

Recyclage des Cartes Electroniques : Vers une Economie Circulaire

Culture Sciences
de l'Ingénieur

La Revue
3E.I

Alexandre CHAGNES¹

Édité le
12/09/2024

école
normale
supérieure
paris-saclay

¹ Université de Lorraine, CNRS, GeoRessources, 54000 Nancy, France.

Cette ressource fait partie du N° 113 de La Revue 3EI du 3^{ème} trimestre 2024.

Ce document aborde l'économie circulaire appliquée aux cartes électroniques, un type de Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE). Il présente les enjeux environnementaux et économiques liés au recyclage de ces cartes, riches en métaux précieux. Le texte décrit les étapes du recyclage, impliquant des opérations de concentration physique et des opérations hydrométallurgiques pour récupérer ces métaux.

1 - Le principe de l'économie circulaire

L'économie circulaire est un modèle économique qui se distingue de l'économie linéaire par son approche systémique et régénérative des ressources. Alors que le modèle linéaire repose sur un cycle de "produire, consommer, jeter", l'économie circulaire vise à créer un système fermé où les ressources sont utilisées de manière optimale, minimisant ainsi les déchets et l'impact environnemental. Cette approche repose sur plusieurs piliers essentiels qui englobent des concepts tels que la réduction des déchets, la réutilisation, la réparation, la refabrication, et le recyclage, ainsi que la responsabilité accrue du producteur tout au long du cycle de vie d'un produit.

Les piliers de l'économie circulaire sont :

- **Réduction des déchets à la source** : Il s'agit d'une approche proactive visant à minimiser la quantité de matériaux et d'énergie utilisés dès la conception des produits. En repensant les processus de production et en intégrant des méthodes plus efficaces, les entreprises peuvent réduire significativement l'empreinte environnementale de leurs produits. Cela inclut l'utilisation de matières premières durables et renouvelables, ainsi que l'optimisation des procédés pour limiter les pertes de matériaux.
- **Réutilisation et la réparation** : Plutôt que de jeter un produit après son utilisation initiale, l'économie circulaire encourage la réutilisation et la réparation. Ces pratiques prolongent la durée de vie des produits, réduisant ainsi le besoin de nouvelles ressources. La réutilisation implique que les produits ou leurs composants soient utilisés à nouveau sans transformation majeure, tandis que la réparation permet de restaurer des objets endommagés ou défectueux. Cela nécessite non seulement une conception plus robuste des produits, une culture de la maintenance chez les consommateurs et les entreprises.
- **Éco-conception et innovation** : Cela consiste à intégrer des critères environnementaux dès la phase de conception des produits. Les entreprises doivent repenser leurs processus de conception pour créer des produits plus durables, réparables, et recyclables. L'innovation joue un rôle crucial en favorisant le développement de nouvelles technologies et de nouveaux matériaux qui permettent d'atteindre ces objectifs. L'éco-conception ne se limite

pas à la réduction des impacts négatifs, elle vise également à engendrer des impacts positifs pour l'environnement et la société.

- **Recyclage et valorisation des déchets** : Lorsque les produits atteignent la fin de leur vie utile, le recyclage joue un rôle clé dans l'économie circulaire. Ce pilier consiste à récupérer les matériaux des produits usagés pour les transformer en nouvelles matières premières. Le recyclage permet de réduire la dépendance aux ressources naturelles et de limiter l'accumulation de déchets dans l'environnement. En complément, la valorisation des déchets, telle que la valorisation énergétique ou le compostage, contribue également à minimiser l'impact environnemental en tirant parti des résidus qui ne peuvent pas être recyclés.

Au cœur de l'économie circulaire se trouve le concept de responsabilité élargie du producteur (REP). Ce principe stipule que les fabricants et les producteurs sont responsables non seulement de la production des biens, mais aussi de leur gestion en fin de vie. Cela inclut la prise en charge du recyclage, du traitement des déchets, et de la gestion des substances dangereuses. La REP incite les entreprises à concevoir des produits plus durables et faciles à recycler, et à développer des systèmes de collecte et de traitement des déchets efficaces. La responsabilité élargie du producteur se manifeste à travers divers mécanismes, tels que les taxes sur les produits, les systèmes de consigne, et les obligations de reprise des produits usagés. Ces mesures visent à internaliser les coûts environnementaux dans le prix des produits, incitant ainsi les entreprises à adopter des pratiques plus durables et à encourager les consommateurs à participer activement à l'économie circulaire.

Le principe de l'économie circulaire s'applique à tous les objets produits y compris les Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE) qui sont divisés en dix catégories :

- Équipements de gros électroménager (réfrigérateurs, congélateurs, machines à laver, lave-vaisselle, fours, plaques de cuisson, chauffe-eau, radiateurs électriques).
- Équipements de petit électroménager (Aspirateurs, fers à repasser, grille-pain, bouilloires, mixeurs, cafetières, sèche-cheveux, rasoirs électriques).
- Équipements Informatiques et de Télécommunication (ordinateurs, imprimantes, téléphones fixes et portables, routeurs, modems, claviers, souris).
- Équipements de consommation (téléviseurs, moniteurs, chaînes hi-fi, radios, lecteurs DVD, lecteurs Blu-ray, appareils photo, caméscopes).
- Équipements d'éclairage (ampoules fluorescentes, lampes à incandescence, lampes LED, néons).
- Outils électriques et électroniques (perceuses, scies électriques, ponceuses, rabots électriques, tondeuses à gazon électriques, soudeuses électriques).
- Jouets, équipements de loisirs et de sport (trains électriques, voitures télécommandées, consoles de jeux, manettes, équipements de fitness électroniques, appareils de sport connectés).
- Dispositifs Médicaux (moniteurs cardiaques, tensiomètres, thermomètres électroniques, appareils d'assistance respiratoire, équipements de diagnostic).
- Instruments de surveillance et de contrôle (thermostats, détecteurs de fumée, caméras de surveillance, alarmes, instruments de mesure).
- Distributeurs automatiques (distributeurs de boissons et de snacks, distributeurs de billets, distributeurs automatiques de billets de banque, machines de vente de produits divers)

Ces DEEE ont la croissance la plus rapide au monde parmi l'ensemble des déchets produits par l'homme avec une augmentation de 33,8 millions de tonnes à 50 millions de tonnes entre 2010 et 2018 dont 1,5 million de tonnes par an de déchets de cartes électroniques [1, 2]. La quantité de déchets électroniques générée en Europe augmente de 3 à 5% par an, soit trois fois plus que pour les déchets municipaux [3]. Parmi les DEEE définis dans la directive européenne récemment mise à jour [4], les déchets issus des technologies de l'informatique et des télécommunications représentent une source de métaux non négligeable. Considérant que les DEEE contiennent en moyenne environ 2,2% (en poids) de circuits imprimés (PCB), 4,6% de fraction minérale, 9,2% de résidus de broyage, 44,7% de métaux ferreux, 7,5% de métaux non ferreux, 18,3% de plastiques, 12,2% de verre et 1,3% d'autres types de matériaux [5], deux raisons principales expliquent la volonté de mettre en œuvre des procédés de recyclage des DEEE : les préoccupations environnementales, et les économies en énergie et en ressource (ainsi que l'indépendances vis-à-vis de ressources stratégiques).

Dans cet article, nous allons nous intéresser aux technologies de recyclage des cartes électroniques qui appartiennent à la catégorie des DEEE et qui inondent notre quotidien. Leur recyclage est un enjeu majeur puisque le taux de recyclage des cartes électroniques est encore faible et les procédés mis en œuvre sont très énergivores.

2 - Recyclage des cartes électroniques

Les cartes électroniques sont présentes partout dans notre quotidien et leur présence ne fera que de croître dans les années à venir avec la digitalisation de notre société conduisant à l'augmentation des objets connectés, ou encore le développement des véhicules électriques dans lesquels l'électronique joue un rôle central. Ces cartes électroniques contiennent des concentrations en métaux attractives comme le montre le Tableau 1 qui compare les concentrations moyennes en différents métaux contenus dans les minerais avec celles contenues dans les cartes électroniques d'ordinateur, de téléphones portables et d'autres équipements électroniques. Ces données montrent clairement l'intérêt de pouvoir récupérer les métaux contenus dans ce type de DEEE d'un point de vue économique, mais il démontre également la nécessité de développer des procédés hydrométallurgiques [6] dédiés capables d'extraire sélectivement ces métaux dans des matrices complexes dont la composition est très différente de celle que l'on peut retrouver dans les ressources primaires.

*Tableau 1 : Concentrations moyennes (%) en métaux contenus dans leurs minerais et dans les cartes électroniques d'ordinateurs, de téléphones portables et d'autres équipements électroniques [1]. *Indium contenu dans les écrans LCD.*

Éléments	Cu	Fe	Al	Zn	Ni	Sn	Pb	Sb	Au	Ag	Pd	In
Minerais	0,5	30	30	4	1	0,5	4	3	10 ⁻⁴	10 ⁻²	10 ⁻⁴	10 ⁻³
Cartes électroniques	10-20	1-5	2-6	0,5-6	1,1-2,5	1,5-8	0,3-5	0,2-1,8	0,002-0,03	0,03-0,02	0,001-0,02	0,02-0,04

Pour pouvoir valoriser ces métaux, il faut tout d'abord être capable de collecter des cartes électroniques. Cette collecte est organisée par des éco-organismes comme Ecosystem qui est une organisation à but non lucratif en France, agréée par l'État, spécialisée dans la gestion et le recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) [1]. L'objectif d'Ecosystem est de mettre en œuvre des solutions pour collecter, dépolluer, recycler et valoriser ces déchets tout en respectant les réglementations environnementales et en favorisant l'économie circulaire. L'organisation s'occupe de la collecte et du traitement des DEEE dont des lampes et des

équipements professionnels. Elle travaille en collaboration avec des collectivités locales, des entreprises, des distributeurs et des professionnels pour assurer une collecte efficace et un traitement respectueux de l'environnement. Les DEEE sont triés selon leur catégorie. Il est donc possible d'avoir un gisement relativement propre de cartes électroniques. Ces dernières ont des compositions complexes qui varient d'un gisement à un autre. Elles contiennent non seulement des métaux ferreux et des métaux non ferreux, mais aussi des plastiques. La première étape consiste à séparer les plastiques des métaux à valoriser. Pour cela, des procédés de concentration physique sont mis en œuvre. Ils impliquent les opérations suivantes qui sont décrites dans de nombreux ouvrages [1, 6] :

- Broyage des équipements en morceaux de faible taille ;
- Séparation granulométrique ou gravimétrique ;
- Séparation électromagnétique des éléments ferreux à l'aide d'aimants ;
- Tri optique qui permet de séparer les cartes électroniques des autres composants ;
- Séparation des éléments métalliques non ferreux (dont le cuivre) grâce à des courants de Foucault ;
- Séparation des plastiques par flottaison ;
- etc.

D'autres technologies ont été récemment développées avec succès pour produire des concentrés métalliques de qualité à partir de déchets électroniques comme la technologie de délamination, commercialisée par MOB-E-SCRAP, qui consiste à soumettre les cartes électroniques à des impacts (accélérations et décélérations) de forte intensité (jusqu'à 5000 G) avec une fréquence élevée (jusqu'à 6000 impacts par seconde). Cette opération est réalisée dans un Fractionator constitué d'un rotor cylindrique au centre entouré d'un stator également cylindrique. La matière tombe verticalement dans l'espace (environ 30 mm) entre le stator et le rotor, et elle est très fortement accélérée par les outils du rotor avant d'être stoppée par les outils du stator. Ces impacts créent au sein du matériau des forces de cisaillement. Les surfaces de liaison entre les couches ne résistent pas de la même manière du fait des différentes propriétés physiques des couches (densité, plasticité et ductilité). En sortie du Fractionator, les morceaux de plastique conservent à peu près leur forme initiale en raison de leur plasticité, les couches métalliques forment des petites billes (du fait de leur ductilité) et certaines matières minérales comme le verre sont pulvérisées. Cette différenciation facilite la séparation ultérieure par granulométrie, gravimétrie ou d'autres techniques de concentration physique.

Ces opérations de concentration physique judicieusement agencées permettent de produire un concentré de fer, un concentré de plastique et un concentré de cuivre contenant également les autres métaux d'intérêt comme le cuivre, l'or, l'argent, l'étain, le tantale, le gallium, etc. Ces concentrés sont actuellement traités principalement par pyrométallurgie même si l'hydrométallurgie prend une place de plus en plus importante. Les procédés pyrométallurgiques permettent de récupérer le cuivre, l'or, les platinoïdes, mais de nombreux métaux importants comme le gallium, l'indium, le tantale, etc., sont perdus car ils se concentrent dans les scories.

L'hydrométallurgie est une technique alternative à la pyrométallurgie qui permet de réduire les pertes de métaux, de valoriser davantage de métaux contenus dans les cartes électroniques, de réduire la consommation énergétique du processus de recyclage, et de produire des métaux de haute pureté pouvant être directement réinjectés dans la chaîne de valeur. Ces procédés hydrométallurgiques font intervenir différentes opérations unitaires qui ont été décrites dans de nombreux ouvrages [1, 7, 8]. Ce sont les mêmes opérations qui sont utilisées pour l'extraction et la séparation des métaux contenus dans les ressources primaires (mines).

Typiquement, les procédés hydrométallurgiques traitent les concentrés produits par des opérations de séparation physique en faisant intervenir des étapes de mise en solution (lixiviation), d'extraction-séparation (extraction liquide-liquide, extraction liquide-solide, précipitation sélective) et de production du produit semi-fini ou du produit fini (précipitation, cristallisation, électrométallurgie). Il existe de nombreux procédés décrits dans la littérature pour la plupart développés à l'échelle du laboratoire pour extraire les métaux contenus dans les cartes électroniques. Cet article n'a pas pour vocation de faire un état de l'art exhaustif des approches rapportées dans la littérature mais de présenter les principes mis en jeu en décrivant brièvement deux exemple de procédés hydrométallurgiques.

L'or, l'argent et les platinoïdes représentent 70% de la valeur de l'ensemble des métaux présents dans les cartes électroniques. Ainsi, la récupération de l'or est la première priorité suivie du cuivre, du palladium, de l'aluminium, de l'étain, du plomb, du platine, du nickel, du zinc et de l'argent [9]. À titre d'illustration, la lixiviation de l'or peut être réalisée à l'aide de cyanures, d'halogénures, de thiourée, d'eau régale [10]. Le cuivre peut être mis en solution à condition de travailler en milieu acide oxydant. Des acides inorganiques, des acides organiques, des liquides ioniques et même des bactéries ont été proposés pour dissoudre le cuivre des cartes de circuits imprimés [11-18]. Yazici et Deveci [19] ont étudié l'effet des sels de fer(III) sur la lixiviation du cuivre contenu dans les cartes électroniques. Cependant, la récupération du cuivre dans les jus de lixiviation obtenu par dissolution des cartes électroniques par le fer(III) n'est pour la plupart du temps pas abordée alors que le fer(III) est problématique dans les procédés d'extraction liquide-liquide et liquide-solide. Une voie permettant de traiter les jus de lixiviation des cartes électroniques consiste à réaliser une précipitation très sélective sous forme de sulfure métallique [20, 21]. Cette voie a été étudiée par Sethurajan et al. [22] qui ont proposé le schéma de procédé suivant pour traiter des concentrés de carte électronique par une lixiviation acide oxydante utilisant du fer(III) suivie d'une précipitation au sulfure de sodium (NaS) :

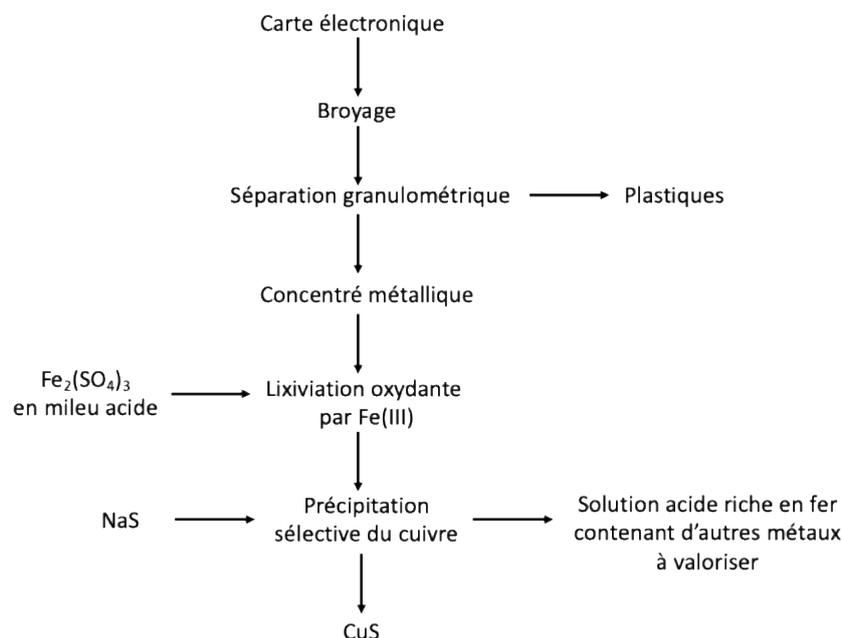


Figure 1 : Schéma de procédé pour la récupération du cuivre contenu dans les cartes électroniques

L'extraction liquide-liquide du cuivre contenu dans diverses matrices a fait l'objet de nombreuses études pour le traitement des minerais cuivrés. Moins d'études abordent la récupération du cuivre contenu dans les jus de lixiviation de cartes électroniques. Les oximes et les hydroxyoximes commercialisés sous le nom d'Acorga et de LIX sont les extractants les plus connus pour extraire le cuivre. À titre d'illustration, l'extraction du cuivre contenu dans les cartes électroniques peut être

réalisée en mettant en œuvre un prétraitement physique conduisant à la production d'un concentré qui est ensuite lixivié en milieu nitrique. Le jus de lixiviation est alors mis en contact avec un solvant d'extraction contenant du LIX 984N (mélange d'aldoxime et de kétoxime) afin de récupérer une solution de cuivre après une étape de dés extraction à l'acide sulfurique. La solution de cuivre obtenue a une pureté suffisante pour envisager une étape d'électrometallurgie par électrodéposition du cuivre (electrowinning) ou la réduction sous hydrogène en cuivre métallique :

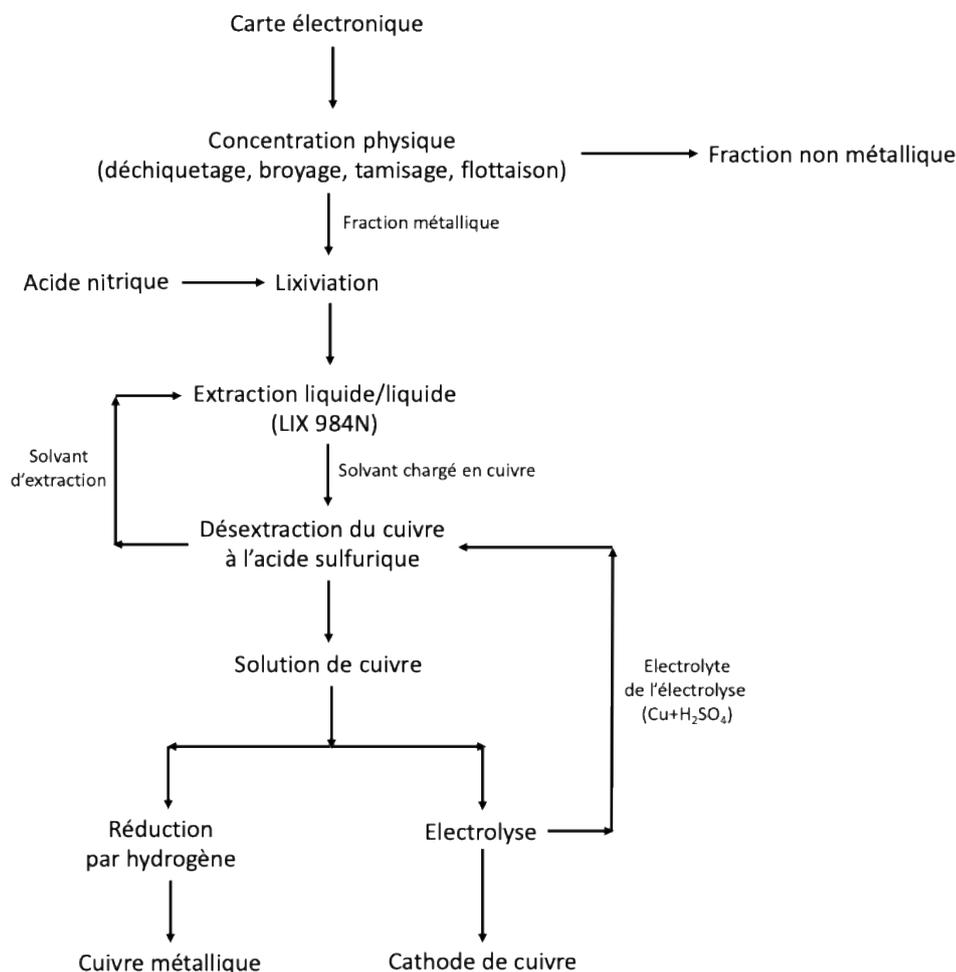


Figure 2 : Schéma de procédé pour la récupération du cuivre contenu dans les cartes électroniques mettant en œuvre une étape d'extraction liquide-liquide

L'électrometallurgie est une opération classique de l'industrie du cuivre. Elle se divise en deux techniques : l'électrodéposition qui a pour but de déposer du cuivre par voie électrochimique sur une cathode à partir d'une solution de lixiviation contenant très peu d'impuretés, et l'électroraffinage qui consiste à augmenter la pureté du cuivre par dissolution-déposition. Au cours de l'opération d'électroraffinage, l'anode produit par un procédé pyrometallurgique contient généralement entre 98.2% et 99.8% de cuivre. Le cuivre contenu dans l'anode est oxydé par voie électrochimique en appliquant un courant et se dissout en solution avant de se déposer sur la cathode par réduction électrochimique. Les impuretés, dont les métaux précieux, se concentrent alors dans le résidu anodique au fond de la cellule d'électroraffinage. La cathode de cuivre ainsi produite atteint une pureté en cuivre de 99.95% tandis que les métaux précieux concentrés dans le résidu anodique peuvent être valorisés soit par pyrometallurgie soit par hydrometallurgie (pour ce dernier cas, les procédés ne sont actuellement pas mis en œuvre à l'échelle industrielle).

3 - Conclusion

L'économie circulaire propose une approche systémique et régénérative des ressources, contrastant avec l'économie linéaire traditionnelle. Le recyclage des cartes électroniques nécessite de développer des procédés de plus en plus sophistiqués pour extraire les métaux précieux contenus dans des déchets dont la composition change au fur et à mesure que les technologies évoluent tout en minimisant l'empreinte environnementale. La combinaison de technologies de séparation physique et de procédés hydrométallurgiques permettent d'extraire et de séparer les métaux contenus dans les cartes électroniques. Toutefois, il reste des défis à relever, notamment la gestion des plastiques et la nécessité d'intégrer des technologies intelligentes et automatisées pour rendre le processus de recyclage plus efficace et économiquement viables. La transition vers une économie circulaire dans ce secteur peut non seulement contribuer à la préservation des ressources naturelles, mais aussi créer de nouvelles opportunités économiques et industrielles, tout en répondant aux enjeux environnementaux globaux.

Références :

- [1]: A. Chagnes, G. Cote, C. Ekberg, M. Nilson, T. Retegan, "Recycling of Waste Electrical and Electronic Equipment: Research, Development and Policies", Elsevier, 2016, 212 pages (ISBN : 9780128033630).
- [2]: B. Ghosh, M.K. Ghosh, P. Parhi, P.S. Mukherjee, B.K. Mishra, *Journal of Cleaner Production* 94, 5-19 (2015).
- [3]: R. Hischier, P. Wäger, J. Gauglhofer J. Does, *Environment Impact Assessment* 25(5), 525-539 (2005).
- [4]: Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE). Official Journal of the European Union, 24 July 2012.
- [5]: ADEME. Electric and Electronic Equipment - Annual Report, <https://librairie.ademe.fr/dechets-economie-circulaire/6662-electrical-and-electronic-equipment-data-2021.html> (17/08/2024).
- [6]: A. Chagnes, "Métallurgie extractive - Hydrométallurgie", Les Techniques de l'Ingénieur, M2235 v4, 21 pages (2022).
- [7]: A. Chagnes, J. Swiatowska (Editeurs), "Lithium Process Chemistry : Resources, Extractions, Batteries and Recycling", Elsevier, 2015, 313 pages (ISBN: 978-0-12-801417-2).
- [8]: A. Chagnes, Chap. 4 : Recyclage des matériaux de la transition énergétique par voie hydrométallurgique, p. 69-93 dans : M. Cathelineau (Ed.), "Le recyclage, enjeu pour l'économie circulaire", ISTE Editions (London), 2023, 333 pages (ISBN 9781789481624).
- [9]: X. Wang, G. Gaustad, *Waste Management* 32(10), 1903-1913 (2012).
- [10]: Z. Wu, W. Yuan, J. Li, X. Wang, L. Liu, J. Wang, *Front. Environ. Sci. Eng.* 11(5), 8 (2017).
- [11]: M. Kaya, *Waste. Manag.* 57, 64-90 (2016).
- [12]: C.J. Oh, S.O. Lee, H.S. Yang, T.J. Ha, M.J. Kim, *J. Air Waste Manag.* 53, 897-902 (2003).
- [13]: J. Cui, L. Zhang, *J. Hazard. Mater.* 158, 228-256 (2008).
- [14]: H. Yang, J. Liu, J. Yang, *J. Hazard. Mater.* 187, 393-400 (2011).
- [15]: E.Y. Yazici, H. Deveci, *Hydrometallurgy* 139, 30-38 (2013).
- [16]: M. Chen, J. Huang, O.A. Ogunseitan, N. Zhu, Y.M. Wang, *Waste Manag.* 41, 142-147 (2015).
- [17]: A. Isildar, J. van de Vossenberg, E.R. Rene, E.D. van Hullebusch, P.N.L. Lens, *Waste Manag.* 57, 149-157 (2016).
- [18]: A. Marra, A. Cesaro, V. Belgiorno, *J. Clean. Prod.* 186, 490-498 (2018).
- [19]: E.Y. Yazici, H. Deveci, *Int. J. Miner. Process.* 133, 39-45 (2014).

- [20]: M. Sethurajan, P.N.L. Lens, H.A. Horn, L.H. Figueiredo, L.H., E.D. van Hullebusch, Leaching and recovery of metals. In Sustainable Heavy Metal Remediation, 1st ed.; Rene, E.R., Sahinkaya, E., Lewis, A., Lens, P.N.L., Eds.; Springer: Cham, Switzerland, 2017; Volume 2, pp. 161-206.
- [21]: M. Sethurajan, M., E.D. van Hullebusch, D. Fontana, A. Akcil, H. Deveci, B. Batinic, J.P. Leal, T.A. Gasche, M.A. Kucuker, K. Kuchta, Crit. Rev. Environ. Sci. Technol. 49, 212-275 (2019).
- [22]: M Sethurajan, E. D. van Hullebusch, Metals 9, 1034 (2019).