



HAL
open science

Le recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques... On n'arrête pas le progrès !

M. Draye, Sophie Legeai, Youssouf Traore, Jonathan Szymczak

► **To cite this version:**

M. Draye, Sophie Legeai, Youssouf Traore, Jonathan Szymczak. Le recyclage des déchets d'équipements électriques et électroniques... On n'arrête pas le progrès !. *L'Actualité Chimique*, 2018, 427-428, pp.100-104. <hal-01840686>

HAL Id: hal-01840686

<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01840686v1>

Submitted on 4 Feb 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Recyclage des DEEE on n'arrête pas le progrès ! Recycling of WEEE we do not stop progress!

¹Micheline Draye*, ²Sophie Legeai, ³Youssef Traoré, ²Jonathan Szymczak

¹Université Savoie Mont Blanc, LCME, F-73000 Chambéry, France

²IJL, Université de Lorraine, 1 bd Arago, 57078 Metz Cedex 3, France

³Morphosis, 576, Boulevard Jules Durand, 76600 Le Havre, France

Prof. Micheline Draye, +33-4-79-75-88-59, micheline.draye@univ-smb.fr

Dr., MCF, Sophie Legeai, +33-3-72-74-91-15, sophie.legeai@univ-lorraine.fr

Dr. Youssef Traoré, +33, youssef.traore@morphosis.fr

Dr. Jonathan Szymczak, +33-2-29-40-34-19, Jonathan.Szymczak@blue-solutions.fr

Résumé

Les produits High Tech, smartphones, écrans LCD, véhicules hybrides, CD-DVDs, piles rechargeables, etc. qui font notre quotidien, nécessitent des métaux parfois rares dont la production est contrôlée par un nombre restreint de pays, principalement la Chine, la Russie, la République Démocratique du Congo et le Brésil. Les risques spécifiques d'approvisionnement liés aux situations d'oligopole ou de quasi-monopole dont ces métaux stratégiques font l'objet, ont poussé l'Union Européenne à chercher d'autres voies d'approvisionnement, la première étant le recyclage d'équipements électroniques et électriques usagés. Parmi ceux-ci, l'indium et le lanthane sont des éléments qui présentent de nombreuses applications High Tech. L'indium est un métal rare associé à l'exploitation des minerais de zinc et d'étain, largement dominée par la Chine. Le lanthane, comme l'ensemble des terres rares, n'existe pas individuellement dans des gisements, mais est lui aussi associé à d'autres métaux. Le recyclage de l'indium et du lanthane contenus dans les équipements en fin de vie semble donc la seule alternative pour remédier à des risques de pénurie. Et, au-delà des aspects économique et stratégique, le recyclage de ces métaux peut constituer une alternative intéressante permettant de diminuer l'exploitation à grande échelle des gisements de minerais les contenant et ainsi, de préserver l'environnement. Dans ce contexte nous proposons un procédé d'électrodéposition du lanthane et d'extraction-électrodéposition de l'indium dans des liquides ioniques faiblement hygroscopiques, le bis(trifluorométhylsulfonyl)imide de 1-octyl-1-méthyl-pyrrolidinium et le bis(trifluorométhylsulfonyl)imide de 1-butyl-1-éthylpipéridinium.

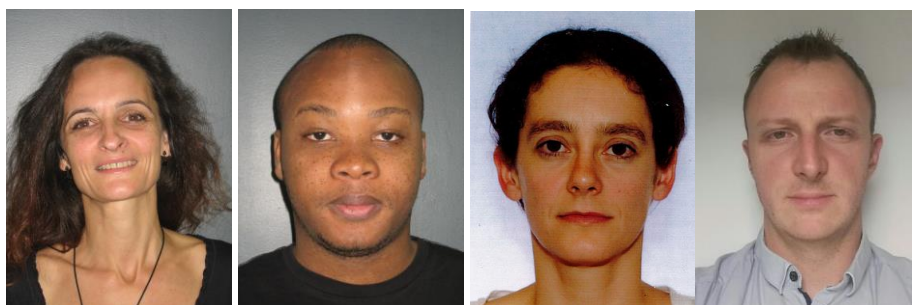
Mots clés : métaux stratégiques et critiques, liquides ioniques, électrodéposition, récupération métallique, hydrométallurgie

Abstract

High Tech products, smartphones, LCD screens, hybrid vehicles, CD-DVDs, rechargeable batteries, etc. which make our day-to-day life, require rare metals whose production is controlled by a limited number of countries, mainly China, Russia, the Democratic Republic of Congo and Brazil. The specific supply risks linked to the oligopoly or quasi-monopoly situations of these strategic metals have prompted the European Union to look for alternative supply routes, the first being the recycling of spent electronic and electrical equipment. Among these, indium and lanthanum are elements that have many high tech applications. Indium is a rare metal associated with the mining of zinc and tin, largely dominated by China. Lanthanum, like all rare earths, does not exist individually in deposits, but is also associated with other metals. The recycling of indium and lanthanum contained in end-of-life equipment therefore appears to be the only alternative to addressing the risks of scarcity. And, beyond the economic and strategic aspects, the recycling of these metals can be an interesting alternative to reduce the large-scale exploitation of mineral deposits containing them and thus to preserve the environment. In this context we propose a process for lanthanum electroplating and indium

extraction and electrodeposition in weakly hygroscopic ionic liquids, 1-octyl-1-methyl-pyrrolidinium bis (trifluoromethylsulfonyl) imide and 1-butyl-1-ethylpiperidinium bis (trifluoromethylsulfonyl) imide.

Keywords: strategic and critical metals, ionic liquids, electroplating, metal recovery, hydrometallurgy



Avec chaque produit équipé d'une pile ou muni d'une prise électrique que nous jetons aux ordures, ordinateurs, téléviseurs, smartphones, baladeurs MP3, pour n'en citer que quelques-uns, nous gaspillons des ressources extrêmement précieuses [1]. En effet, ces déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) contiennent de nombreux métaux desquels les sociétés occidentales sont de plus en plus dépendantes pour assurer l'avantage concurrentiel de leur industrie de haute technologie. Ces métaux dits « critiques », bien que « mineurs » car ils ne sont pas échangés sur les marchés organisés tels que le « London Metal Exchange » (LME) [2], sont pourtant indispensables aux différentes filières de l'économie. Leur criticité est évaluée selon deux principaux critères que sont leur importance pour l'économie et leur risque de rupture d'approvisionnement.

Parmi ces métaux mineurs, l'indium, qui est utilisé chaque année dans plus d'un milliard de produits électroniques tels que les écrans plats et les smartphones, a vu son prix plus que sextupler en 2014 sur le marché mondial pour devenir plus élevé que celui de l'argent. Bien que les réserves mondiales d'indium soient critiques (moins de 200 ppb dans la croûte terrestre), ce métal rare n'est recyclé que dans quelques usines de production en Belgique [3], au Japon [4] et en Corée du Sud [5]. Le Japon est d'ailleurs pionnier en la matière puisque ce pays couvre près de la moitié de ses besoins en indium grâce au recyclage des chutes de production. Le recyclage de l'indium contenu dans les DEE reste par contre relativement marginal dans le monde. Le lanthane qui appartient au groupe des terres rares n'a de rare que le nom de son groupe. En effet, il est présent en quantité abondante un peu partout dans la croûte terrestre mais de façon très disparate. Utilisé comme catalyseur dans l'industrie pétrolière [6] et automobile, pour la fabrication de verres, de céramiques et de lampes à basse consommation, d'alliages à la fois légers et résistants pour l'aéronautique, et essentiel à la fabrication des batteries des véhicules hybrides HEV (Toyota Prius) [7], le lanthane est lui aussi un métal stratégique. La flambée des prix des terres rares en 2011 et le quasi-monopole chinois ont conduit certains pays à relancer l'exploration minière et d'autres à rechercher des solutions de recyclage [8].

Ce n'est toutefois pas seulement un problème de pénurie qui rend indispensable un recyclage des matières premières de valeur. Les montagnes de déchets électroniques qui croissent à une allure vertigineuse dans le monde entier contribuent également pour une part importante à la pollution de l'environnement. L'Agence européenne pour l'environnement a calculé que la quantité de DEEE – entre 20 et 50 millions de tonnes par année – augmente trois fois plus vite que celle de tous les types de déchets ménagers. Un traitement inapproprié des DEEE peut engendrer d'innombrables problèmes d'environnement et de santé, causés entre autres par les métaux lourds libérés.

Les liquides ioniques à température ambiante (RTILs) pour le recyclage de métaux

La conception de procédés de traitement technologiquement sûrs et respectueux de l'environnement est une phase essentielle du développement de procédés industriels propres pour la réhabilitation de sites pollués par des déchets technologiques. Parmi les procédés de récupération de métaux, les méthodes séparatives par extraction liquide/liquide sont depuis longtemps considérées comme des méthodes de choix [9, 10].

L'extraction liquide-liquide emploie cependant des solvants organiques toxiques, inflammables et volatils (COV) et donc incompatibles avec les grands principes de la chimie durable [11].

Dans ce contexte, les liquides ioniques ont fait l'objet d'un grand intérêt ces dernières années pour leur utilisation comme solvants alternatifs aux solvants organiques classiques lors de réactions de catalyse industrielles [12], comme solvants d'extraction [13] ou encore comme électrolytes pour l'électrochimie [14]. En effet, en plus de leur faible volatilité et de leur quasi non inflammabilité [15], ils ont une forte aptitude à solvater à la fois des composés organiques et inorganiques [16,17] et représentent donc une alternative intéressante aux solvants organiques et en particulier pour l'extraction liquide/liquide. Toutefois, lors de leur utilisation pour l'extraction d'ions métalliques, la récupération consécutive des métaux extraits apparaît comme une difficulté potentielle. L'électrodéposition in situ des métaux cibles dans le liquide ionique est une solution potentielle pour résoudre ce problème et permet de récupérer des métaux de grande pureté grâce au caractère sélectif du procédé d'électrolyse [18]. Les liquides ioniques sont en effet des solvants prometteurs pour l'électrodéposition. Constitués uniquement d'ions, ils sont de bons conducteurs et peuvent être utilisés tels quels en tant qu'électrolytes, sans ajout de sel support, contrairement aux solvants moléculaires classiques. Certains d'entre eux possèdent un très large domaine d'électroactivité [19], supérieur à celui de l'eau ou des solvants organiques. Ils permettent également de s'affranchir des inconvénients associés à la réduction des ions H^+ , inévitables dans les solvants protiques [17]. Enfin, contrairement à leurs prédécesseurs, les liquides ioniques de deuxième génération caractérisés par une association cation/anion organiques sont stables vis à vis de l'eau et de l'air et sont liquides dans une large gamme de température [20], permettant ainsi un confort de manipulation similaire à celui rencontré avec les solvants classiques.

Electrodéposition du La dans un liquide ionique

Bien que l'on soupçonne les égyptiens de l'avoir utilisée il y a plus de 3 000 ans pour décorer leurs objets d'art de cuivre rouge, la pratique du dépôt de métal ne s'est élargie aux métaux non décoratifs tels que le nickel, le laiton, l'étain et le zinc qu'au cours des années 1850, grâce à l'évolution des connaissances en électrochimie. Le dépôt de métal a été une pratique courante dans l'industrie sans que la technique n'évolue pendant une centaine d'années et c'est avec l'avènement de l'industrie électronique au milieu du 20^{ème} siècle que de grands changements ont eu lieu dans son matériel et sa chimie. L'électrodéposition ou galvanoplastie est utilisée de nos jours dans l'industrie essentiellement pour le traitement anticorrosion de voitures, de bâtiments et d'appareils électroménagers, et dans le domaine de l'électronique pour la fabrication des circuits imprimés. L'utilisation de cette technique pour la récupération de métaux par voie hydrométallurgique est très peu développée, si ce n'est dans le traitement des bains de galvanoplastie pour la récupération de métaux précieux ou hautement toxiques [21]. Elle présente pourtant de nombreux avantages : sélectivité, récupération de métaux de haute pureté, utilisation d'un réactif « vert », accès à des métaux dont le potentiel d'oxydo-réduction est largement négatif, etc. Cette technique est essentiellement basée sur des méthodes de réduction d'espèces métalliques dissoutes dans l'eau. Malheureusement, les électrolytes aqueux ne conviennent pas pour la récupération de nombreux métaux contenus dans les DEEE, comme les terres rares (RE), en raison de la faible stabilité électrochimique de l'eau. En effet, sa réduction en hydrogène moléculaire intervient avant celle des ions métalliques, empêchant l'électrodépôt du métal (Tableau 1).

Potentiels normaux (V/ENH) des couples RE ^{III} /RE ⁰								
Sc ³⁺ /Sc	Y ³⁺ /Y	La ³⁺ /La	Ce ³⁺ /Ce	Pr ³⁺ /Pr	Nd ³⁺ /Nd	Pm ³⁺ /Pm	Sm ³⁺ /Sm	Eu ³⁺ /Eu
-2,077	-2,372	-2,379	-2,336	-2,353	-2,323	-2,3	-2,304	-1,991
Gd ³⁺ /Gd	Tb ³⁺ /Tb	Dy ³⁺ /Dy	Ho ³⁺ /Ho	Er ³⁺ /Er	Tm ³⁺ /Tm	Yb ³⁺ /Yb	Lu ³⁺ /Lu	H ⁺ /H ₂
-2,279	-2,28	-2,295	-2,33	-2,331	-2,323	-2,319	-2,319	0

Tableau 1. Potentiels normaux des couples RE^{III}/RE⁰, d'après [22]

Ainsi, l'électrodéposition des terres rares est classiquement réalisée dans des solvants organiques [23] ou des sels fondus à haute température [24] qui présentent néanmoins des inconvénients majeurs. En effet, les

solvants organiques sont volatils et inflammables alors que les sels fondus sont hautement corrosifs et l'électrodéposition doit être réalisée à haute température. En outre, ces deux milieux sont hygroscopiques et nécessitent de travailler en atmosphère inerte. Les liquides ioniques ne présentent pas tous ces inconvénients et leur grande stabilité électrochimique donne accès à l'électrodéposition d'un nombre important d'éléments inaccessibles en milieu aqueux dans des conditions plus respectueuses de l'homme et de l'environnement.

Ainsi, des travaux de la littérature décrivent l'électrodéposition du lanthane contenu dans un liquide ionique ; la Figure 1 présente un voltampérogramme caractéristique du système $\text{La}^{\text{III}}/\text{La}^0$ dans le liquide ionique bis(trifluorométhylsulfonyl)imide de 1-éthyl-1-octyl-piperidinium (EOPipNTf₂) (Figure 2) contenant le sel $\text{La}(\text{NTf}_2)_3$. La vague observée entre -1,4V et -2,4 V/Pt correspond à la réduction du La^{III} en La^0 , qui a lieu avant la dégradation cathodique du solvant liquide ionique [25]. Le solvant est ainsi recyclable à l'issue de la récupération du métal, limitant le coût du procédé et son impact environnemental.

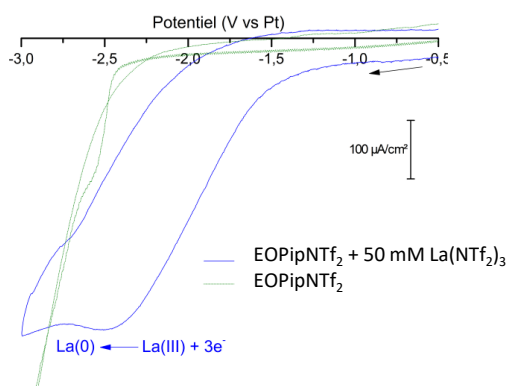


Figure 1. Voltampérogramme cyclique d'une solution de $\text{La}(\text{NTf}_2)_3$ dans EOPipNTf₂, d'après [25]

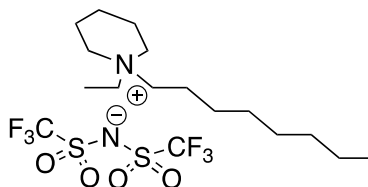


Figure 2. Liquide ionique bis(trifluorométhylsulfonyl)imide de 1-éthyl-1-octyl-piperidinium (EOPipNTf₂)

Le caractère faiblement hygroscopique de certains liquides ioniques permet même de déposer électrochimiquement les terres rares en atmosphère ambiante [26]. C'est ainsi que le bis(trifluorométhylsulfonyl)imide de 1-méthyl-1-octyl-pyrrolidinium (MOPyrroNTf₂) (Figure 3) a été synthétisé et caractérisé en termes de conductivité, de viscosité, de stabilité électrochimique et d'hygroscopie avant et après exposition à l'air ambiant (Tableau 2).

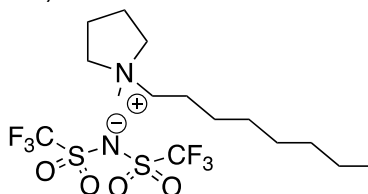


Figure 3. Liquide ionique bis(trifluorométhylsulfonyl)imide de 1-méthyl-1-octyl-pyrrolidinium (MOPyrroNTf₂)

RTIL	Fenêtre électrochimique, V	Limite cathodique, V/Ag/AgCl	Conductivité à 25°C, mS/cm	Viscosité à 25°C, mPa.s	Hygroscopie, [H ₂ O] ppm	
					t=0	t=4h
MOPyrroINTf ₂	4,8	-2,5	0,87	130	1170	1340

Tableau 2. Propriétés physicochimiques du MOPyrroNTf₂ d'après [26]

Des dépôts de La^0 , dont la présence est attestée par analyse EDX, ont alors pu être obtenus pour la première fois à l'air ambiant et à 25°C sur une électrode de platine dans le liquide ionique MOPyrrolNTf₂ (Figure 4) grâce à ce procédé respectueux de l'homme et de l'environnement. Lorsque le dépôt gris de La^0 obtenu est sorti du mélange réactionnel, il réagit avec l'oxygène de l'air pour se recouvrir d'un film blanc d'oxyde de lanthane.

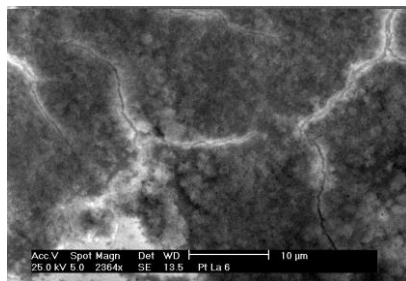


Figure 4. Image d'un dépôt de La^0 obtenue par Microscopie Electronique à Balayage. Dépôt réalisé en atmosphère ambiante dans MOPyrrolNTf₂

Par microscopie électronique à balayage il est possible de constater que les dépôts sont couvrants et composés de cristallites de taille de quelques centaines de nanomètres.

Les liquides ioniques sont donc des solvants prometteurs pour la récupération des terres rares contenus dans les DEEE. La mise en solution des terres rares dans les liquides ioniques pourrait être réalisée soit par (électro)lixiviation directe [27] dans le liquide ionique, soit par extraction liquide/liquide après lixiviation chimique du déchet en milieu aqueux [28]. En effet, le caractère hydrophobe de certains liquides ioniques en fait des solvants potentiels pour l'extraction liquide/liquide et cette propriété a été mise à profit pour la récupération de l'indium contenu dans les DEEE.

Procédé de récupération de l'In par extraction électrodéposition in-situ dans un liquide ionique

En effet, l'ion indium possède un potentiel de réduction qui, bien que moins négatif que celui des cations terres rares ($-0,34$ V/ENH), est également inférieur au potentiel de réduction du proton. Si le dépôt d'indium est possible en milieu aqueux, il s'accompagne ainsi d'un dégagement d'hydrogène qui conduit à des dépôts faiblement adhérents et pulvérulents avec un faible rendement faradique. Les liquides ioniques à température ambiante sont des solvants de choix dans ces conditions difficiles, qui permettent de s'affranchir de cette réaction secondaire. La Figure 5 représente le voltampérogramme du liquide ionique bis(trifluorométhylsulfonyl)imide de 1-butyl-1-éthylpipéridinium (BEPipNTf₂) (Figure 6) contenant le sel InCl_3 , enregistré en atmosphère inerte.

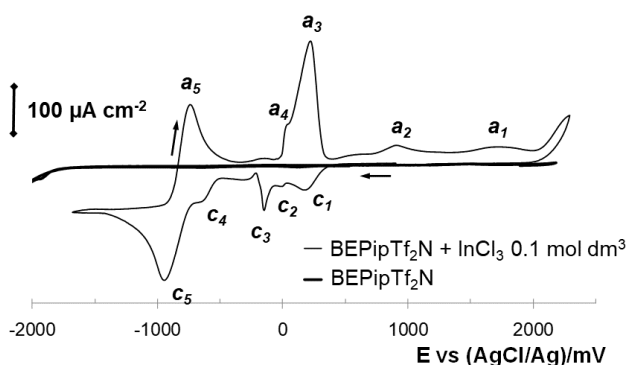


Figure 5. Voltampérométrie cyclique d'une solution sur platine d'après [29]

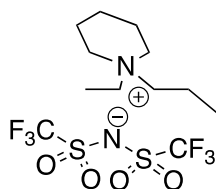


Figure 6. Liquide ionique bis(trifluorométhylsulfonyle)imide de 1-butyl-1-éthylpipéridinium (BEPipNTf₂)

Le comportement électrochimique de l'In(III) dans le milieu liquide ionique est complexe, similaire à celui obtenu par S. Zein El Abedi et Coll. [30]. Une étude approfondie a permis de montrer que tous les signaux de réduction enregistrés, c₁ à c₅, correspondent à la réduction de l'In(III) en In(0). Le liquide ionique BEPipNTf₂ étant faiblement hygroscopique (Tableau 3), l'électrodéposition de l'indium peut être réalisée en atmosphère ambiante.

RTIL	Fenêtre électrochimique, V	Limite cathodique, V/Ag/AgCl	Conductivité à 25°C, mS/cm	Viscosité à 25°C, mPa.s	Hygroscopie, [H ₂ O] ppm	
					t=0	t=4h
BEPipNTf ₂	4,9	-2,4	0,82	290	1180	2130

Tableau 3. Propriétés physicochimiques du BEPipNTf₂ d'après [29]

Ceci a permis d'envisager un procédé en deux étapes pour sa récupération à partir de solutions de DEEE (Figure 7) [29].

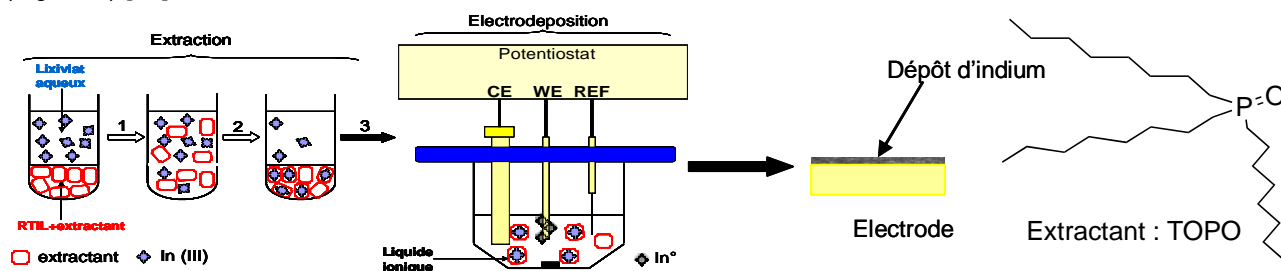


Figure 7. Procédé de récupération de l'indium contenu dans un lixiviat synthétique de DEEE.

L'indium en phase aqueuse est extrait par un extractant, le TOPO (oxyde de trioctylphosphine), dissout dans le BEPipNTf₂, liquide ionique hydrophobe. Après agitation et séparation des deux phases, la phase liquide ionique contenant l'indium est récupérée et l'indium est déposé électrochimiquement in situ à partir du liquide ionique. Le résultat de l'analyse par diffraction des rayons X (DRX) a permis de révéler la présence d'un dépôt d'indium métallique sur une électrode de platine (Figure 8). Ce dépôt peut ensuite être séparé de l'électrode de platine, qui est réutilisée pour une nouvelle électrolyse.

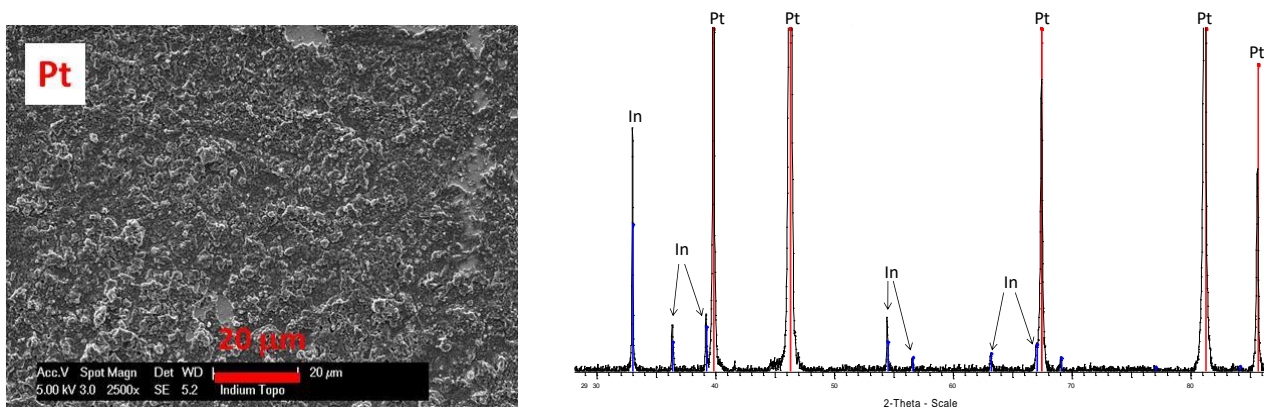


Figure 8 : Image MEB du dépôt métallique sur platine (à gauche) ; diagramme DRX du dépôt métallique

obtenu, d'après [29].

Conclusion

Les résultats obtenus sont intéressants et ouvrent de nouvelles perspectives pour la récupération de l'indium contenu dans nos DEEE. En effet, les filières industrielles de récupération de ce métal à partir des DEEE sont peu développées et elles n'existent que dans quelques pays comme le Japon, la Corée du Sud, et la Chine. Les procédés de récupération de l'indium utilisés, sont énergivores (pyrométallurgique), et peu respectueux de l'environnement (génération d'une grande quantité d'effluents lors des étapes d'hydrométallurgie). Le recyclage de l'indium par extraction liquide/liquide suivie de son électrodéposition in situ dans le liquide ionique apparaît comme un procédé prometteur ; il permet en effet de récupérer l'indium après extraction en s'affranchissant de l'étape de dés extraction souvent difficile dans liquides ioniques et génératrice d'un volume d'effluents complémentaires non négligeable en terme de protection de l'environnement.

Dans le prolongement de ces travaux, des chercheurs de l'Université Savoie Mont Blanc (USMB), de l'Université de Lorraine (JL), de l'Institut de Chimie Séparative de Marcoule (ICSM) et de la société Terra Nova Développement (TND) ont développé un procédé (SILEXE [31]) pour le recyclage du tantale contenu dans les cartes électroniques par extraction électrodéposition dans les liquides ioniques. Une installation pilote de ce procédé est en cours de réalisation [32] ; recyclage des DEEE on n'arrête pas le progrès !

[1] Collins T., Hagmann M., Gaspillage des ressources: les déchets électroniques trop souvent incinérés au lieu d'être recyclés. Une initiative de l'ONU en faveur de l'amélioration du recyclage des déchets électroniques, *EMPA* **2007**.

[2] Barreaux B., Hossie G., Lutfalla S., *approvisionnements en métaux critiques. Un enjeu pour la compétitivité des industries française et européenne*, Document de travail N° 2013-04, juillet, Commissariat général à la stratégie et à la prospective, juillet **2013**.

[3] Buchert M., Schüler D., Blecher D., *Critical Metals for Future Sustainable Technology and their Recycling Potential. United Nations Environment Programme*, July **2009**. (Consulté le 11/09/17) via URL

[http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/DTIx1202xPA-Critical Metals and their Recycling Potential.pdf](http://www.unep.fr/shared/publications/pdf/DTIx1202xPA-Critical%20Metals%20and%20their%20Recycling%20Potential.pdf).

[4] Hocquard C., Guyonnet D., Recyclage des métaux rares. Contexte et besoins. *Environnement et Technique* **2010**, 293, p. 23.

[5] George M. W., *Indium*, United States Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January **2017**, p. 80. (consulté le 11/09/17) via URL: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/indium/indiumcs05.pdf>.

[6] Rumbu R., Introduction à la métallurgie extractive des terres rares, 3^e édition, 2RA publishing **2016**, p. 173.

[7] Htezel P., Bataille D., Etude de faisabilité de la saisine sur « les enjeux stratégiques des terres rares », Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques **2014**, p. 21.

[8] Fay P., La bulle des terres rares n'en finit plus de se dégonfler, *Les Echos* **2012**, p. 20.

[9] Hanson C., *Recent Advances in Liquid-Liquid Extraction*, Hanson Editor, Pergamon Press : Oxford, NewYork, Sydney, Toronto, Braunschweig, **1971**.

[10] M. Draye, G. Le Buzit, M. Lemaire, B. Leclere, P. Doutreluingne, J. Foos, A. Guy, A Recovery Process of Strontium from Acidic Nuclear Waste Streams, *Sep. Sci. Technol* **1997**, 32, 1725.

[11] Anastas P. T., Warner J. C., *Green Chemistry: Theory and Practice*, Oxford University Press : New York **1998**, p.30.

[12] Ellis B., Hubert F., Wasserscheid P., Ionic liquid catalyst for alkylation, World Patent WO 2000041809A1 **1998**.

[13] Turgis R., Arrachart G., Dubois V., Dourdain S., Virieux D., Michel S., Legeai S., Lejeune M., Draye M., Pellet-Rostaing S., Performances and mechanistic investigations of a triphosphine trioxide/ionic liquid system for rare earth extraction, *Dalton Trans.* **2016**, 45, 1259.

[14] Szymczak J. Legeai S., Diliberto S., Migot S., Stein N., Boulanger C., Chatel G., Draye M., Template-free electrodeposition of tellurium nanostructures in a room-temperature ionic liquid., *Electrochemistry Communications* **2012**, 24, 57.

[15] Smiglak M., Reichert W., Holbrey J., Wilkes J., Sun L., Thrasher J., Kirichenko K., Singh S., Katritzky A., Rogers R., Combustible ionic liquids by design: is laboratory safety another ionic liquid myth?, *Chem. Commun.* **2006**, 2554.

[16] Ishiguro S.-I., Umebayashi Y., Kanzaki R., Fujii K., *Pure Appl. Chem.* **2010**, 82, 1927.

[17] Ohno H., *Electrodeposition from Ionic Liquids*, Endres F., Abbott A. P., MacFarlane D. R. (Eds.), Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim **2008**, pp. 47-82.

[18] Lobaccaro P., Raygani, A., Oriani A., Miani N., Piotto A., Kapadia R., Zheng M., Yu Z., Magagnin L., Chrzan D., Maboudian R., Javey A., Electrodeposition of High-Purity Indium Thin Films and Its Application to Indium Phosphide Solar Cells, *J. Electrochem. Soc.* **2014**, 161, D794.

[19] Hayyan M., Mjalli F., Ali Hashim M., AlNashef I., Xue Mei T., Investigating the electrochemical windows of ionic liquids, *J. Ind. Eng. Chem.* **2013**, 19, 106.

[20] Cravotto G., Boffa L., Lévêque J.-M., Estager J., Draye M., Bonrath W., A Speedy One-Pot Synthesis of Second-Generation Ionic Liquids Under Ultrasound and/or Microwave Irradiation, *Aust. J. Chem.* **2007**, 60, 946.

[21] <http://www.siebec.com/ELECTRUM-Recuperateur-de-metaux.html> page consultée le 15 septembre **2017**.

[22] Handbook of Chemistry and Physics, Edition 2010, chap. Analytical Chemistry, Section 8-22, CRC Press, 2010.

-
- [23] An M.Z., Wang J.L., Sun D.Z., Electrodeposition of La–Ni alloy films in a nonaqueous system, *J. Appl. Electrochem.* **2001**, 31, 891.
- [24] Matsuura H., Numata H., Fujita R., Akatsuka H., Reprocessing of spent hydrogen absorbing alloys by using electrochemical techniques in molten salts, *J. Phys. Chem. Sol.* **2005**, 439.
- [25] Szymczak J., *Contribution à l'électrodéposition en milieu liquide ionique de tellure de bismuth en vue de son dopage*, Thèse de Doctorat, Université de Lorraine **2013**.
- [26] Legeai S., Diliberto S., Stein N., Boulanger C., Estager J., Papaiconomou N., Draye M., Room-temperature ionic liquid for lanthanum electrodeposition, *Electrochem. Comm.* **2008**, 10, 166.
- [27] Davris P., Balomenos E., Pantias D., Paspaliaris I., Hydrometallurgy, Selective leaching of rare earth elements from bauxite residue (red mud) using a functionalized hydrophobic ionic liquid, *Hydrometallurgy* **2016**, 164, 125.
- [28] Turgis R., Arrachart G., Dubois V., Dourdain S., Virieux D., Michel S., Legeai S., Lejeune M., Draye M., Pellet-Rostaing S., Performances and mechanistic investigations of a triphosphine trioxide/ionic liquid system for rare earth extraction, *Dalton Transactions* **2016**, 3, 1259.
- [29] Traoré Y., *Perspective nouvelle pour la récupération de l'indium issu des e-déchets par électrodéposition dans les liquides ioniques à température ambiante*, Thèse de Doctorat, Université de Savoie **2012**.
- [30] Abedin S. Z. E., Saad A. Y., Farag H. K., Borisenko N., Liu Q. X., Endres F., Electrodeposition of selenium, indium and copper in an air- and water-stable ionic liquid at variable temperatures, *Electrochimica Acta* **2007**, 52, 2746.
- [31] *Strategic metal recycling in Ionic Liquids by EXtraction and Electrodeposition process* – SILEXE – ANR CD2I Edition **2013**.
- [32] *Un procédé efficace pour recycler le Tantale*, Innovationreveiw.eu, Le Guide de la R&D **2016**, p. 55.