GDE, EuroDieuze...) sur treize sites industriels. Les produits issus du traitement sont majoritairement de la fine de plomb (32,7 %) et du plomb et ses dérivés (37,1 %). Les autres produits récupérés sont en proportions plus faibles (ADEME, 2019) : 6,8 % de papiers et plastiques divers, 7,6 % d'électrolyte et solvants, 5,3 % de laitier et scories, 3,4 % de résidus de broyage, 2,1 % de *black mass* et 5,0 % d'autres produits issus du traitement (aciers, nickel, métaux ferreux, lithium sel, cadmium, cobalt, inox, cuivre, aluminium, argent, zinc et dérivés, mâchefers, métaux ferreux). Les rendements de recyclage sont relativement élevés : 84 % pour les accumulateurs NiCd, 86 % pour les accumulateurs au plomb et 60 % pour les autres piles et accumulateurs (NiMH, piles alcalines, salines, zinc air...).

Limites et opportunités du recyclage

Nous l'avons vu, les taux de recyclage des métaux restent relativement faibles. En conséquence, les opportunités pour accélérer le développement d'activités de recyclage génératrices de richesse et d'emploi en France sont importantes. Pour l'heure, le découplage entre croissance et consommation matière n'est pas une réalité et toutes les économies à croissance positive voient leurs consommations en matières premières augmenter (cas de l'ensemble des métaux dits « critiques » pour lesquels la demande mondiale est multipliée par deux en moyenne tous les 5 ans). Cette consommation n'est satisfaite par le recyclage que pour une modeste part, le reste venant de l'industrie extractive (cf. *Géosciences* 25).

Le recyclage constitue une opportunité pour relocaliser sur le territoire français une production industrielle métallurgique en partie disparue. Pour être compétitive par rapport aux grands opérateurs européens de la métallurgie, cette industrie doit se focaliser sur le développement de procédés dédiés au traitement des gisements de nos déchets. À l'heure actuelle cependant, nous observons une fuite de concentrés métalliques

▼ PHOTO 2
Pilote d'extraction liquide-liquide pour le recyclage des batteries Lithium-ion équipant les véhicules électriques (projet RECYVABAT, ORANO)
© ORANO





produits par nos filières de collecte et de préparation mécanique particulièrement bien organisées et efficaces. Ces concentrés quittent le pays pour être affinés dans des fonderies européennes ou hors Europe.

Une des limites actuelles au développement pérenne de solutions de recyclage des métaux tient à la forte hétérogénéité et à l'évolution rapide des compositions des objets en fin de vie de nos mines urbaines. Les démarches qui visent à substituer certaines substances métalliques s'opposent parfois au développement de solutions de recyclage. L'écoconception pour le désassemblage est un prérequis pour faciliter la mise en place de telles solutions. Des ponts interfilières doivent être identifiés afin d'éviter d'aller jusqu'à l'affinage des métaux et de trouver des débouchés industriels directs à des métaux en mélange issu du recyclage

(métaux issus des cartes électroniques par exemple). Les consommations énergétiques, en réactifs et en eau s'en trouvent alors allégées.

Enfin, à l'heure actuelle, les intérêts économiques se concentrent sur un nombre limité de substances métalliques. Les platinoïdes, les terres rares, le cobalt et le nickel représentent la majorité des situations. D'autres substances comme le lithium, l'indium, l'antimoine ou le germanium sont autant de nouveaux candidats potentiels pour des développements de procédés de recyclage innovants.

D'autres opportunités importantes sont représentées par le retraitement des gisements de déchets industriels (dont les boues hydrométallurgiques et les scories de la pyrométallurgie des métaux non ferreux en particulier). ●

▲ PHOTO 3
Parc à ferrailles destinées au recyclage par pyrométallurgie en four à arc électrique.

© FOTOLIA

BIBLIOGRAPHIE ADEME, C. Devauze, M. Planchon, A. Koite, J. Welgan. 2019. Bilan national du recyclage 2008-2017 - Évolutions du recyclage en France de différents matériaux : métaux ferreux et non ferreux, papiers-cartons, verre, plastiques, inertes du BTP et bois. 83 p. Blengini, G. A., Blagoeva, D., Dewulf, J., Torres de Matos, C., Nita, V., Vidal-Legaz, B., Latunussa, C. E. L., Kayam, Y., Talens Peirò, L., Baranzelli, C., Manfredi, S., Mancini, L., Nuss, P., Marmier, A., Alves-Dias, P., Pavel, C., Tzimas, E., Mathieux, F. and Ciupagea, C. (2017a), Assessment of the methodology for establishing the EU list of critical raw materials, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017, doi:10.2760/73303, JRC106997. Géosciences (2021) L'Anthropocène, quand l'Homme imprime sa marque, 25. Mathieux, F., Ardente, F., Bobba, S., Nuss, P., Blengini, G., Alves Dias, P., Blagoeva, D., Torres De Matos, C., Wittmer, D., Pavel, C., Hamor, T., Saveyn, H., Gawlik, B., Orveillon, G., Huygens, D., Garbarino, E., Tzimas, E., Bouraoui, F. and Solar, S., Critical raw materials and the circular economy – Background report. JRC Science-for-policy report, EUR 28832 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2017, doi:10.2760/378123, JRC108710. OCDE (2019) Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264307452-en>. UNEP (2011) Recycling Rates of Metals – A Status Report, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. Graedel, T.E.; Allwood, J.; Birat, J.-P.; Reck, B.K.; Sibley, S.F.; Sonnemann, G.; Buchert, M.; Hagelüken, C