

La ressource scandium : potentiel économique et gîtologie : rapport bibliographique

Yoram Teitler, Michel Cathelineau, Marc Ulrich

▶ **To cite this version:**

Yoram Teitler, Michel Cathelineau, Marc Ulrich. La ressource scandium : potentiel économique et gîtologie : rapport bibliographique. [Rapport de recherche] Programme Scandium. Tome Nickel et Technologie, CNRT Nickel et son environnement. 2016, 36 p. ird-02160827

HAL Id: ird-02160827
https://ird.hal.science/ird-02160827

Submitted on 20 Jun 2019

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

CNRT "Nickel et son environnement"

Rapport scientifique

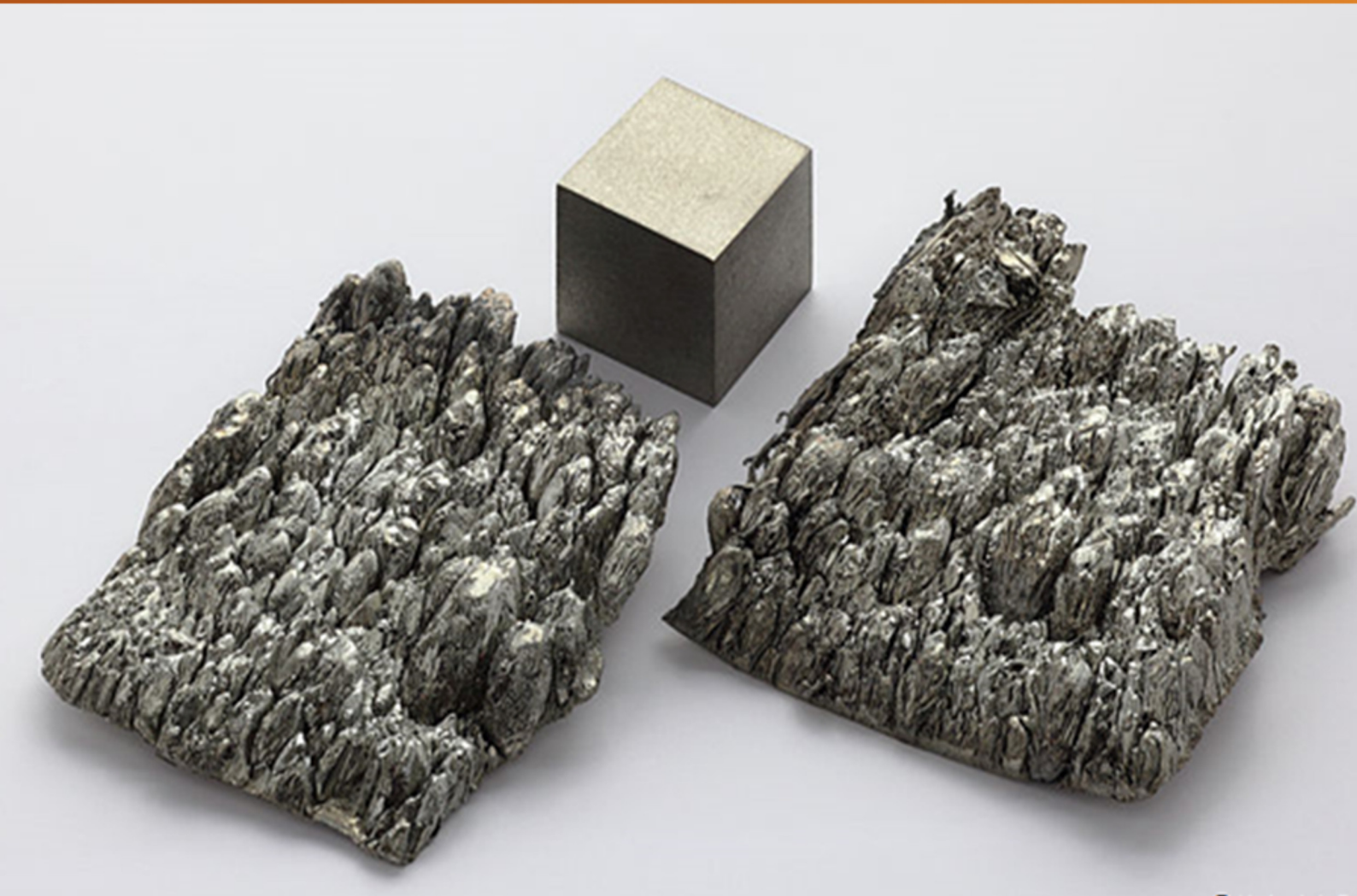
Edition 2016

LA RESSOURCE EN SCANDIUM

Potentiel économique & gîtologie en Nouvelle-Calédonie

Rapport bibliographique

Tome Nickel et Technologie



Rapport Scientifique

2016

LA RESSOURCE SCANDIUM :

POTENTIEL ÉCONOMIQUE & GÎTOLOGIE

RAPPORT BIBLIOGRAPHIQUE



Étude réalisée dans le cadre des programmes de recherche financés par le CNRT « Nickel & son environnement »

CNRT NICKEL & son environnement

Février 2016


UNIVERSITÉ
DE LORRAINE

geo
Ressources

RESSOURCES
21

IPGS


LA RESSOURCE SCANDIUM : POTENTIEL ÉCONOMIQUE ET GÎTOLOGIE

Rapport bibliographique

Avril 2015

AUTEURS :

Yoram TEITLER (Georessources),

Michel CATHELINEAU (Georessources)

Marc ULRICH (ISTerre - EOST)

RÉVISION DU DOCUMENT

Réf.	CSF n° 8PS2013-CNRT.CNRS/SCANDIUM du 120/05/2015			
Version	**Date**	**Rédacteur(s)**	**Qualité du rédacteur(s)**	**Révision pour CNRT**
V1	24/02/2016	Yoram Teitler (Géoressources)	Post-doctorant	F. Bailly CNRT

CITATION DU DOCUMENT

Mots clés : scandium, scandium latéritique

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Y. Teitler, M. Cathelineau, M. Ulrich (2016) – *La ressource scandium : potentiel économique et gîtologie*. Programme « Géochimie et minéralogie du scandium dans les latérites de Nouvelle-Calédonie ». CNRT « Nickel & son environnement ». 35 pages.

SOMMAIRE

1. SOMMAIRE ÉXÉCUTIF 11
1.1. ÉCONOMIE DU SCANDIUM 11
1.2. GÎTOLOGIE ET RESSOURCES MONDIALES 11
1.3. MÉTALLURGIE DU SCANDIUM 12

2. PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES, APPLICATIONS INDUSTRIELLES ET POTENTIEL ÉCONOMIQUE 132
2.1. L'ÉLÉMENT SCANDIUM 132
2.2. APPLICATIONS INDUSTRIELLES 132
2.3. ÉVOLUTION DE LA DEMANDE ET DU COURS DU SCANDIUM 143
2.4. PRODUCTION MONDIALE ..... **ERREUR ! SIGNET NON DÉFINI.**6

3. GITOLOGIE ET RESSOURCES MONDIALES 187
3.1. OCCURRENCES ET RESSOURCES EXISTANTES 187
3.2. LE SCANDIUM LATÉRITIQUE 198
3.2.1. Australie 20
3.2.1.1. Projet SCONI (Metallica Minerals Ltd.) 19
3.2.1.2. Projet Nyngan (Scandium international Mining Corp.) 22
3.2.1.3. Projet Owendale (Platina Resources Ltd.) 23
3.2.1.4. Projet Syerston (CleanTeQ Holdings Ltd.) 23
3.2.2. Philippines 265
3.2.3. Cuba et République Dominicaine 265
3.2.4. Nouvelle-Calédonie 287

4. MÉTALLURGIE DU SCANDIUM 310
4.1. PROCÉDÉS EXISTANTS 310
4.2. APPLICATION AUX LATÉRITES NICKÉLIFÈRES 310

5. RÉFÉRENCES 33

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Prédiction d'évolution de la demande mondiale en scandium. Kaiser, 2014. 154

Figure 2 : Évolution du cours du Scandium. Kaiser, 2014. 165

Figure 3 : Occurrences mondiales en scandium. 198

Figure 4 : Localisation du projet SCONI dans l'état du Queensland (Metallica Minerals Ltd., 2013). 19

Figure 5 : Coupe du gisement de Lucknow à Grants Gully (Metallica Minerals Ltd.2013) 210

Figure 6 : Coupe du gisement de Lucknow à Red Fort (Metallica Minerals Ltd., 2013) 210

Figure 7 : Coupe du gisement de Kokomo (Metallica Minerals Ltd, 2013) 221

Figure 8 : Localisation du projet Nyngan en Nouvelle Galles du Sud, Australie (EMC Metals Corp., now Scandium International Mining Corp.). 243

Figure 9 : Localisation du projet Syerston en Nouvelle Galles du Sud, Australie (*Clean TeQ Holdings* Ltd., 2015). 254

Figure 10 : Distribution des ressources de Sc et des zones de forage pour le projet Syerston (*Clean TeQ Holdings* Ltd., 2015). 265

Figure 11 : Concentrations en Sc (bleu) au sein de trois latérites nickélifères de Cuba et de République Dominicaine. D'après Aiglsperger et al. (2016). 276

Figure 12 : Concentrations en Sc vs. Fe_2O_3 au sein des trois latérites nickélifères étudiées par Aiglsperger et al. (2016), superposées sur les données obtenues par Audet (2008) sur Koniambo (Nouvelle Calédonie). 287

Figure 13 : Évolution des concentrations en scandium dans les différents horizons des latérites de Koniambo (Ulrich, 2013). 29

Figure 14 : Évolution des concentrations en Si, Mg, Fe, Al, Cr, Sc au sein d'un profil latéritique à Koniambo (forage I5690) (Bailly et al., 2014). 28

Figure 15 : Usine pilote HPAL utilisée par SGS Lakefield Oretest (Perth, Australie) pour traiter le minerai de Lucknow. (Metallica Minerals Ltd., 2012). 321

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Évolution du cours estimé du Scandium (USGS) 2008-2012. Gambogi, 2013 14

Tableau 2 : Teneurs et ressources en scandium en fonction de différents cut-off, globalisé sur les gisements de Lucknow et Kokomo (d'après Metallica Minerals Ltd., 2013). 232

LISTE DES SIGLES & ABREVIATIONS

CNRT	Centre National de Recherche Technologique
EOST	École et observatoire des sciences de la Terre
HPAL	High Pressure Acid Leaching
SCONI	Scandium-Cobalt-Nickel
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell
SX-EW	Solvent Extraction - ElectoWinning

Préambule

Ce rapport bibliographique s'inscrit au sein du projet « Géochimie et minéralogie du scandium dans les latérites en NC », initié en octobre 2015 pour une durée de 18 mois, et répondant à l'appel à projet du CNRT nickel et son environnement intitulé « Connaissance de l'ophiolite : de la roche au minerai – métaux stratégiques » sur le volet « Nickel et technologie ». Ce projet multidisciplinaire, cofinancé par le CNRT et le Labex Ressources 21, implique le laboratoire Géoressources, l'EOST, le CEREGE, l'ISTerre, le BRGM, la DIMENC et le SGNC. Les objectifs principaux de ce projet sont d'identifier les facteurs et mécanismes d'enrichissement du scandium dans les profils latéritiques de Nouvelle-Calédonie, afin de déterminer dans quelles conditions celui-ci peut représenter un sous-produit économiquement attractif des gisements à Ni-Co. Ce projet s'articule autour de trois phases : (i) identification des formations potentiellement hôtes des teneurs les plus élevées en scandium, (ii) caractérisation minéralogique et géochimique des phases porteuses du scandium, et (iii) synthèse générale multi-échelle et implications sur l'exploration et la production.

Ce rapport constitue le premier livrable prévu dans le cadre de ce projet à l'issue du premier trimestre de recherche. Les trois aspects traités dans ce rapport sont : (i) l'état du marché du scandium et son intérêt économique, (ii) l'état des connaissances sur la gitologie du scandium, notamment en contexte latéritique ultrabasique, et (iii) l'état des connaissances sur les procédés métallurgiques d'extraction du scandium. Les prochains livrables prévus incluront un rapport d'avancement à mi-parcours (juillet 2016), un rapport final (avril 2017) ainsi que les rapports de post-doctorat et de master II.

1. SOMMAIRE ÉXÉCUTIF

1.1. ÉCONOMIE DU SCANDIUM

- Les principales applications connues ou potentielles du scandium sont (i) les alliages Al-Sc (pour l'aéronautique notamment, mais aussi pour les équipements sportifs haut de gamme), (ii) les piles à combustible oxyde solide (« solid oxide fuel cells », SOFCs), le scandium pouvant y remplacer l'yttrium, et (iii) les lampes halogènes.
- Le marché global du scandium est jusqu'à présent très peu développé (10 à 15 tonnes par an) mais cet élément est considéré par certains analystes économiques comme un potentiel « game changer » (via la généralisation des alliages Al-Sc et/ou le développement des SOFCs).
- Il n'existe pour le moment pas de marché organisé pour le scandium et celui-ci se négocie entre parties privées, essentiellement sous forme d'oxyde Sc_2O_3. Le degré de pureté du produit influe fortement son prix (~2000 à 5000$/kg Sc_2O_3 pour des teneurs de 99,0 à 99,99%).
- L'absence de production fiable et le prix élevé du scandium en limitent pour le moment les applications commerciales. Néanmoins, toute pérennisation et augmentation de la production de scandium favorisera l'intérêt porté à ce métal par les acteurs industriels, générant vraisemblablement un mécanisme d'auto-alimentation de l'offre et de la demande.
- La Chine est le principal producteur actuel de scandium. Celui-ci est essentiellement extrait des résidus miniers des gisements de terres rares (principalement Bayan Obo).

1.2. GÎTOLOGIE ET RESSOURCES MONDIALES

- L'essentiel des ressources en scandium existe en tant que sous-produit de gisements divers : étain, tungstène, nickel, uranium, fluorine, tantale, terres rares. Ces ressources présentent généralement des teneurs modérément élevées (100-200 ppm ou g/t scandium).
- Les latérites nickélifères (et cobaltifères) développées sur roches ultrabasiques peuvent présenter des teneurs en scandium économiquement intéressantes. Le scandium peut donc vraisemblablement y être exploité comme sous-produit.
- D'importantes ressources en scandium ont ainsi été identifiées dans des latérites nickélifères australiennes (projets SCONI, Owendale, Nyngan, Syerston) et ont fait l'objet d'études économiques préliminaires.
- Le projet SCONI apparaît comme le projet australien le plus abouti. Celui-ci comprend notamment les gisements de Lucknow et de Kokomo, vraisemblablement développés sur protolithe pyroxénitique. Les zones d'enrichissement en Sc montrent des teneurs de 200-300g/t Sc et atteignant localement 1580 g/t. Ces zones surmontent ou recoupent partiellement les zones riches en nickel et cobalt au sein des profils latéritiques.

- Des augmentations significatives de la concentration en scandium sont également enregistrées dans des profils latéritiques aux Philippines, à Cuba et en République Dominicaine, ainsi qu'en Nouvelle Calédonie.
- En Nouvelle Calédonie, les latérites développées sur harzburgite dans le massif de Koniambo ont récemment fait l'objet d'une attention particulière. Les teneurs en scandium varient de 7 ppm dans le protore à 80 ppm dans les horizons limonitiques (i.e. au-dessus des zones d'enrichissement maximum en Ni). Des observations similaires ont été faites sur des latérites développées sur dunite dans le massif du Sud (Goro).
- De manière générale, dans les roches ultrabasiques, le clinopyroxène est la phase primaire la plus riche en Sc (~25 ppm contre 7 ppm pour l'olivine), ce qui suggère un potentiel d'exploitation accru dans les latérites développées sur lherzolite ou pyroxénite.
- Le scandium s'associe ensuite, au cours de la latéritisation, aux oxydes et hydroxydes de fer, particulièrement la goethite. Dans les horizons sommitaux, la formation d'hématite secondaire aux dépens de la goethite implique vraisemblablement un processus d'expulsion de scandium, et donc une baisse relative de la teneur en scandium.

1.3. MÉTALLURGIE DU SCANDIUM

- Les procédés hydrométallurgiques (lixiviations, extractions par solvant ou par échange ioniques et précipitations) sont les plus couramment utilisés pour la récupération du scandium. De tels procédés apparaissent ainsi adaptés pour la production de scandium en sous-produit de minerai latéritique à Ni-Co.
- Les procédés de lixiviation de type HPAL généralement utilisés pour le nickel et cobalt permettent également de lixivier l'essentiel du scandium (85-95%) depuis son minerai latéritique.
- Parmi les différents procédés d'extraction connus pour le scandium, l'extraction par solvant apparaît comme étant le plus efficace pour l'extraction de scandium depuis des lixiviats contenant d'importantes quantités d'impuretés, et notamment lorsque le scandium y est présent en traces.
- Les composés organophosphorés acides sont les plus généralement utilisés pour l'extraction et la séparation du scandium (notamment HDEHP, PC-88A, Cyanex 272 et Cyanex 302) et leur efficacité est optimale à des pH de 1,0-1,5.
- Les dernières informations concernant le traitement des minerais latéritiques à Sc-Ni font état de la mise au point de procédés efficaces et de dépôt de brevets. Des usines pilotes d'extraction du scandium ont été développées pour les projets projet SCONI, Nyngan et Syerston en Australie, ainsi que pour le projet Mindoro aux Philippines.
- Il reste néanmoins nécessaire d'améliorer les procédés existants, ou de développer de nouveaux procédés de lixiviation ou d'extraction (par solvants ou par échanges ioniques), afin d'améliorer la sélectivité et l'efficacité de ces processus.

2. PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES, APPLICATIONS INDUSTRIELLES ET POTENTIEL ÉCONOMIQUE

2.1. L'ÉLÉMENT SCANDIUM

Le scandium (Sc) est le 21ème élément du tableau périodique. Sa masse molaire est de 44.9559 g.mol-1, il possède une densité de 2.985 g.cm-3 et un point de fusion élevé (1541°C). Le scandium est le 31ème élément en abondance dans la croûte terrestre, avec une abondance moyenne dans la croûte de 22 ppm (Hedrick, 2009, 2012). Bien qu'appartenant techniquement au groupe des métaux de transition, le scandium possède des propriétés physico-chimiques similaires aux lanthanides et est ainsi souvent classé dans le groupe des terres rares (tout comme l'yttrium). Parce qu'il se substitue facilement au fer et à l'aluminium, le scandium se retrouve essentiellement en traces dans certains oxydes (cassitérite, hématite) et oxy-hydroxydes (wolframite, columbite, goethite). En revanche, les occurrences de minéraux porteurs primaires de scandium (ex. : thortveitite) sont rares (cf. section 3).

2.2. APPLICATIONS INDUSTRIELLES

Dans les années 1950, les scientifiques soviétiques furent les premiers à reconnaître que de faibles quantités de scandium alliées à l'aluminium amélioraient considérablement les propriétés mécaniques de ce dernier. Le scandium fut ainsi historiquement utilisé dans les alliages Al-Sc pour l'aviation militaire soviétique. Depuis, l'utilisation des alliages Al-Sc est restée marginale. De nouvelles « niches » d'application ont été ou sont en cours de développement, et les applications industrielles du scandium incluent :

- Les alliages Al-Sc et Mg-Sc (> 15 alliages, 0.35-2% Sc) développés pour des applications aéronautiques. Dans les alliages Al-Sc, le scandium induit une cristallisation plus fine (inhibiteur de la cristallisation), améliorant considérablement les propriétés mécaniques de l'aluminium (solidité, légèreté, plasticité, résistance thermique et à la corrosion ; Ahmad, 2003 ; Hocquard, 2003 ; Hedrick, 2009, 2012). En particulier, les alliages Al-Sc améliorent la qualité des soudures entre pièces métalliques, permettant un gain de poids significatif. L'efficacité des alliages Al-Sc se rapproche de celle du titane, mais pour un prix de production deux fois moindre (Deschamps, 2003). Appliqué aux moteurs d'avion, son association au magnésium permet également de réduire la consommation électrique et énergétique (Shalomeev et al., 2008). De nouveaux alliages complexes, binaires ou ternaires Al-Mg-Sc (± Zr, Ti, Mn, terres rares), ont aussi été développés pour l'industrie aéronautique (notamment par le groupe Airbus).
- Les piles à combustible oxyde solide (« solid oxide fuel cells », SOFC). Le scandium y remplace l'yttrium et permet une combustion à plus basse température, prolongeant la durée de vie des piles (plus de 10 ans contre 2-3 ans pour l'yttrium, Duyvesteyn et Putnam, 2014). La compagnie Bloom Energy basée en Californie est leader dans la technologie SOFC à des fins commerciales.

- Les équipements sportifs haut de gamme (battes de base-ball, cadres de vélo, raquettes de tennis, etc.).
- Les lampes halogènes de haute intensité, utilisé, sous forme métallique ou d'iodure, pour donner une apparence de lumière naturelle (éclairage des stades, etc…).

2.3. ÉVOLUTION DE LA DEMANDE ET DU COURS DU SCANDIUM

Le marché global du scandium est jusqu'à présent très peu développé avec des volumes négociés estimés de 10 à 15 tonnes par an (Duyvesteyn et Putnam, 2014). Pourtant, le scandium est aujourd'hui considéré comme un des métaux rares les plus importants pour le développement des nouvelles filières énergétiques. Les analystes économiques y voient un potentiel « game changer », aussi bien à travers la généralisation des alliages Al-Sc (aéronautique, automobile) que du développement des SOFCs. Les quantités de piles à combustible à oxyde solide produites et vendues dans le monde ont augmenté de près de 150% par an depuis 2006 (Figure 1). À ce rythme, la demande en scandium par l'industrie des SOFCs pourrait augmenter d'un ordre de grandeur d'ici l'horizon 2020. À quoi pourrait s'ajouter une quantité indéterminée de scandium pour la production d'alliages d'aluminium - scandium utilisés dans l'aéronautique. A moyen terme (5 à 10 ans), l'industrie aérospatiale portera l'essentiel de l'augmentation de la demande en alliage Al-Sc, dans une perspective de réduction de poids des appareils et d'économie de carburant. Une telle démarche a été initiée par Airbus à travers son contrat avec Clean TeQ. À plus long terme (> 10 ans), certains estiment que l'industrie automobile représentera le plus fort potentiel pour le développement économique des alliages Al-Sc, à la condition que les prix deviennent abordables pour ce type d'industrie (Castilloux, 2015).

Cependant, il n'existe jusqu'à présent pas de marché organisé pour l'achat et la vente de scandium. Celui-ci se vend entre parties privées, essentiellement sous forme d'oxyde Sc_2O_3, les prix étant influencés par le volume négocié et la qualité du produit. Depuis les années 1990, la valeur d'achat du scandium a baissé en raison de l'arrivée sur le marché de matériel provenant du démantèlement des stocks militaires du bloc soviétique (Figure 2). Avec le tarissement progressif de la source soviétique et une demande croissante (bien que toujours marginale), cette tendance s'est inversée depuis 2010 et, en 2013, le prix du scandium (sous la forme d'oxyde Sc_2O_3) variait de 900 à 5900 USD/kg, selon le degré de pureté et les quantités négociées (Table 1, Gambogi, 2013). Le scandium est également parfois disponible sous forme métallique à des prix bien supérieurs (>150 US$/g, Table 1).

Tableau 1 : Évolution du cours estimé du Scandium (USGS) entre 2008 et 2012. Gambogi, 2013.

Salient Statistics—United States:	**2008**	**2009**	**2010**	**2011**	**2012[e]**
Price, yearend, dollars:					
Per kilogram, oxide, 99.0% purity	900	900	900	900	NA
Per kilogram, oxide, 99.9% purity[2]	1,400	1,400	1,400	3,700	3,700
Per kilogram, oxide, 99.99% purity[2]	1,620	1,620	1,620	4,700	4,700
Per kilogram, oxide, 99.999% purity[2]	2,540	2,540	2,540	5,200	5,200
Per kilogram, oxide, 99.9995% purity[2]	3,260	3,260	3,260	5,900	5,900
Per gram, dendritic, metal[3]	188.00	189.00	193.00	199.00	206.00
Per gram, metal, ingot[4]	152.00	155.00	158.00	163.00	169.00
Per gram, scandium acetate, 99.99% purity[5, 6]	NA	NA	47.00	48.40	50.10
Per gram, scandium chloride, 99.9% purity[5]	57.40	60.40	62.40	138.00	143.00
Per gram, scandium fluoride, 99.9% purity[5]	224.20	224.60	229.00	235.80	244.00
Per gram, scandium iodide, 99.999% purity[5]	201.00	203.00	207.00	213.00	220.00
Per kilogram, scandium-aluminum alloy[2]	74.00	74.00	74.00	220.00	220.00
Net import reliance[7] as a percentage of apparent consumption	100	100	100	100	100

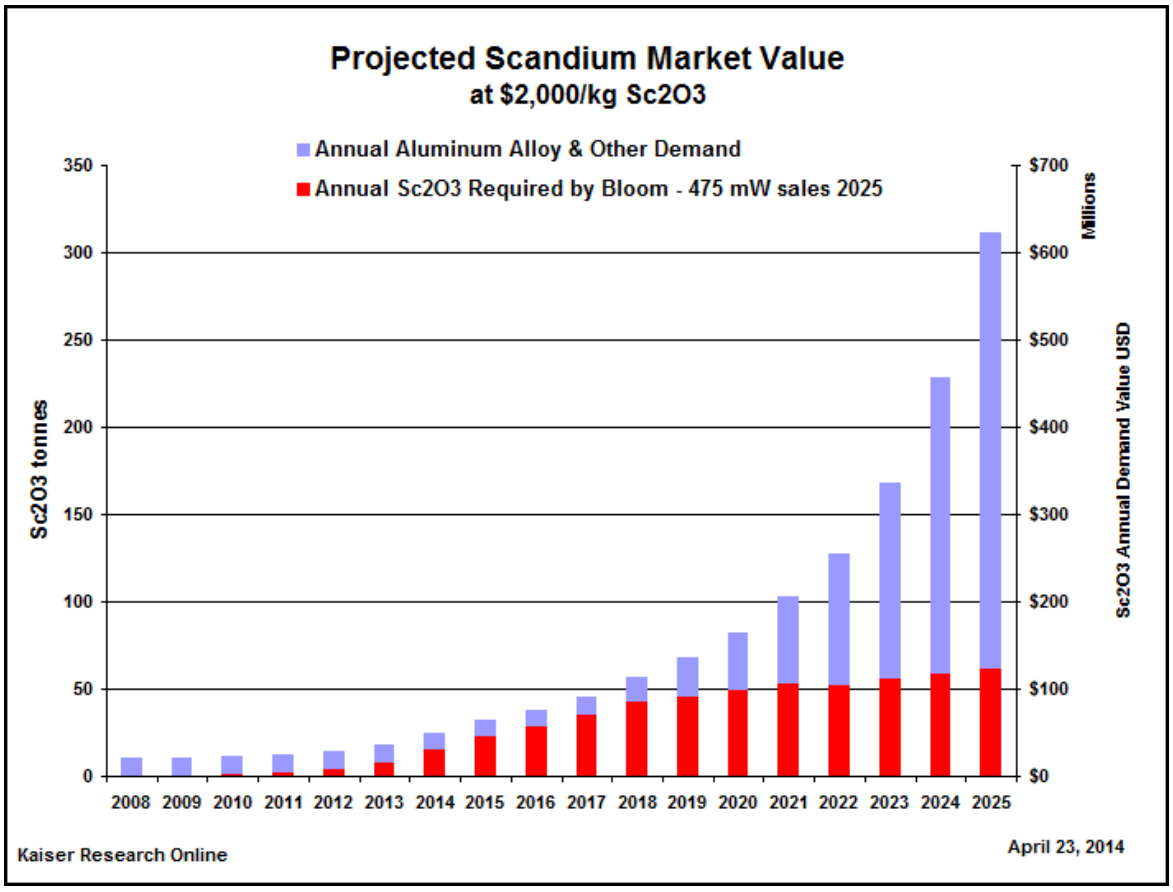


Figure 1 : Prédiction d'évolution de la demande mondiale en scandium. Kaiser, 2014.

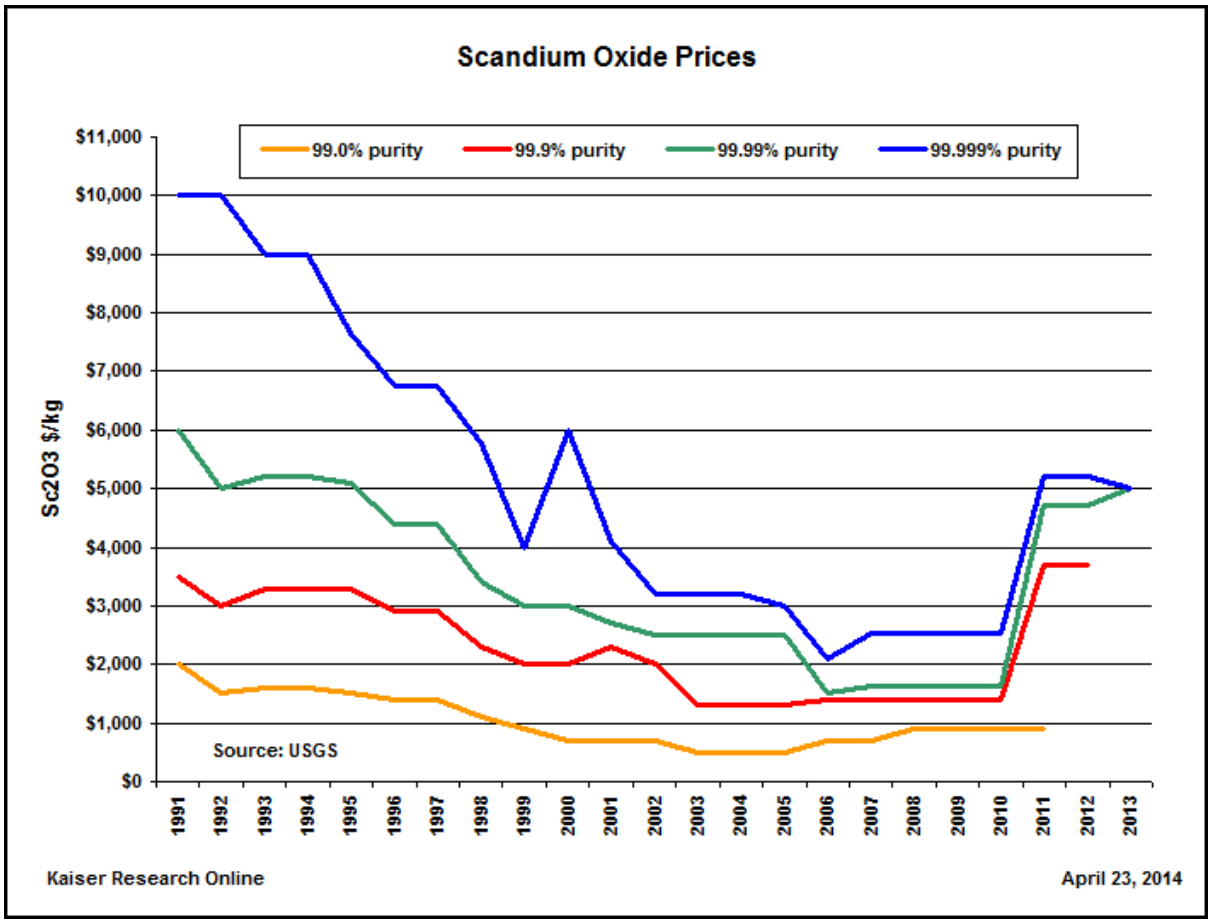


Figure 2 : Évolution du cours du Scandium. Kaiser, 2014.

L'absence de production fiable (cf. section 2.4) à long terme couplée au prix élevé du scandium a jusqu'à présent limité les applications commerciales de celui-ci. Le scandium est un métal rare et cher à cause de sa faible distribution et des difficultés liées à son extraction. Néanmoins, toute pérennisation et augmentation de la production de scandium favorisera l'intérêt porté à ce métal par les acteurs industriels, générant un mécanisme d'auto-alimentation de l'offre et de la demande.

Dès lors qu'une ou plusieurs nouvelles sources d'approvisionnement émergera, il est estimé que le cours de l'oxyde de scandium Sc_2O_3 (pour des puretés de 99,9 - 99,99%) diminuera autour des 1500-2500 USD/kg (Castilloux, 2015). Le marché du scandium est encore incertain et son cours sera vraisemblablement amené à fluctuer. Ainsi, il sera risqué pour une compagnie minière d'exploiter des gisements de scandium en tant que ressource primaire. Par contre, la production de scandium en tant que sous-produit (ex. : de gisements Ni-Co) peut s'avérer économiquement viable, en particulier pour des gisements déjà exploités et pour lesquels la mise en place de procédés métallurgiques adaptés (voir section 4) est possible. Malgré les incertitudes concernant l'évolution du marché du scandium, les perspectives à moyen-long terme apparaissent cependant favorables, en raison de la croissance de la demande attendue pour la prochaine décennie.

2.4. PRODUCTION MONDIALE

Le scandium, dont la production est marginale (actuellement de l'ordre de 10 tonnes d'oxyde Sc_2O_3 par an), est le moins produit de tous les métaux. Celui-ci est essentiellement produit en sous-produit par la Chine durant la production de terres rares, notamment dans le complexe minier de Bayan Obo où les teneurs en scandium peuvent atteindre ~160 ppm (Duyvesteyn et Putnam, 2014). Dans une moindre mesure, la Russie, l'Ukraine et le Kazakhstan produisent également du scandium. Les prospects d'Australie et des Philippines ne sont encore qu'au stade de l'exploration et les ressources publiées par les différentes compagnies minières ne préjugent en rien de leur devenir. Il est cependant intéressant de constater que les teneurs en scandium de ces prospects sont en accord avec les quelques données ponctuelles acquises en Nouvelle-Calédonie (cf. section 3).

3. GITOLOGIE ET RESSOURCES MONDIALES

3.1. OCCURRENCES ET RESSOURCES EXISTANTES

Les ressources potentielles en scandium sont importantes comparées à la demande actuelle. Parce qu'il se substitue facilement aux éléments majeurs tels le fer et l'aluminium, le scandium ne se présente que très rarement en quantités concentrées, et les minéraux contenant des quantités appréciables de scandium comme la pretulite ($ScPO_4$), la kolbeckite ($ScPO_4.2(H_2O)$) ou la thortveitite ($(Sc,Y)_2Si_2O_7$) sont rares (Hocquard, 2003; Kristiansen, 2003). Il est en revanche généralement distribué en trace dans les roches composées de minéraux ferromagnésiens, d'oxydes et oxy-hydroxydes de fer et/ou d'argiles. Ainsi, l'essentiel des ressources en scandium existe en tant que sous-produit de gisements divers, (étain, tungstène, nickel, uranium, fluorine, tantale, terres rares, Figure 3), et souvent concentré dans les résidus de minerai primaire. Ces ressources, présentant généralement des teneurs modérément élevées (100-200 ppm ou g/t scandium), ont fait l'objet d'une synthèse récente (Wang et al., 2011).

- En Chine, l'essentiel des ressources en scandium provient des gisements de terres rares (Bayan Obo), et dans une moindre mesure des gisements d'étain-tungstène et de fer.
- En Russie, le scandium est principalement produit en sous-produit de certains gisements d'uranium. Dans la région de Mourmansk, des ressources potentielles en scandium ont été identifiées au sein du gisement de Kovdor (baddeleyite-apatite-magnetite), où les teneurs moyennes en Sc_2O_3 de la baddeleyite sont de 780 ppm (Kalashnikov et al., 2016).
- Au Kazakhstan également, le scandium est produit en sous-produit de gisements d'uranium. Par ailleurs, certains gisements d'étain-tungstène révèlent des teneurs en scandium de plusieurs milliers de ppm (au sein de minéraux tels que le zircon, columbite, rutile, cassiterite et wolframite) (Kemp et Wolf, 2006).
- En Ukraine, le scandium est produit lors du traitement de minerais de fer. Par ailleurs, le gisement d'uranium de Zheltorechenskoe montre des enrichissements en scandium au sein de pyroxènes et d'amphiboles d'origine hydrothermale (Tarkhanov et al., 1991).
- À Madagascar et en Norvège, des occurrences de scandium sont identifiées au sein de certaines pegmatites contenant de la thorveitite.
- Dans le continent nord-américain, plusieurs ressources en scandium, principalement associées aux gisements d'uranium, de tantale, d'aluminium et de zirconium, ont fait l'objet d'études préliminaires (ex. : projet Buckton de DNI Metals Inc., Alberta, ressources estimées 90 kt Sc_2O_3, production proposée 200t/an ; Castilloux, 2015).
- Enfin, en Australie, plusieurs ressources en scandium associées aux gisements latéritiques nickélifères ont été identifiées. Des ressources similaires existent vraisemblablement dans les latérites de Cuba (Aiglsperger et al., 2016) et de Nouvelle-Calédonie (Audet 2008, Ulrich, 2013). Dans la section suivante (section 3.2), les caractéristiques de ces ressources sont documentées plus exhaustivement.

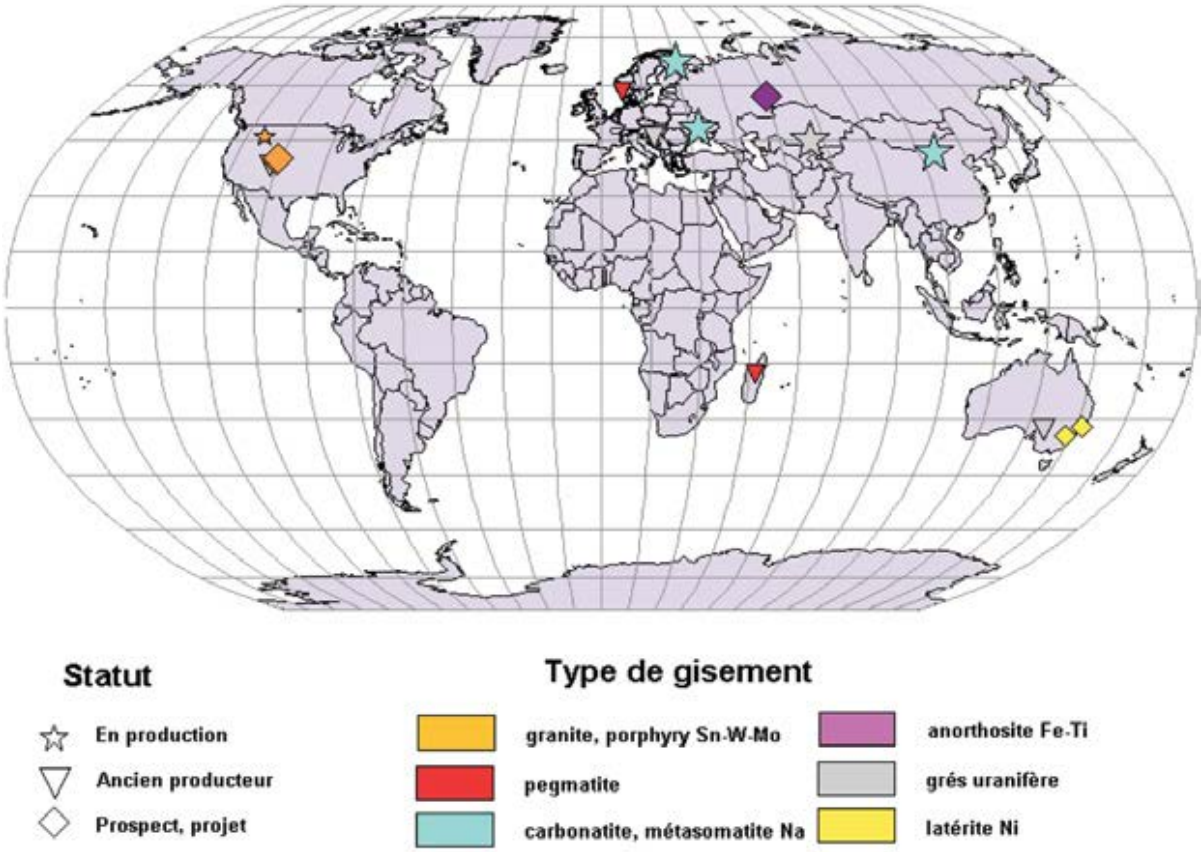


Figure 3 : Occurrences mondiales en scandium.

3.2. LE SCANDIUM LATÉRITIQUE

Des enrichissements supergènes résiduels en scandium sont observés dans les profils d'altération soit sur roches ultrabasiques, soit dans les bauxites (où il est fréquemment associé aux autres terres rares). Les porteurs primaires sont des silicates ferromagnésiens (amphibole, biotite, pyroxène) dont les teneurs vont de 5 à 100 ppm Sc_2O_3. Plusieurs travaux ont déjà mentionné l'enrichissement en scandium (perte de Si, Mg) dans les profils latéritiques développés sur roches riches en ferromagnésiens, comme les péridotites serpentinisées. Dans ces latérites, le scandium est vraisemblablement porté par les oxydes et les smectites. D'importantes ressources en scandium ont ainsi été identifiées dans des latérites australiennes à travers plusieurs campagnes d'exploration. Des augmentations significatives de la concentration en scandium sont également enregistrées dans les profils latéritiques de Nouvelle Calédonie (Audet, 2008 ; Ulrich, 2013) et de la région Cuba-St Domingue (Aiglsperger et al., 2016). Enfin, Wang et al. (2011) considèrent les latérites comme les sources les plus prometteuses pour l'exploitation du scandium.

3.2.1. AUSTRALIE

Au moins quatre projets d'exploitation de scandium latéritique ont été développés en Australie :

3.2.1.1. Projet SCONI (Metallica Minerals Ltd.)

Le projet SCONI (acronyme pour scandium-cobalt-nickel), situé dans l'état du Queensland, est le plus avancé des projets d'exploitation de scandium latéritique en Australie. Il recouvre 5 gisements de Ni (+/- Co) dont deux (Lucknow et Kokomo) présentent des teneurs en Sc économiquement exploitables (Figure 4).

Le gisement de Lucknow est caractérisé par un profil latéritique de 4,7 km de long par 450 m de large comprenant (i) un protore pyroxénitique évoluant progressivement vers (ii) un horizon saprolitique (épaisseur 2-5m) puis (iii) latéritique (épaisseur de l'ordre de 20 à 25m), et enfin (iv) surmonté par un horizon pisolitique faiblement induré (épaisseur variant de quelques centimètres à 3-4 m). Sur les marges du plateau, la latérite apparaît plus massive et fortement siliceuse, notamment à travers la plus forte présence de textures dites de silica-boxwork ainsi que des veines de calcédoine et de magnésite.



Figure 4 : Localisation du projet SCONI dans l'état du Queensland (Metallica Minerals Ltd., 2013).

Le profil d'altération à Lucknow est a priori développé sur protolithe pyroxénitique (contrairement à Greenvale développé sur dunite) ce qui expliquerait les teneurs en scandium plus importantes. A Lucknow, deux zones particulièrement riches en scandium (Grants Gully et Red Fort, Figures 5 et 6) présentent des teneurs de l'ordre de 200-300 g/t, et pouvant localement atteindre 1580 g/t. Généralement, les zones d'enrichissement en Sc surmontent ou recoupent partiellement les zones riches en nickel et cobalt au sein du profil latéritique.

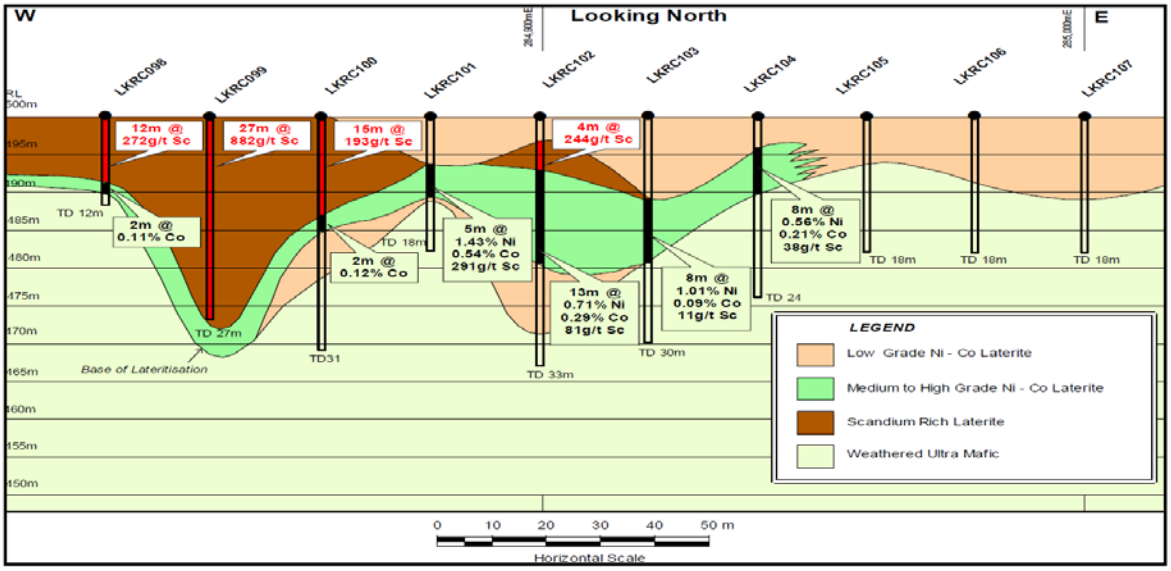


Figure 5 : Coupe du gisement de Lucknow à Grants Gully (Metallica Minerals Ltd.2013)

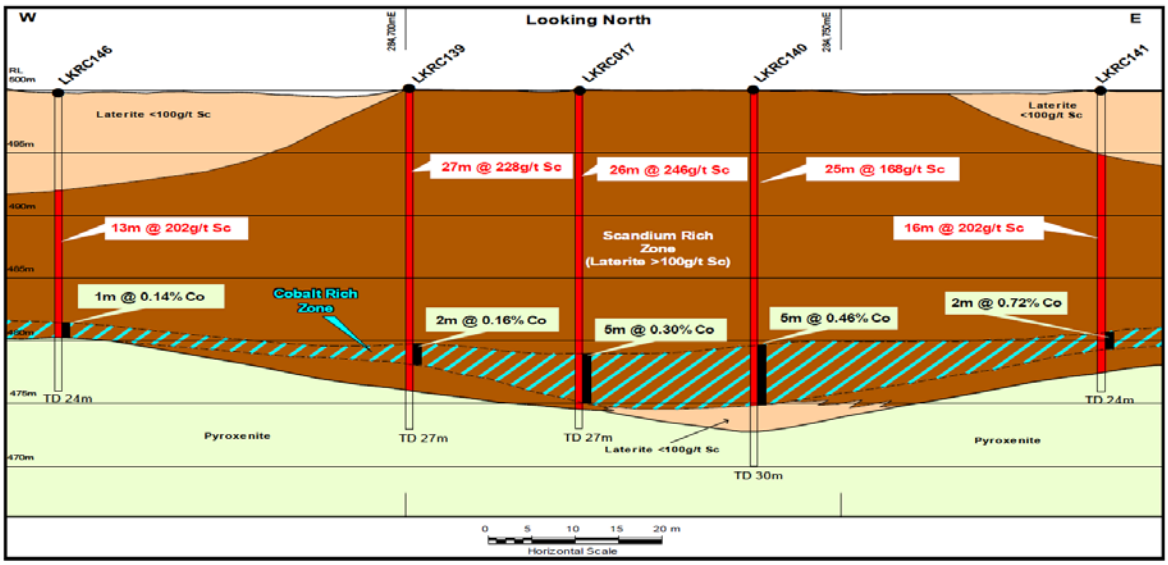


Figure 6 : Coupe du gisement de Lucknow à Red Fort (Metallica Minerals Ltd., 2013)

Similairement à Lucknow, les zones d'enrichissement en scandium dans le gisement de Kokomo surmontent ou recoupent partiellement les zones riches en nickel et cobalt. Cependant, ces zones d'enrichissement en Scandium y sont plus hétérogènes et locales qu'à Lucknow (Figure 7).

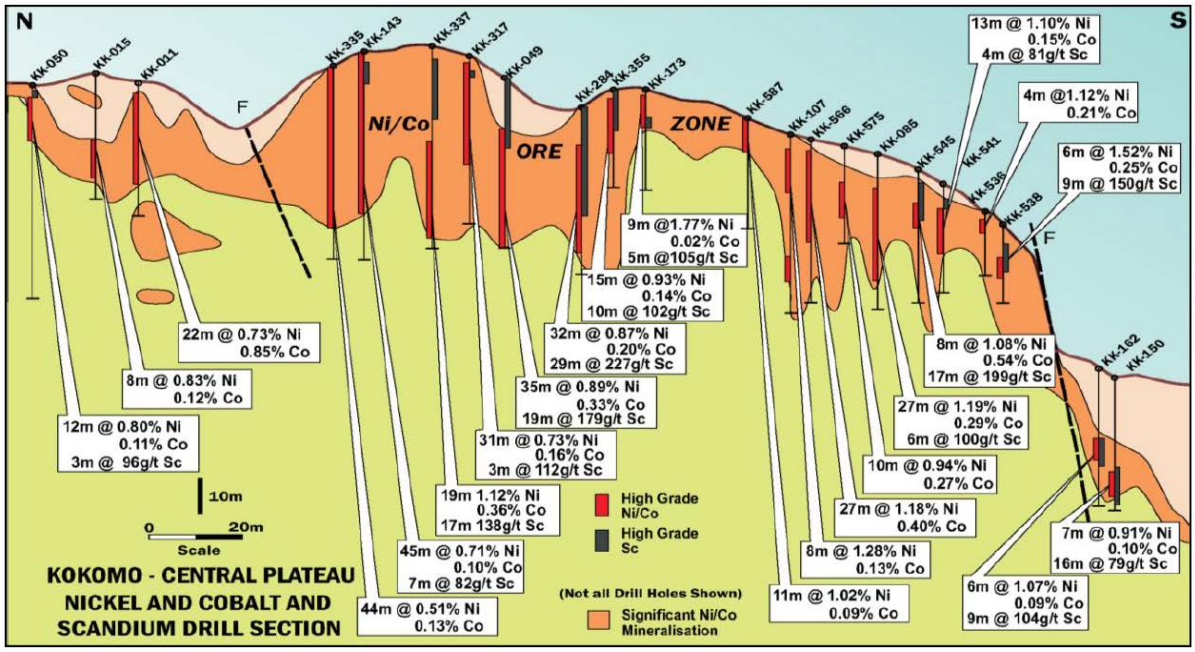


Figure 7 : Coupe du gisement de Kokomo (Metallica Minerals Ltd, 2013)

L'étude économique préliminaire a déterminé la viabilité du projet SCONI notamment via la définition d'un paramètre de teneurs Nieq (équivalent nickel) pour le minerai tel que :

Nieq =(Ni + 1.5Co + 0.01Sc).

Si bien que des teneurs élevées en Co et en Sc participent significativement à la valeur globale du minerai (1% Co => augmentation de Nieq de 1,5 %, et 100 ppm Sc => augmentation de Nieq de 1%). Ainsi, selon la valeur de cut-off considéré (spécifique au Sc ou globalisé sur Nieq), les teneurs et volumes de scandium varient telles qu'indiquées en Table 2.

Tableau 2 : Teneurs et ressources en scandium en fonction de différents cut-off, globalisé sur les gisements de Lucknow et Kokomo (d'après Metallica Minerals Ltd., 2013).

Cut-off	Teneur Sc (g/t)	Ressource minerais (Mt)	Ressource Sc (t)	Ressources Sc_2O_3 (t)
100 g/t Sc	162	12	1950	2990
70 g/t Sc	131	20	2613	4000
1 % Ni_{eq}	107	24	2576	3950
0.7 % Ni_{eq}	74	43	3224	4943

L'étude de faisabilité réalisée en 2013 a proposé un durée d'activité de 20 ans avec une production de 51 t/an Sc_2O_3 et un coût de production de 1120 AU$/kg. Metallica a annoncé fin 2012 la signature d'un accord avec le fabricant de SOFCs Bloom Energy, prévoyant une production de 30 à 60 t/an Sc_2O_3. Depuis 2013 et jusqu'à ce jour, aucune information n'a été rendue publique quant à l'évolution de ce projet.

3.2.1.2. Projet Nyngan (Scandium International Mining Corp.)

Le projet Nyngan abrite le gisement de Gilgai (Figure 8), considéré comme la plus grande ressource primaire en scandium au monde. Les ressources y sont estimées à 12Mt de minerais avec des teneurs de l'ordre de 260 ppm Sc_2O_3, incluant 1,5Mt à 330 ppm. La viabilité du projet a été validée par une évaluation économique préliminaire, proposant une production sur 20 ans de l'ordre de 30 t/an Sc_2O_3 (99,9%) et un coût de production de 700 AU$/kg.



Figure 8 : Localisation du projet Nyngan en Nouvelle Galles du Sud, Australie (EMC Metals Corp., now Scandium International Mining Corp.).

3.2.1.3. Projet Owendale (Platina Resources Ltd.)

Le gisement d'Owendale est développé à partir du complexe ultrabasique alaskéen d'Owendale. Initialement développé pour tester la présence de platinoïdes, le projet Owendale a révélé l'existence de zones riches en scandium (300-500 g/t) dans certains horizons latéritiques. Les ressources en scandium y sont estimées à :

23,7 Mt à 384 g/t Sc (i.e. ~ 9100 t Sc ou 14000 t Sc_2O_3) pour un cut off à 300 g/t

ou

54,5 Mt à 306 g/t Sc (i.e. ~16700 t Sc ou 25700 t Sc_2O_3) pour un cut off à 200 g/t

L'étude de faisabilité propose une durée d'activité de 70 ans avec une production de 30 t/an Sc_2O_3 et un coût de production de 598 AU$/kg. En juillet 2014, Platina Resources Ltd. a annoncé un accord avec le groupe chinois Honfine pour la production et la vente de 15 t

Sc_2O_3/an. Platina Resources Ltd. a annoncé par la suite un accord similaire avec Hunan Oriental Scandium Co. Ltd, pour la production et la vente de 5 t Sc_2O_3/an.

3.2.1.4. Projet Syerston (Clean TeQ Holdings Ltd.)

Le Projet Syerston (Nouvelle Galles du Sud) est associé au gisement latéritique éponyme à Ni-Co, développé sur dunite au sein du complexe ultrabasique de Tout (Figures 9, 10), similaire géologiquement au complexe d'Owendale. L'épaisseur de latéritisation atteint généralement 35-40 m. En Novembre 2014, Clean TeQ a annoncé pour le projet Syerston des ressources de 25,4 Mt à 635 g/t Sc_2O_3 (soit environ 400 g/t Sc). En particulier certains intersects de forage révèlent localement des teneurs jusqu'à 1135 g/t Sc (Clean TeQ Holdings Ltd., 2015). Le projet pourrait produire 40-50 t/an Sc_2O_3 pendant 20 ans. Clean TeQ a récemment annoncé un accord avec Airbus APWorks et un accord avec KBM Affilips.

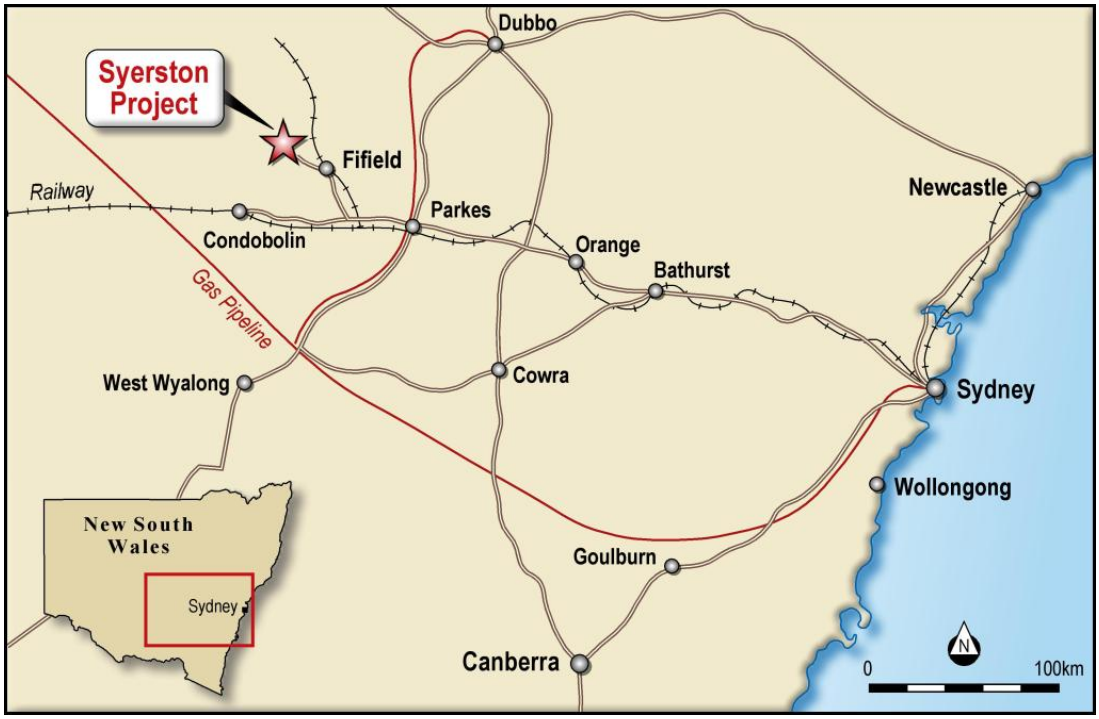


Figure 9 : Localisation du projet Syerston en Nouvelle Galles du Sud, Australie (*Clean TeQ Holdings* Ltd., 2015).

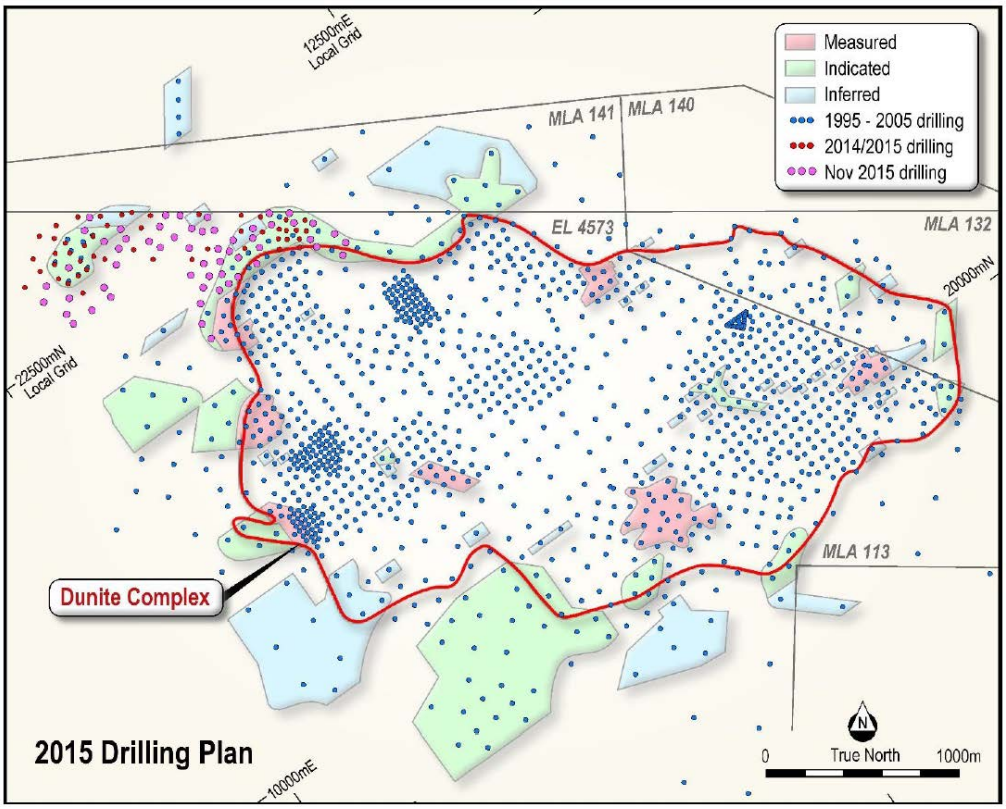


Figure 10 : Distribution des ressources de Sc et des zones de forage pour le projet Syerston (*Clean TeQ Holdings* Ltd., 2015).

3.2.2. PHILIPPINES

Aux Philippines, la société Intex Resources explore actuellement un gisement latéritique à Ni-Co-Sc-REE sur l'île de Mindoro. Ce gisement est développé sur des ophiolites ultrabasiques formant une chaîne d'environ 130 km de long et 25 km de large (400 km^2) et traversant l'île du SE au NO. Les teneurs en Sc des limonites sont de l'ordre de 60 g/t. Les tests réalisés montrent que 90% du scandium des limonites est récupérable par le procédé HPAL. La production annoncée pourrait être de l'ordre de 80t Sc_2O_3/an (Krajka, 2013).

3.2.3. CUBA ET RÉPUBLIQUE DOMINICAINE

Plusieurs gisements de nickel latéritique exploités à Cuba et en République Dominicaine contiennent des teneurs économiquement intéressantes en scandium. Dans ce sens, deux districts miniers, développés depuis des péridotites serpentinisées (Moa Bay à Cuba et Falcondo en République Dominicaine), ont récemment fait l'objet d'une étude et publication scientifique par Aiglsperger et al. (2016).

Les latéritiques de Moa Bay, principalement développées sur harzburgite (+/- dunite), sont classifiées comme appartenant au type oxyde (Gleeson et al., 2003). Neuf gisements individuels y sont reconnus, produisant au moins 34200t Ni et 3800t Co par an (2012). Les gisements latéritiques du district de Falcondo en République Dominicaine (sept gisements distincts), sont au contraire de type Mg-silicate hydratés. Ceux-ci contiennent des ressources en nickel de l'ordre de 70 Mt à des teneurs de 1,5%. Les profils latéritiques à Moa Bay et à Falcondo présentent une succession caractéristique d'horizons d'altération (roche mère, saprolite, limonite inférieure, limonite supérieure et cuirasse latéritique), mais ces horizons sont développés de manière erratique et les profils complets sont rarement préservés. Selon Lewis et al. (2006), le développement de ces latérites s'est initié au Miocène.

L'étude d'Aiglsperger et al. (2016) sur certains de ces gisements montre que les teneurs moyennes en scandium dans la limonite supérieure sont de 70-80 ppm (ou g/t), et atteignent localement 120 ppm (Figure 11). La bonne corrélation entre Fe et Sc (Figure 12) indique que le scandium est essentiellement concentré dans les produits finaux d'altération (oxydes et oxy-hydroxydes de fer).

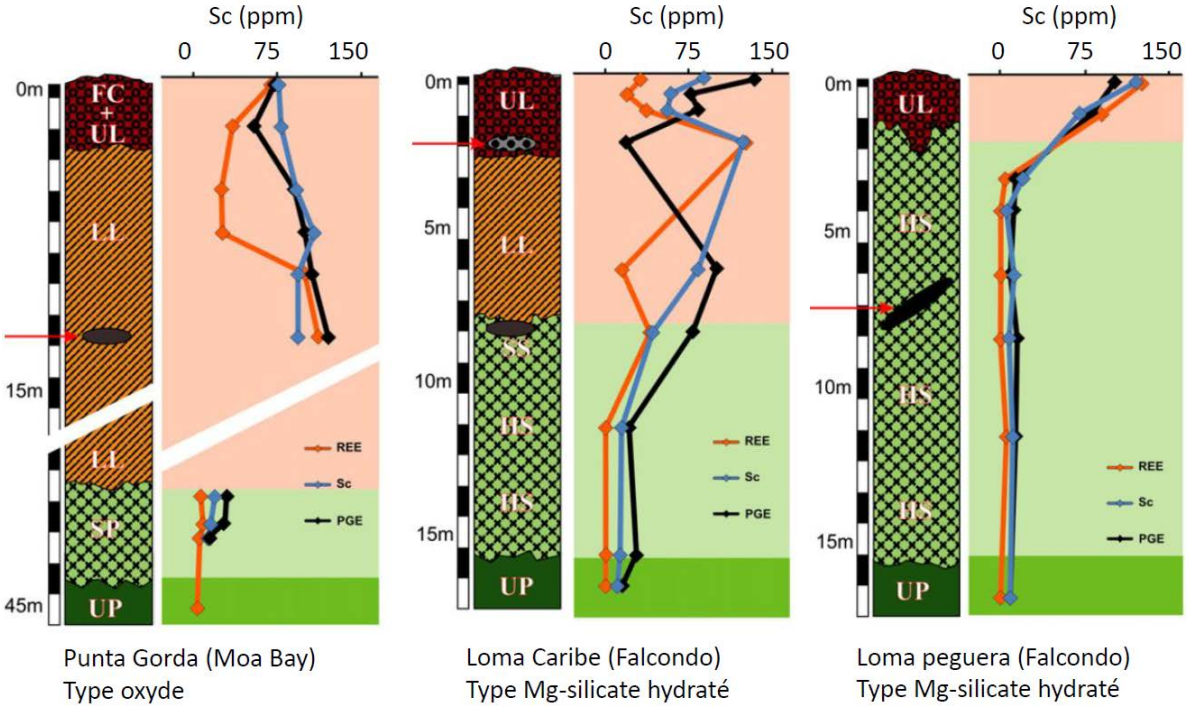


Figure 11 : Concentrations en Sc (bleu) au sein de trois latérites nickélifères de Cuba et de République Dominicaine. D'après Aiglsperger et al. (2016).

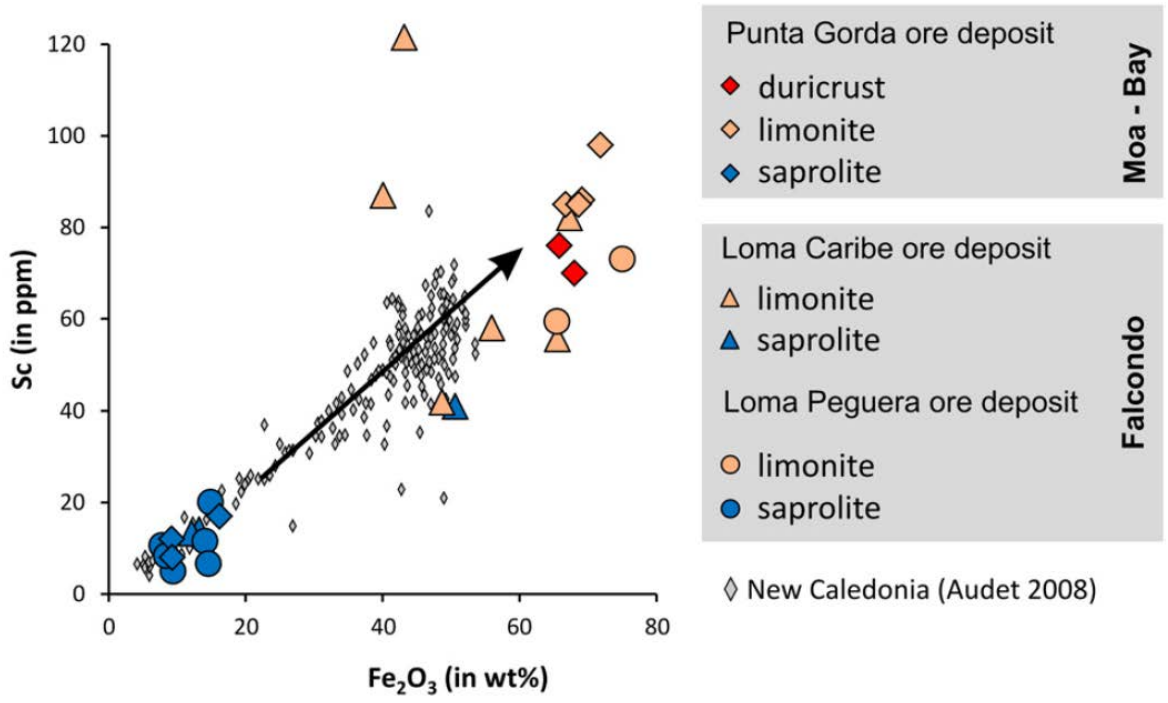


Figure 12 : Concentrations en Sc vs. Fe_2O_3 au sein des trois latérites nickélifères étudiées par Aiglsperger et al. (2016), superposées sur les données obtenues par Audet (2008) sur Koniambo (Nouvelle Calédonie).

3.2.4. NOUVELLE CALÉDONIE

Certaines latérites nickélifères de Nouvelle Calédonie présentent également des teneurs significatives en scandium. A cet égard, les latérites développées sur harzburgite dans le massif de Koniambo ont fait l'objet d'une attention particulière. Audet (2008) montre que les concentrations en scandium varient de 7 ppm dans le protore harzburgitique à 80 ppm dans les horizons limonitiques (i.e. au-dessus des zones d'enrichissement maximum en Ni). Le clinopyroxène est la phase primaire la plus riche en Sc (~25 ppm contre 7 ppm pour l'olivine), ce qui suggère par ailleurs un potentiel d'exploitation accru dans les latérites développées sur lherzolite ou pyroxénite. Une très forte corrélation entre le scandium et le fer est observée tout au long de la séquence d'altération, suggérant une association entre le scandium et les oxydes et hydroxydes de fer, particulièrement la goethite. Les teneurs en fer et scandium au sein des horizons les plus superficiels (latérite rouge et cuirasse) montrent cependant une déviation significative par rapport à cette corrélation, vers de plus basses teneurs en scandium. Il est suggéré que, dans ces horizons sommitaux, la formation d'hématite secondaire aux dépens de la goethite, implique un processus d'expulsion de scandium, et donc une baisse relative de la teneur en scandium (Ulrich, 2013). Dans une moindre mesure, les teneurs en scandium sont également corrélées à celles du chrome. Des résultats similaires ont été obtenus par Ulrich (2013) (Figure 13) ainsi que par Bailly et al. (2014) (Figure 14).

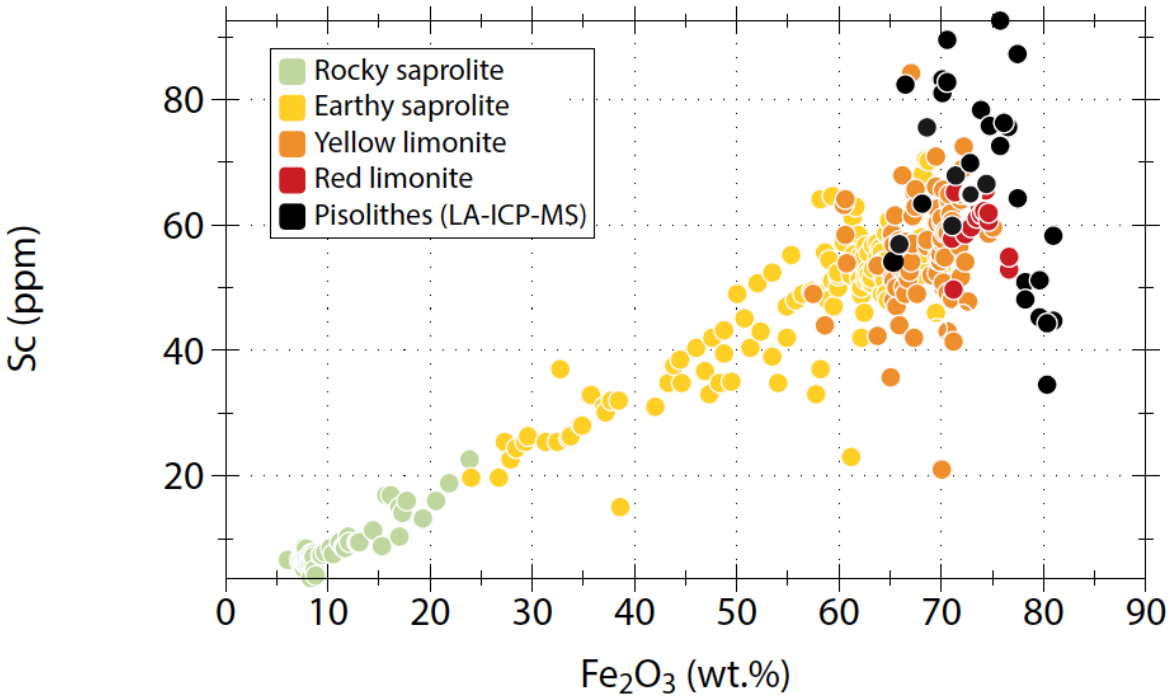


Figure 13 : Évolution des concentrations en scandium dans les différents horizons des latérites de Koniambo (Ulrich, 2013).

Des teneurs significatives en scandium (jusqu'à 75 ppm) ont également été identifiées au sein des latérites développées sur dunite dans le massif du Sud (Goro). Enfin, les latérites développées sur pyroxénites (ex.: Monéo) montrent localement des teneurs en scandium jusqu'à 200 ppm.

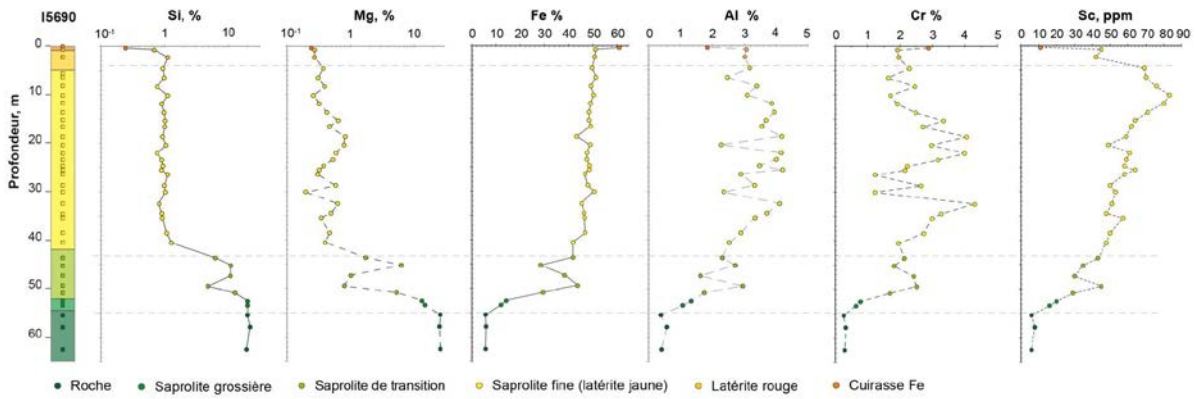


Figure 14 : Évolution des concentrations en Si, Mg, Fe, Al, Cr, Sc au sein d'un profil latéritique à Koniambo (forage I5690) (Bailly et al., 2014).

Ulrich (2013) suggère que, similairement au scandium, les terres rares sont résiduellement enrichies au sein des horizons latéritiques, mais à teneurs trop faibles pour en envisager l'exploitation (∑REElatérites < 10 ppm; ∑REEpéridotites << 1 ppm).

4. MÉTALLURGIE DU SCANDIUM

4.1. PROCÉDÉS EXISTANTS

L'extraction du scandium est actuellement principalement réalisée par deux processus: la pyrométallurgie et l'hydrométallurgie. Les procédés pyrométallurgiques sont a priori appropriés pour le traitement de minerais à haute teneur en scandium. Cependant, les procédés hydrométallurgiques sont les plus couramment utilisés pour la récupération du scandium (Wang et al., 2011). Les procédés hydrométallurgiques (comportant principalement des lixiviations, extractions par solvant ou par échange ioniques et précipitations) permettent d'obtenir des degrés de pureté des métaux que les procédés pyrométallurgiques ne permettent pas d'obtenir. Ils ont aussi l'avantage d'être relativement moins énergivores et permettent le traitement de minerais de natures et teneurs variées.

Parmi les différents procédés d'extraction connus pour le scandium, l'extraction par solvant apparaît comme étant le plus efficace pour l'extraction de scandium depuis des lixiviats contenant d'importantes quantités d'impuretés, notamment lorsque le scandium y est présent en traces (Wang et al., 2011).

Les composés organophosphorés acides sont les plus généralement utilisés pour l'extraction et la séparation du scandium (notamment HDEHP, PC-88A, Cyanex 272 et Cyanex 302) et leur efficacité est optimale à des pH de 1,0-1,5 (Haslam et Arnall, 1999 ; Wang et al., 2011). La capacité d'extraction du scandium décroit avec l'augmentation de l'acidité du lixiviat pour des solutions modérément acides en raison de mécanismes d'échanges cationiques. A contrario, la capacité d'extraction augmente avec l'acidité du lixiviat pour des solutions fortement acides. Les composés organophosphorés neutres sont aussi largement utilisés pour l'extraction et la purification de scandium depuis des solutions d'acidité modérée à forte.

Par ailleurs, les techniques conventionnelles d'échange ionique sont également adaptées pour la préparation de scandium à haut degré de pureté. Cependant, ces techniques sont peu efficaces lorsque le scandium est présent en traces et que des nombreux éléments délétères sont présents en quantités significatives. Enfin l'extraction par membrane liquide est considérée comme une technique potentiellement efficace pour pré-concentrer le scandium, mais requérant encore un meilleur contrôle de la stabilité des émulsions.

4.2. APPLICATION AUX LATÉRITES NICKÉLIFÈRES

Pour les gisements latéritiques nickélifères de type limonitique (e.g. gisements de Moa à Cuba ou de Goro en Nouvelle-Calédonie) ou smectitique (gisements australiens), les métaux économiques (Ni et Co) sont, dans certains cas, extrait du minerai via des procédés hydrométallurgiques. Ceux-ci incluent (i) des lixiviations de type HPAL (pour High Pressure Acid Leaching) à faible pH et haute température (> 250 °C) et (ii) des purifications par solvant et electro-extraction (SX-EW pour solvent extraction - electrowinning). De tels procédés apparaissent applicables pour la co-extraction du scandium au sein de ces gisements. La lixiviation de minerai latéritique nickélifère par procédé HPAL permet efficacement de mettre le scandium en solution (> 94%, Koryakov et Medvedev, 1994).

Après extraction du fer et de l'aluminium, et après récupération du nickel et du cobalt (e.g. via des précipités sulfurés), le scandium peut ensuite être extrait du lixiviat à l'aide de solvants. Cependant, la co-extraction d'éléments tels que le fer, titane, zirconium, uranium, thorium et les terres rares peut interférer dans le processus d'extraction du scandium.

Les dernières informations concernant le traitement des minerais latéritiques à Sc-Ni font état de la mise au point de procédés efficaces et de dépôt de brevets (e.g. Kimura et al., 1999). Une usine pilote d'extraction du scandium a ainsi été développée par Metallica Minerals Ltd. pour la ressource de Lucknow (projet SCONI) en Australie (cf. section 3.2). Cette usine pilote a traité, sur une période de 10 jours, 4400 kg de minerai (contenant 276g/t Sc, 0,36 % Ni et 0,07% Co). La lixiviation par HPAL a permis la mise en solution d'environ 85% du scandium contenu dans le minerai. Les quantités d'acide utilisées pour la lixiviation dépendent largement des teneurs en fer et magnésium dans le minerai, le magnésium étant l'élément le plus problématique dans ce sens. L'extraction du scandium depuis lixiviat, via l'utilisation de solvants, a ensuite permis de produire de l'oxyde de scandium à des puretés proches de 99,99% (Becker, 2012). À la fin de l'année 2012, il était ainsi mentionné que Metallica Minerals Ltd. prévoyait d'initier la production de scandium à échelle industrielle vers la fin de l'année 2015.



Figure 15 : Usine pilote HPAL utilisée par SGS Lakefield Oretest (Perth, Australie) pour traiter le minerai de Lucknow. (Metallica Minerals Ltd., 2012).

Par ailleurs, d'autres usines hydrométallurgiques pour le traitement de scandium sont vraisemblablement en cours de développement, dont notamment une usine pour le projet australien Nyngan, qui devrait permettre de produire 28t Sc_2O_3/an (Duyvesteyn et Putnam, 2014). Selon Duyvesteyn et Putnam (2014), le minerai de Nyngan est similaire, d'un point de vue extraction, à celui de Lucknow. Il est cependant mentionné que les teneurs légèrement plus faibles en fer et significativement plus faibles en magnésium pour le minerai de Nyngan

(1,1-1,6% Mg et 31,6-34,9% Fe pour Lucknow contre 0,4% Mg et 28,8% Fe pour Nyngan), permettent une économie d'environ 32% sur les quantités d'acide nécessaires à la lixiviation.

Entre 2004 et 2008, Clean TeQ et BHP Billiton ont développé une technique d'extraction dite de « resin-in-pulp » (RIP) utilisant une combinaison de procédés de sorption et de désorption par échanges ioniques. Cette technique, permettant d'extraire et de concentrer le Ni et Co depuis des lixiviats de minerai latéritique à des coûts très compétitifs, est vraisemblablement adaptée pour l'extraction du scandium. Dans ce sens, Clean TeQ développe actuellement une usine pilote pour traiter le minerai du projet Syerston.

Enfin, en 2013, Intex a rapporté des résultats préliminaires prometteurs pour l'extraction du scandium depuis le minerai latéritique de Mindoro (Philippines). La lixiviation par procédé HPAL montre un taux de récupération du scandium depuis le minerai de l'ordre de 90%. Les procédés utilisés pour extraire le scandium du lixiviat ne sont pas explicités par Intex, mais il est mentionné que plus de 99% du scandium présent dans le lixiviat est extrait, et que la co-extraction d'autres éléments (notamment Ni) est négligeable (Grennes, 2013).

Il reste néanmoins nécessaire d'améliorer les procédés existants, ou de développer de nouveaux procédés de lixiviation ou d'extraction (par solvants ou par échanges ioniques), afin d'améliorer la sélectivité et l'efficacité de ces processus (Wang et al., 2011).

5. RÉFÉRENCES

- Ahmad, Z., 2003. The properties and application of scandium-reinforced aluminum. Jom-J Min Met Mat S 55, 35–39
- Aiglsperger, T., Proenza, J.A., Lewis, J.F., Labrador, M., Svojtka, Rojas-Puron, A., Longo, F., Durisova, J. (2016) Critical metals (REE, Sc, PGE) in Ni laterites from Cuba and the Dominican Republic. Ore Geology Reviews 76 (1) 127-147
- Bailly, L., Ambrosi, J.P., Barbarand, J., Beauvais, A., Cluzel, D., Lerouge, C., Prognon, C., Quesnel, B., Ramanaïdou, E., Ricordel-Prognon, C., Ruffet, G., Sevin, B., Wells, M., Yans, J. (2014) Projet NICKAL – Typologie des minerais latéritiques de Nouvelle-Calédonie et facteurs de concentration de Co et Ni
- Becker, G. (2012) Metallica confident of scandium off-takes for SCONI. Interview de Gavin becker par Charles Macdonald, Australian Journal Of Mining, September-October 2012, 8-11
- Castilloux, R. (2015) Why Everyone Is Talking About Scandium. Interview de Ryan Castilloux par Brian Sylvester, The Gold Report (5/4/15)
- Clean TeQ Holdings Limited (2015) Drilling confirms and extends high-grade scandium zones at Syerston, 21 December 2015
- Clean TeQ Holdings Limited (2016) Syerston Scandium Feasibility Study Update, 11 january 2016
- Deschamps, Y., 2003. Les enjeux du scandium dans la filière superalliages. Rapport du BRGM
- Duyvesteyn, W.P.C., Putnam, G.F. (2014) Scandium: A review of the element, its characteristics, and current and emerging commercial applications. EMC Metals Corporation May 2014, 12pp.
- Gambogi, G. (2013) Scandium, U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries 2013
- Gleeson, S.A., Butt, C.R., Elias, M. (2003) Nickel laterites: a review. SEG Newsl. 54, 11–18
- Grennes, H. (2013) Intex Resources Stock Exchange Notice August 2013
- Haslam, M., Arnall, B. (1999) An Investigation into the Feasibility of Extracting Scandium from Nickel Laterite Ores, ALTA Ni/Co 1999, Pressure Leaching and Hydrometallurgy Forum, Perth Western Australia, May 1999
- Hedrick, J., 2012. Scandium, USGS Minerals Yearbook. Mineral Commodity Summaries 2012
- Hedrick, J.B., 2009. Rare earths. USGS Minerals Yearbook 2007, 60.1–60.19
- Hocquard, C. (2003) Le Scandium: Economie et gîtologie (No. RP-52460-FR). BRGM report

- Kaiser, J.A. (2014) Recommendation Strategy for EMC Metals Corp. Kaiser Research Online 23 avril 2014
- Kalashnikov, A.O., Yakovenchuk, V.N., Pakhomovsky, Ya.A., Bazai, A.V., Sokharev, V.A., Konopleva, N.G., Mikhailova, J.A., Goryainov, P.M., Ivanyuk, G.Yu. (2016) Scandium of the Kovdor baddeleyite–apatite–magnetite deposit (Murmansk Region, Russia): Mineralogy, spatial distribution, and potential resource. Ore Geology Reviews 72 (2016) 532–537
- Kemp, U., Wolf, D. (2006) Anomalously high Sc contents in ore minerals from Sn–W deposits: Possible economic significance and genetic implications. Ore Geology Reviews 28 (2006) 103–122
- Kimura, A., Murai, K., Yakushiji, H. (1999) Process for recovering scandium from nickel-containing oxide ore. European patent Specification, pacific Metals Co. Ltd.
- Koryakov, V.B., Medvedev, A.S. (2004) Improvement of autoclave leaching of complex scandium-containing ores. Tsvetnye Metally, No.2, 45-46
- Krajka, D. (2013) Sumitomo va produire du scandium aux Philippines, L'Usine Nouvelle 14 mars 2013
- Kristiansen, R., (2003) Scandium-mineraler i Norge. Stein 14–23
- Lewis, J.F., Draper, G., Proenza, J.A., Espaillat, J., Jiménez, J. (2006) Ophiolite-related ultramafic rocks (serpentinites) in the Caribbean region: a review of their occurrence, composition, origin, emplacement and nickel laterite soils. Geol. Acta 4, 237–263
- Metallica Minerals Ltd. (2012) Metallica completes scandium recovery test program – stage one, ASX release 8 March 2012
- Metallica Minerals Ltd. (2013) SCONI Project, North Queensland Nickel-Cobalt and Scandium Resource upgrade, ASX release 21 October 2013
- Platina Resources ltd. (2013) Owendale updated Resource estimate increases Platinum and Scandium content, ASX release 3 October 2013
- Shalomeev, V.A., Lysenko, N.A., Tsivirko, E.I., Lukinov, V.V., Klochikhin, V.V. (2008) Structure and properties of magnesium alloys with scandium. Met Sci Heat Treat+ 50, 34–37.
- Tarkhanov, V.A. et al. (1991) Zheltorechenskoe vanadii-skandievoye mestorozhdeniye. Geol Rud Mestor, No. 6, 150-156
- Ulrich, M. (2013) Enrichissement en Scandium des profils latéritiques de Nouvelle-Calédonie : Origine, spéciation et potentiel d'exploitation. Unpublished report
- Wang, W., Pranolo, Y., Cheng, C.Y. (2011) Metallurgical processes for scandium recovery from various resources: A review. Hydrometallurgy 108, 100–108


UNIVERSITÉ
DE LORRAINE


geo
Ressources

CNRT "Nickel et son environnement"

Edition 2016

Tome Nickel et Technologie

