



HAL
open science

Carboscories : carbonatation minérale en Nouvelle-Calédonie. Rapport de synthèse

Solène Touzé, Thierry Augé, Françoise Bodénan, Imane Benhamed, Carine Julcour-Lebigue, Florent Bourgeois, Laurent Cassayre, Jaouher Diouani, Florian Ploquin, Farid Juillot, et al.

► **To cite this version:**

Solène Touzé, Thierry Augé, Françoise Bodénan, Imane Benhamed, Carine Julcour-Lebigue, et al.. Carboscories : carbonatation minérale en Nouvelle-Calédonie. Rapport de synthèse. [Rapport de recherche] Programme Carboscories. Tome Nickel et Technologie, CNRT Nickel et son environnement. 2015, 22 p. ird-02160828

HAL Id: ird-02160828

<https://ird.hal.science/ird-02160828>

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"

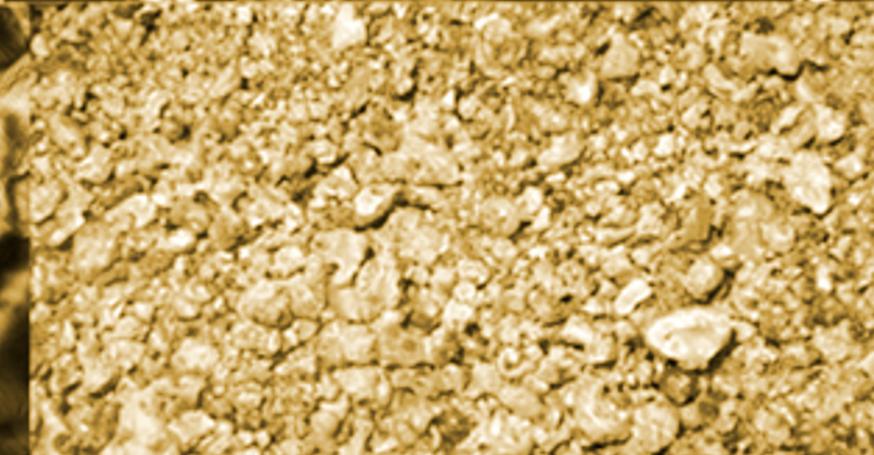
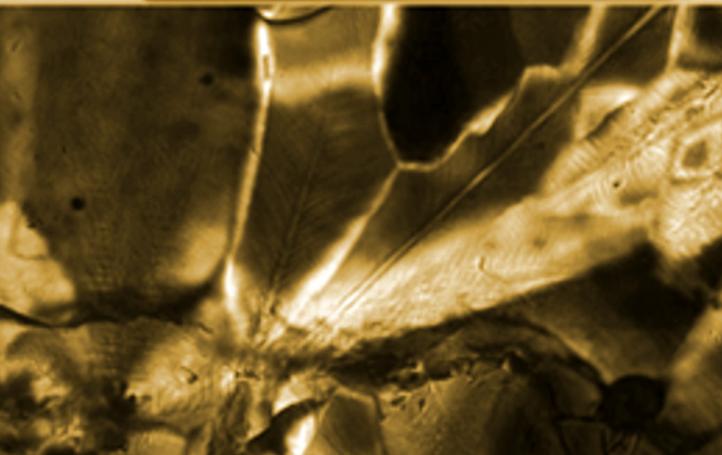
Rapport scientifique

Edition 2015

CARBOSCORIES
Carbonatation minérale en Nouvelle-Calédonie

Rapport de synthèse

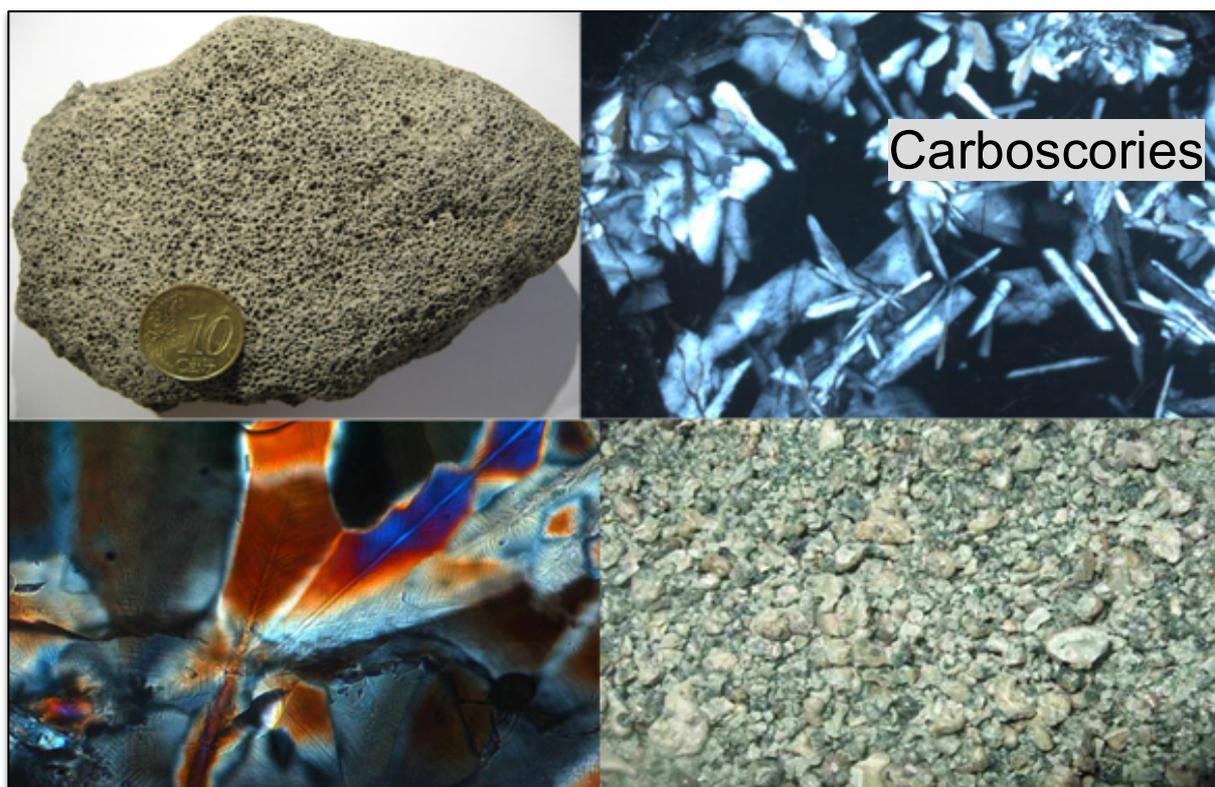
Tome Nickel et Technologie



Rapport Scientifique 2015

CARBOSCORIES

RAPPORT DE SYNTHÈSE



Rapport de synthèse
Décembre 2015

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

CNRT
NICKEL
& son environnement



« CARBOSCORIES »

Rapport de synthèse

Décembre 2015

Auteurs

Solène Touzé, Thierry Augé et Françoise Bodéan – BRGM, Orléans

Imane Benhamed, Carine Julcour, Florent Bourgeois, Laurent Cassayre et Jaouher Diouani - Laboratoire de Génie Chimique (LGC), Toulouse

Florian Ploquin, Farid Juillot et François Guyot - Institut de minéralogie, de physique des matériaux et de cosmochimie (IMPMC), Paris

REVISION DU DOCUMENT

Réf.	CSF no.10CNRT.BRGM/Carboscories du 15/12/2015			
Version	Date	Rédacteur(s)	Qualité du rédacteur(s)	Révision pour CNRT
V1	18/12/2015	S. Touzé et al.	BRGM, LGC, IMPMC	F. BAILLY CNRT

CITATION DU DOCUMENT

Mots clés : pyrométallurgie du Nickel, scories, minéralogie, procédé couplé de carbonatation, CO₂

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

S. Touzé et al. (2015) – *Rapport de synthèse*. Programme « Carboscories ». CNRT « Nickel & son environnement. 18 pages.

SOMMAIRE

1.	INTRODUCTION	9
2.	ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	10
3.	CARACTERISATION DES SCORIES DES SITES DE KONIAMBO ET DONIAMBO	
	11	
	3.1. Caractérisation des scories du site de Doniambo	11
	3.2. Caractérisation des scories du site de Koniambo	12
4.	EXPERIMENTATIONS.....	14
	4.1. Essais de carbonatation	14
	4.2. Caractérisation des sous-produits de carbonatation	15
5.	BILANS MATIERE ET ENERGIE	17
6.	PERSPECTIVES	19
	6.1. Applicabilité du procédé carmex au contexte de la pyrométallurgie du nickel	19
	6.2. Voie de valorisation des sous-produits.....	19
	6.3. Prochaine phase : démonstration du procédé.....	20
7.	LISTE DES RAPPORTS TECHNIQUES	22

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma de principe de la carbonatation du CO ₂ dans le contexte de la pyrométallurgie du nickel	9
Figure 2 : Observations microscopiques d'olivines cristallisées dans la scorie, en lumière transmise polarisée non analysée (gauche) et lumière polarisée analysée (droite).	11
Figure 3 : Observations d'olivines cristallisées dans la scorie au microscope électronique à balayage (gauche) et cartographie géochimique présentant le contraste des teneurs en Fe/ Mg/ Al (droite).	12
Figure 4 : Image de cristallisation autour d'une cavité observée au microscope électronique à balayage de la scorie (à gauche). Composition des minéraux dans le diagramme tétraédrique MgO-Al ₂ O ₃ -FeO—SiO ₂ (à droite).	13
Figure 5 : Réacteur d'attrition (corps broyant = billes en inox)	14
Figure 6 : Silicates et carbonates au microscope électronique à transmission	16
Figure 7 : schéma de procédé du procédé de carbonatation	17
Figure 8 : Bilan matière et CO ₂ d'une unité de carbonatation sur les sites pyrométallurgiques de Doniambo et Koniambo	18

LISTE DES SIGLES & ABREVIATIONS

ATG	Analyse Thermo-Gravimétrique
CHNS	Analyse élémentaire de C, H, N, S
CNRT	Centre National de Recherche Technologique
DRX	Diffraction des rayons X
EDX	Energy dispersive X-ray spectrometry
KNS	Koniambo Nickel SAS
LGC	Laboratoire de Génie Chimique de Toulouse
MEB	Microscope électronique à balayage
SLN	Société Le Nickel – groupe ERAMET

1. INTRODUCTION

La carbonatation minérale ex-situ, accélérant un processus naturel thermodynamiquement favorable, est considérée comme une voie optionnelle pour le piégeage du CO₂ émis par les installations industrielles. La situation insulaire de la Nouvelle-Calédonie, avec une proximité des flux de CO₂ émis et des ressources carbonatables, est favorable au développement de la filière. Cette option, largement étudiée de par le monde au stade du laboratoire (notamment par plusieurs équipes d'universités américaines prestigieuses), n'a pas encore pu être menée à un stade pilote/pré-industriel du fait, notamment, de verrous liés au procédé : faibles rendements de carbonatation liés à la passivation des surfaces réactives ; conditions opératoires P, T élevées.

Le projet Carboscories s'inscrit dans la continuité du projet ANR/CARMEX (2009-2012), qui a permis très récemment d'avancer significativement sur la problématique de la carbonatation minérale ex-situ, avec notamment le développement au Laboratoire de Génie Chimique de Toulouse (LGC) d'un procédé en mode « batch » couplant attrition et réaction de carbonatation (thèse B. Bonfils, 2012). L'objectif du présent projet concerne le transfert des acquis du nouveau procédé Carmex au cas des scories de la SLN déjà caractérisées chimiquement et minéralogiquement dans le projet CARMEX, disponibles en grandes quantités en Nouvelle-Calédonie, et l'élargissement à l'étude des scories de KNS en vue d'évaluer les potentialités de carbonatation de ces sources de résidus potentiellement carbonatables.

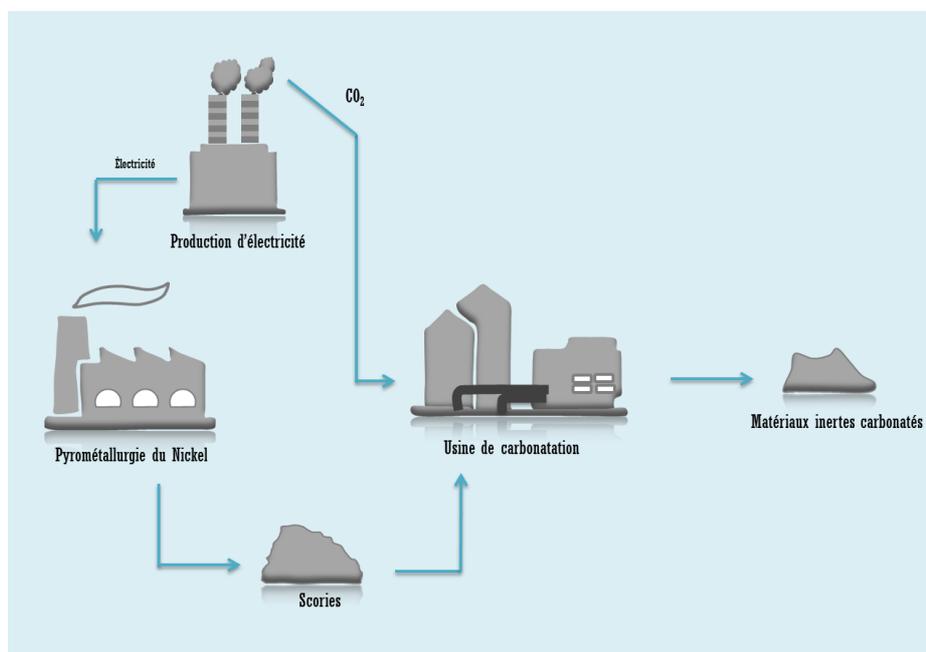


Figure 1 : Schéma de principe de la carbonatation du CO₂ dans le contexte de la pyrométallurgie du nickel

2. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Dans le cadre du projet « carboscories » une revue bibliographique a été réalisée (F. Bourgeois, C. Julcour, 2015 – *Rapport bibliographique*). Elle présente les options de piégeage du CO₂ par carbonatation minérale, du stade laboratoire jusqu'au développement de démonstrateurs.

La carbonatation minérale est une voie possible de mitigation des émissions de CO₂, capable de stocker des quantités de CO₂ compatibles avec l'échelle des enjeux associés au changement climatique. Jusque récemment, des procédés de carbonatation minérale se sont développés dans l'ombre du stockage géologique. Le stade de maturité des procédés de carbonatation minérale ne dépasse pas, dans la majorité des cas, l'échelle du laboratoire, même si quelques solutions technologiques connaissent des développements d'échelle pilote. La revue de synthèse de Sanna et coll. (2014) est la plus récente sur le sujet de la carbonatation minérale.

Les principaux procédés de carbonatation minérale se différencient principalement entre les procédés in-situ et les procédés ex-situ, les procédés indirects (ou multi-étapes) et les procédés directs, les procédés en voie sèche et les procédés en voie aqueuse. Les procédés directs ex-situ en voie aqueuse sont les plus performants puisqu'ils permettent de convertir des matériaux naturels ou déchets en carbonates solides en quelques heures. Les conditions opératoires de ces procédés conditionnent leur efficacité et leur impact environnemental, puisque ces procédés nécessitent une pression partielle de CO₂ élevée (environ 20 bars) et une température proche de 200°C. Un des axes des recherches actuelles est l'optimisation de ces conditions opératoires.

Une dimension importante du développement des procédés de carbonatation minérale, compte-tenu de la quantité des produits de réaction, certes sans danger, est la valorisation de ces derniers. Le secteur de la construction apparaît d'ores et déjà comme la principale cible de valorisation des produits de la carbonatation minérale.

Le consortium CARMEX a développé une solution originale de carbonatation minérale directe en voie aqueuse avec le procédé d'attrition-lixivante. Ce procédé consiste à réaliser la carbonatation minérale dans l'enceinte d'un broyeur à billes agitées, qui permet de surmonter la passivation des particules, phénomène qui entrave le rendement de la carbonatation minérale. Même si la faisabilité technologique et le changement d'échelle ne présentent pas a priori de problème, des développements importants demeurent nécessaires pour tester un tel procédé en mode opératoire continu et pour en définir les meilleures conditions de fonctionnement.

3. CARACTERISATION DES SCORIES DES SITES DE KONIAMBO ET DONIAMBO

3.1. CARACTERISATION DES SCORIES DU SITE DE DONIAMBO

Les scories en fusion issues du procédé SLN sont refroidies et fragmentées par un rideau d'eau de mer. Leur granulométrie ne dépasse pas 10 mm.

En diffraction des rayons X on observe une forte proportion de produit amorphe comparativement à une faible proportion de phase cristalline. Cette dernière est une olivine de type forstérite (Mg_2SiO_4).

En microscopie optique, on observe soit des olivines trapues automorphes soit des olivines en baguettes pouvant s'accompagner de développements dendritiques (Figure 2 et Figure 3). Ces deux dernières textures marquent le phénomène de trempe subi par la scorie lors du refroidissement par l'eau de mer.

A la microsonde électronique, les analyses ponctuelles du verre sont peu différentes de celle de la scorie elle-même (analyse totale), ce qui s'explique par les faibles proportions des olivines. Les analyses des olivines donnent une composition chimique correspondant à la formule structurale $(Mg_{1,9},Fe_{0,1})SiO_4$.

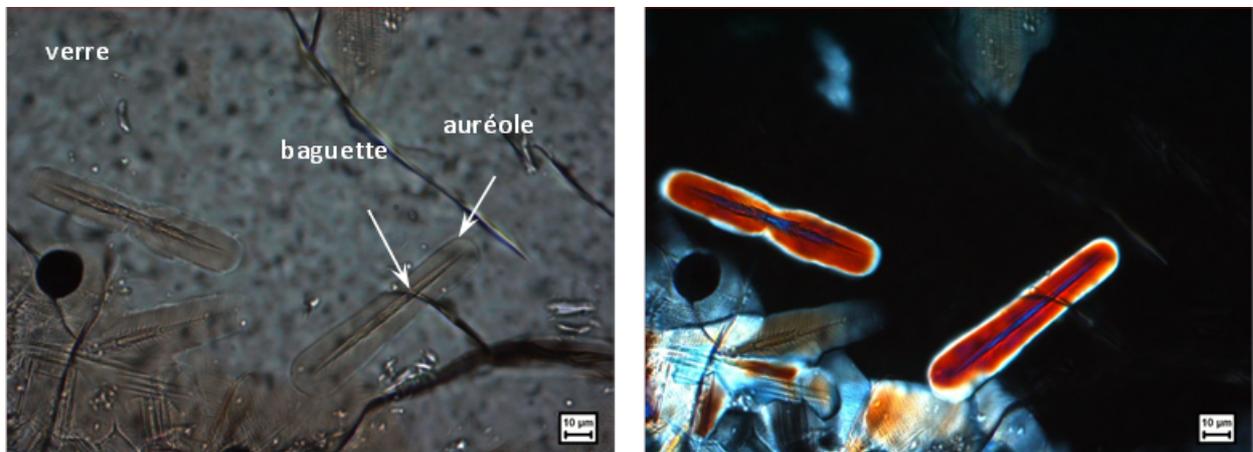


Figure 2 : Observations microscopiques d'olivines cristallisées dans la scorie, en lumière transmise polarisée non analysée (gauche) et lumière polarisée analysée (droite).

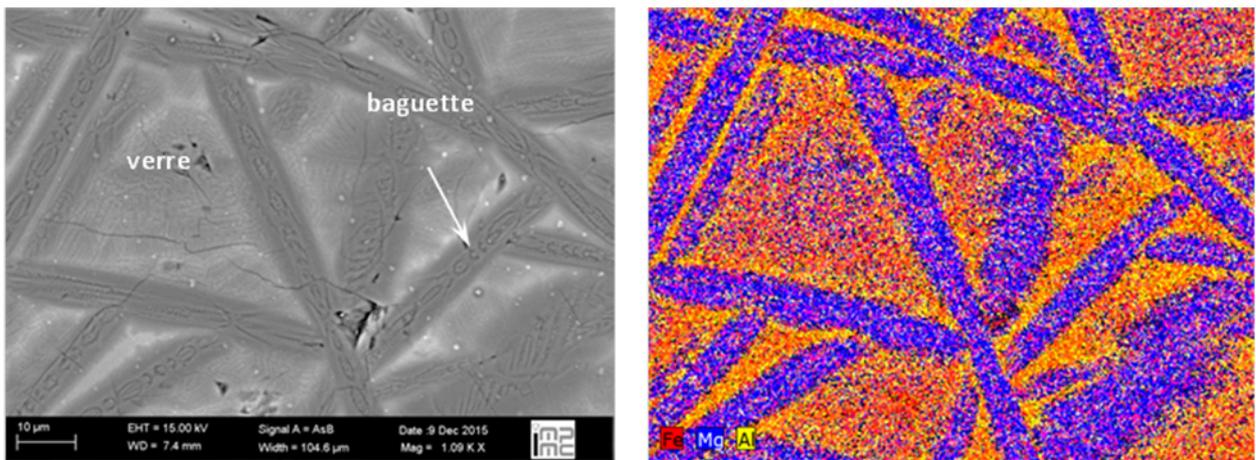


Figure 3 : Observations d'olivines cristallisées dans la scorie au microscope électronique à balayage (gauche) et cartographie géochimique présentant le contraste des teneurs en Fe/ Mg/ Al (droite).

3.2. CARACTERISATION DES SCORIES DU SITE DE KONIAMBO

Les scories en fusion issues du procédé KNS sont versées sur une pente (verse à scories) pour former une « coulée » qui refroidit à l'air libre. Après refroidissement, cette coulée est concassée et les produits du premier concassage sont stockés pour être ensuite broyés et classifiés pour une utilisation ultérieure. Les échantillons utilisés dans cette étude ont été prélevés sur ce site de stockage. L'échantillonnage et la préparation des échantillons broyés à moins de 100 µm ont été réalisés de manière à s'affranchir d'une hétérogénéité possible. Les travaux de caractérisations ont porté sur des blocs concassés de taille décimétrique et d'aspect macroscopique différent.

L'étude macroscopique de quatre échantillons de couleurs et de textures très différentes révèle que ces différences sont essentiellement dues à la présence et à la répartition de vésicules dans les scories. Ces vésicules se forment par dégazage de la coulée lors du refroidissement.

En lame mince, on constate que ces scories ont un taux de cristallisation proche de 100 %, contrairement à celles de la SLN, pour lesquelles la phase vitreuse est très dominante (accompagnée d'une phase minérale, correspondant à des olivines squelettiques). Cette différence s'explique par le fait que les premières refroidissent à température ambiante, alors que les secondes subissent une trempe en passant devant un rideau d'eau.

La principale phase minérale dans les scories KNS est un silicate ferromagnésien de type pyroxène, dont la composition est proche de celle de la scorie. En diffraction des rayons X, la phase dominante est une enstatite. De la forstérite (olivine magnésienne) et de l'augite ont également été identifiées. Les pyroxènes forment des lattes millimétriques plus ou moins jointives et orientées. En microscopie on identifie également des chromites.

Pyroxènes et olivines sont fortement zonés, avec un cœur magnésien et des bordures enrichies en fer. Ils constituent respectivement une solution solide entre enstatite ($Mg_2Si_2O_6$) et ferrosilite ($Fe_2Si_2O_6$) et entre forstérite (Mg_2SiO_4) et fayalite (Fe_2SiO_4). Il est identifié un

autre type de composition ferromagnésienne plus alumineuse ayant une chimie approchant les augites et/ou les talcs (Figure 4). Ces variations de la chimie des minéraux traduisent le refroidissement lent de la scorie.

Si la composition chimique des scories de KNS est relativement similaire à celle des scories de la SLN, en revanche, leur composition minérale est très différente.

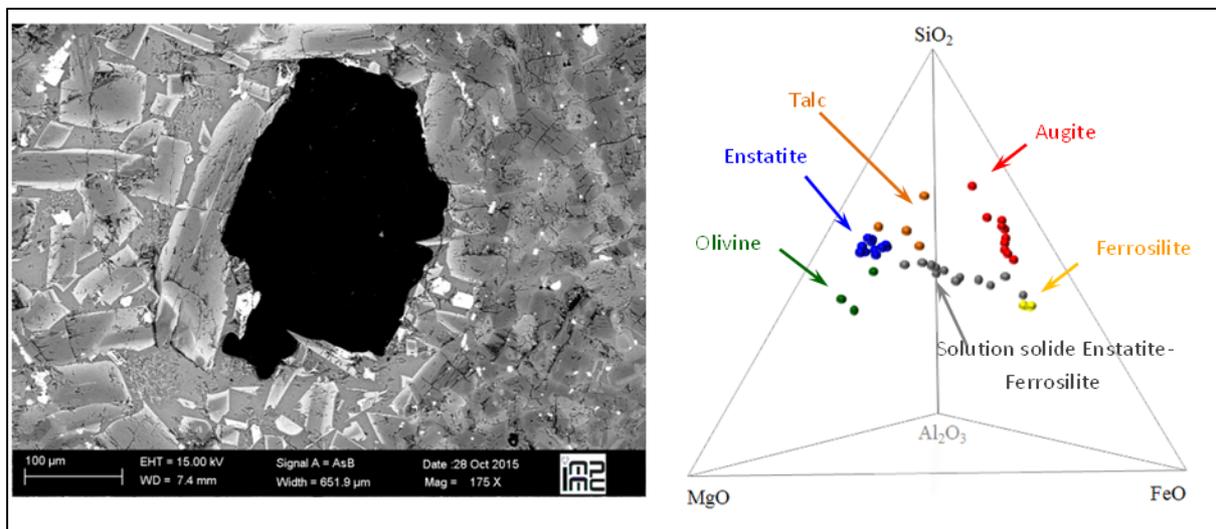


Figure 4 : Image de cristallisation autour d'une cavité observée au microscope électronique à balayage de la scorie (à gauche). Composition des minéraux dans le diagramme tétraédrique MgO-Al₂O₃-FeO—SiO₂ (à droite).

4. EXPERIMENTATIONS

4.1. ESSAIS DE CARBONATATION

L'attrition lixivante d'un minerai s'opère dans l'enceinte d'un broyeur à billes agitées, et permet l'élimination continue, par attrition, des couches formées à la surface des particules lixiviées. Appliquée à la carbonatation minérale en voie aqueuse, ce procédé permet de faire réagir les cations divalents extraits des scories par lixiviation avec du CO_2 pour piéger ce dernier de façon pérenne sous forme de carbonates solides : magnésite, sidérite et calcite.



Figure 5 : Réacteur d'attrition (corps broyant = billes en inox)

Les essais d'attrition lixivante sont réalisés à une pression partielle de CO_2 de 20 bars et une température de 180°C . Une suspension de concentration 90 g/L est introduite dans le réacteur avec un corps broyant (billes d'inox, billes de verre, sable ou scories elles-mêmes). La durée d'un essai est de 24 h. À l'issue d'un essai, des analyses sont réalisées pour quantifier les carbonates formés (ATG, CHNS), déterminer l'évolution de taille des particules (granulométrie laser) et identifier les différentes phases formées (DRX, microscopies - MEB, MET - couplées à l'analyse élémentaire EDX).

Les essais montrent que les scories KNS et SLN se carbonatent efficacement par le procédé d'attrition-lixivante, avec un taux de carbonatation jusqu'à 70% et 51% pour les scories SLN et KNS respectivement, en 24 h ; Cela équivaut au stockage de 0,3 t de CO_2 par t de scorie SLN, et 0,2 t de CO_2 par t de scorie KNS. Les résultats montrent que la scorie SLN est intrinsèquement plus réactive que la scorie KNS vis-à-vis de la carbonatation minérale en phase aqueuse.

Le travail réalisé a mis en évidence l'importance du choix du corps broyant, en termes d'analyse et de performance du procédé d'attrition-lixivante. Les billes de broyage en inox,

qui conduisent pourtant aux meilleurs rendements de carbonatation des scories, se sont révélées réactives dans les conditions de la carbonatation minérale. Le sable, abondant et bon marché, est apparu comme un choix judicieux. Des essais d'attrition-lixivante en mode d'auto-attrition, où les scories servent à la fois de réactif et de corps broyant, ont confirmé la carbonatation des scories avec ce mode opératoire. Des travaux complémentaires sont justifiés pour étudier et améliorer les conditions de l'auto-attrition.

Les produits de la carbonatation minérale des scories de nickel, en conditions ambiantes et sur des temps longs, sont des particules de 10 µm environ, dont la texture nanométrique des grains constitutifs pourrait offrir des potentiels d'utilisation intéressants, notamment pour la production de matériaux de construction.

4.2. CARACTERISATION DES SOUS-PRODUITS DE CARBONATATION

Les expérimentations de carbonatation minérale en voie aqueuse des scories de nickel de la SLN (Doniambo) et de KNS (Koniambo) réalisées en couplant lixiviation et attrition ont produit, d'un test à l'autre, des phases de tailles nanométriques relativement similaires chimiquement.

Les réactions n'ont toutefois pas été complètes. Des fragments de minéraux issus des scories initiales ont été observés en cours d'altération montrant ainsi le potentiel d'aboutir à une réaction totale d'altération des scories.

Ces expérimentations ont produit un ensemble de phases silicatées et carbonatés (Figure 6). Les silicates néoformés sont amorphes et présentent différentes morphologies et compositions chimiques. La première est très riche en silicium et forme des sphérules ovoïdes. La seconde est plutôt ferromagnésienne, plus ou moins alumineuse et se présente sous un faciès dont il est difficile de distinguer les morphologies.

Les carbonates produits sont plutôt magnésiens et contiennent une part non négligeable de fer. Ils ont une géochimie globale de solution solide entre la magnésite ($MgCO_3$) et la sidérite ($FeCO_3$) avec des rapports d'environ 2/3 de magnésium et 1/3 de fer pour ceux issus des scories de KNS et de l'ordre de 4/5 de magnésium pour 1/5 de fer pour ceux issus des scories de la SLN. Les carbonates issus des scories de KNS sont plus petits que ceux issus des scories de SLN et sont généralement chimiquement plus complexes car ils contiennent couramment une part de manganèse et de calcium plus importante.

Le matériau produit est un ensemble de nanoparticules qui forme des agrégats micrométriques et qui présente des zones de compaction intra-granulaire forte tout en étant toutefois d'une extrême porosité. En plus des produits issus des protocoles expérimentaux et des silicates primaires de la scorie, le matériau contient des chromites fragmentaires résiduelles et des éclats de particules de ferronickel, celles-ci proviennent de résidus du procédé pyrométallurgiques

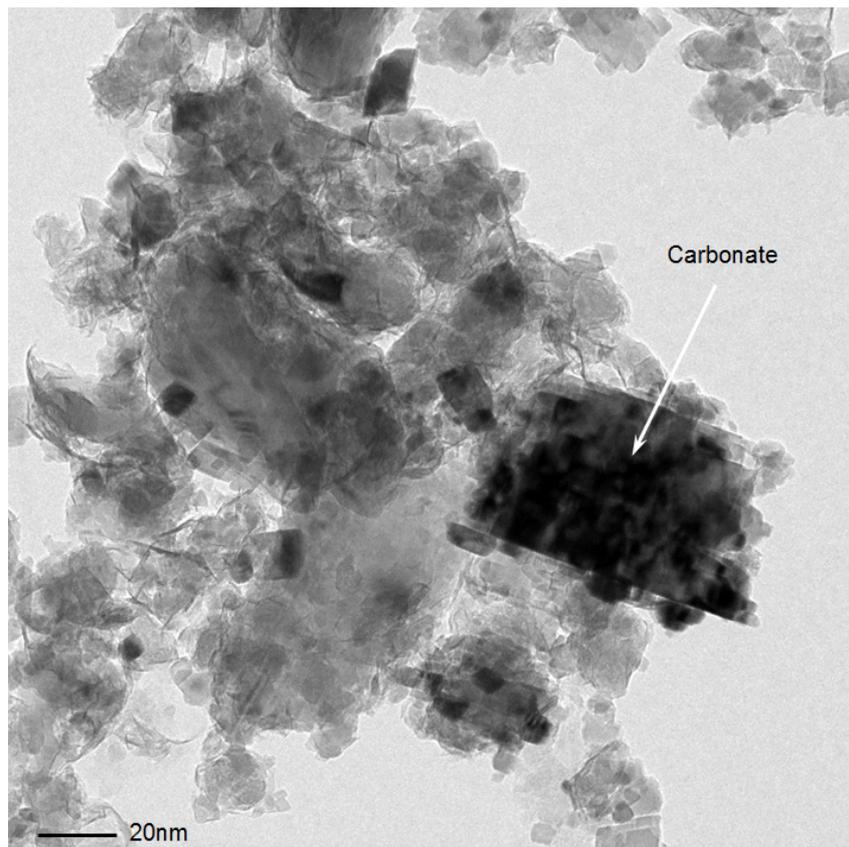


Figure 6 : Silicates et carbonates au microscope électronique à transmission

5. BILANS MATIERE ET ENERGIE

Comme cela a été vu dans le chapitre précédent, le cœur de la réaction de carbonatation se fait dans un réacteur attriteur. Dans un procédé industriel ce réacteur est environné d'autres unités de traitement et de transformation de la matière. Afin de s'approcher de la réalité d'un tel procédé, des bilans matières, enthalpique et CO_2 ont été fait sur le schéma de procédé intégrant ces annexes.

Le schéma de procédé comprend donc :

- Le broyage, afin de diminuer la granulométrie des scories à une maille $< 100\mu\text{m}$;
- Le système de chauffe et de refroidissement de la pulpe ;
- Le système de compression du CO_2 ;
- Le système de séparation liquide/solide avec le recyclage de l'eau.

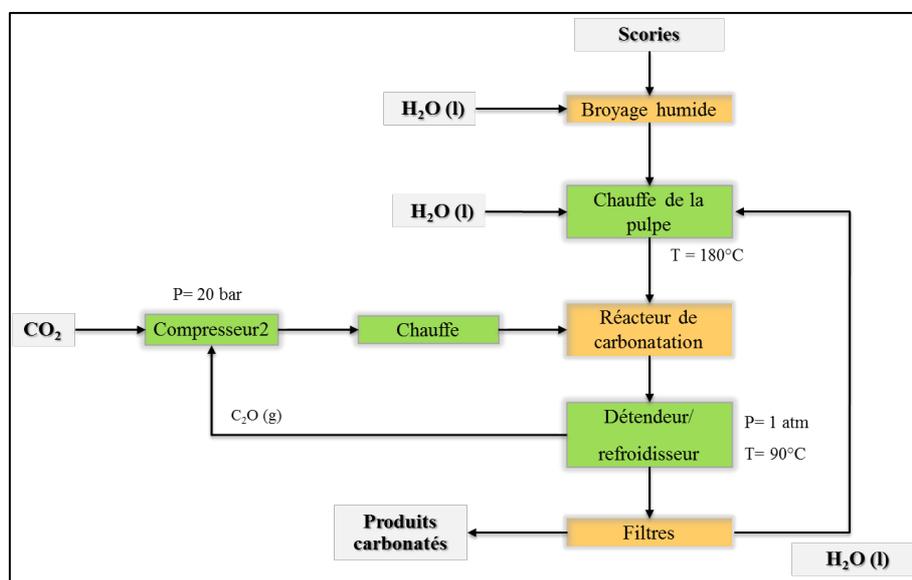


Figure 7 : schéma du procédé de carbonatation

Le bilan matière des deux procédés est fait sur l'ensemble des unités décrites ci-dessus. Il aboutit à des consommations de scories de 2.28 t pour le site de Doniambo et 3.13 t pour le site de Koniambo par tonne de CO_2 séquestrée. Au vu de ces chiffres, il semble difficilement envisageable de traiter la totalité du CO_2 provenant des centrales thermiques par séquestration minérale. Cette technologie pourrait néanmoins traiter une partie du flux de CO_2 . Dans ce cas, la séquestration minérale vient en apport à un panel d'autres technologies ayant pour but la réduction des émissions de CO_2 . L'analyse bilancielle a montré que le procédé de carbonatation est viable sous réserve d'hypothèses vraisemblables ; en effet pour 1 tonne de CO_2 piégée, seuls 45 à 61 kg de CO_2 sont produits par le procédé de carbonatation. Le bilan de carbonatation est donc largement positif.

Le procédé fonctionne en voie humide : pour 1 t de CO_2 , le procédé a besoin de 1.77 t d'eau pour le site de Doniambo et 2.23 t d'eau pour le site de Koniambo. La pulpe sortant du réacteur de carbonatation entre dans une unité de séparation liquide/solide. L'eau récupérée dans la l'opération de séparation liquide/solide est recyclée.

Les bilans des deux sites sont synthétisés dans la Figure 8.

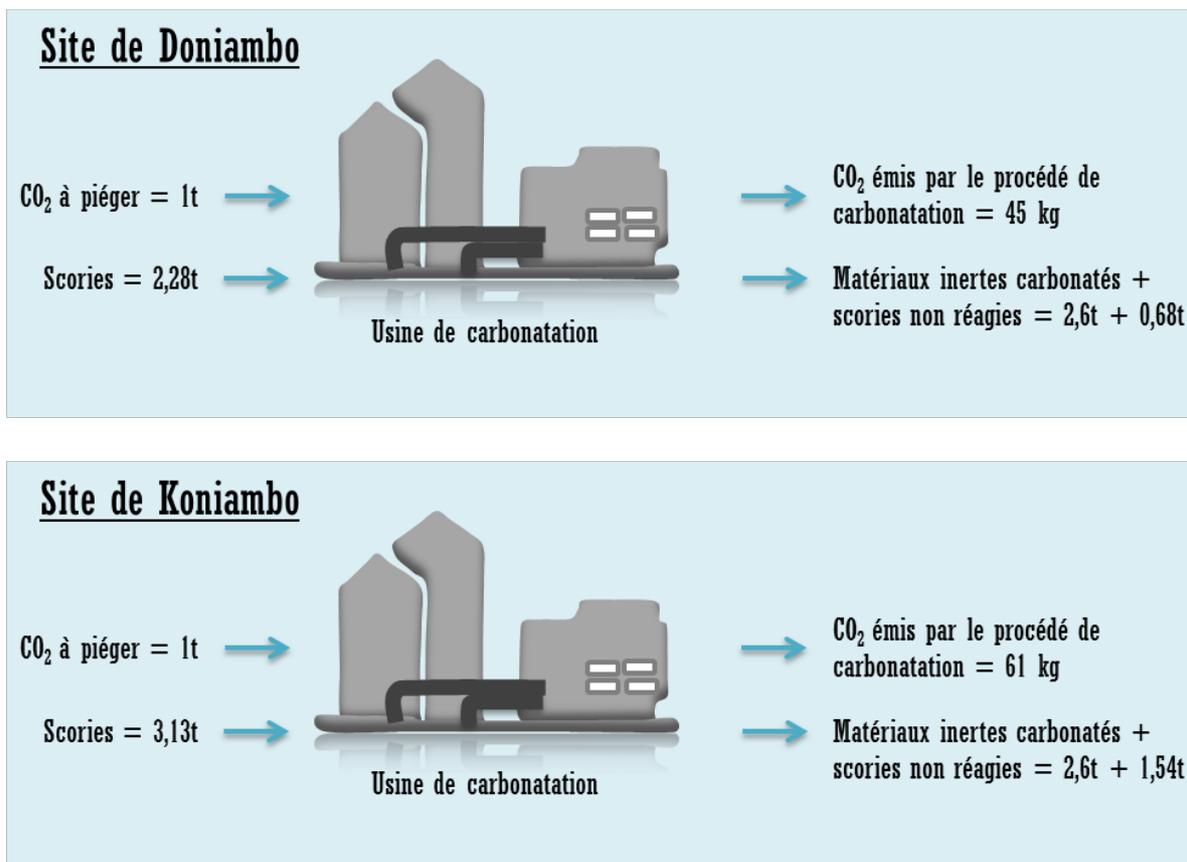


Figure 8 : Bilan matière et CO₂ d'une unité de carbonatation sur les sites pyrométallurgiques de Doniambo et Koniambo

6. PERSPECTIVES

6.1. APPLICABILITE DU PROCEDE CARMEX AU CONTEXTE DE LA PYROMETALLURGIE DU NICKEL

Les essais de carbonatation minérale réalisés en laboratoire sur les scories des deux sites pyrométallurgiques du nickel de Nouvelle-Calédonie ont montré que ces scories avaient un potentiel de carbonatation important (jusqu'à 70% pour les scories SLN et 51% pour les scories KNS). Ces essais ont aussi révélé que les scories du site de Doniambo sont intrinsèquement plus réactives que celles du site Koniambo. Cette variation est liée à la différence de compositions minéralogique induite par le mode de refroidissement des scories (et la part de phase amorphe).

Les analyses bilancielle du scénario de carbonatation proposé dans ce projet ont montré que le bilan CO₂ était positif à l'échelle industrielle; la quantité de CO₂ produite par le procédé de carbonatation est négligeable devant la quantité de CO₂ piégée. Les bilans indiquent qu'il est possible de piéger près de 30% des émissions de CO₂ sur le site de Koniambo et 50% sur le site de Doniambo.

L'étude montre que la carbonatation des scories de nickel est aussi réalisable en mode d'auto-attribution. Cette option, qui permet de traiter directement des scories de taille millimétrique, pourrait permettre de diminuer le coût du procédé de carbonatation minérale, en économisant sur les postes broyage et consommation en corps broyant. Un travail complémentaire, portant spécifiquement sur la mise en œuvre du mode d'auto-attribution, est nécessaire pour chiffrer les meilleures conditions opératoires et la performance associée. Ce travail nécessiterait la réalisation d'essais de carbonatation minérale en continu.

Enfin, la plupart des expériences ont été effectuées à 180°C, mais des essais à beaucoup plus basse température ont donné des résultats encourageants. Il serait intéressant de mesurer systématiquement l'effet de la température sur les rendements de carbonatation des deux scories.

6.2. VOIE DE VALORISATION DES SOUS-PRODUITS

Les sous-produits formés après carbonatation ont plusieurs propriétés qui peuvent être exploitées pour une utilisation dans des matériaux cimentaires ou des sous-couches routières. Ces propriétés sont liées d'une part à leur composition (carbonates et silice/silicates), mais aussi à la finesse des grains qui constituent les particules produites par le procédé de carbonatation minérale. Plusieurs applications ont déjà été identifiées : les coulis cimentaires de comblement de cavité, les mortiers de ciment technique et les bétons de ciment.

En termes de mise en œuvre, il paraît envisageable de produire de tels matériaux directement à partir des produits du procédé de carbonatation minérale, sans étape de séparation des solides ni séparation solide-liquide poussée. Cette possibilité est très intéressante au plan technologique et industriel, mais nécessiterait d'être testée par une étude complémentaire.

La morphologie des produits est un point fort pour leur valorisation potentielle. En effet, les produits sont des agrégats de 10 µm environ, constitués de grains nanométriques. Si la taille des agrégats permet de gérer ces produits en toute sécurité, la taille nanométrique des grains constitutifs (carbonates et silice) leur confère vraisemblablement une très forte réactivité. Ce type de matériaux est tout à fait unique et l'étude de leurs propriétés, notamment en vue d'une valorisation dans le secteur de la construction, est recommandée.

Des études complémentaires doivent donc être menées afin de connaître le potentiel de valorisation des produits de carbonatation minérale des scories de nickel dans le domaine du BTP, comme matériau bon marché de type cimentaire, ou au contraire comme matériau à forte valeur ajoutée. Comme le marché du ciment en Nouvelle-Calédonie ne peut absorber qu'une fraction de la quantité de produits que la carbonatation minérale des scories de nickel pourrait produire, il faudrait rechercher une valorisation sous la forme de produits à forte valeur ajoutée, qui exploiteraient les propriétés morphologiques uniques des particules formées.

6.3. PROCHAINE PHASE : DEMONSTRATION DU PROCEDE

Afin de valider les résultats encourageants sur la carbonatation des scories, il est nécessaire de changer d'échelle et de mode opératoire. Les essais ont été menés jusqu'à présent sur des quantités réduites (< 50 g) et en mode batch. La phase suivante de démonstration doit être réalisée sur des quantités plus importantes et en mode continu (> kg/h).

La mise en œuvre du procédé d'attrition lixiviante dans l'enceinte d'un broyeur en mode continu demande une ingénierie spécifique ; la difficulté tient aux conditions opératoires qui imposent de travailler sous pression (jusqu'à 30 bar de pression totale) et sous une température de 180°C. L'utilisation d'un broyeur agité dans ces conditions n'est pas classique et nécessite de modifier les équipements disponibles sur le marché. Le LGC a déjà échangé sur ce sujet avec Neztch, Union Process et METSO Minerals (équipementiers du domaine), qui ont confirmé la possibilité de fournir des broyeurs d'une capacité de 4 litres, capables d'opérer dans les conditions propres à la carbonatation.

De telles unités pilotes sont très performantes et permettent de faire un travail d'extrapolation pilote/unité pré-industrielle réaliste. Un autre avantage de ce type de broyeurs est la possibilité de les utiliser en auto-attrition, réduisant non seulement les coûts opératoires, mais aussi l'impact lié au broyage amont. Un travail spécifique portant sur les charges de broyage sera intégré au travail d'optimisation du procédé.

Programme simplifié de la phase de démonstration

La phase de démonstration a pour objectif de :

- valider le concept au niveau pilote en mode continu afin de fournir les données nécessaires à une étude technico-économique du procédé
- étudier les différentes voies d'utilisation des sous-produits formés

Cette phase de démonstration comporterait les tâches suivantes :

<u>Essais en laboratoire</u>
<u>Essais en laboratoire</u> <ul style="list-style-type: none"> • Recherche des paramètres opératoires optimaux
<u>Caractérisation des sous-produits solides</u> <ul style="list-style-type: none"> • Caractérisation physique et physico-chimique en vue d'une séparation solide/solide et solide/liquide • Caractérisation physique et physico-chimique en vue d'une valorisation dans le secteur du BTP
<u>Essais pilote en mode continu</u>
<u>Essais pilote en mode continu</u> <ul style="list-style-type: none"> • Essais de carbonatation • Essais de séparation solide/solide et solide/liquide • Bilan matière de l'opération de carbonatation • Bilan énergétique
<u>Caractérisation des sous-produits</u> <ul style="list-style-type: none"> • Détermination des phases minéralogiques • Qualité des sous-produits versus voies de valorisation • Essais laboratoire de valorisation des sous-produits
<u>Coordination et bilan de l'étude</u>
<u>Bilan de l'étude</u> <ul style="list-style-type: none"> • Cahier des charges d'une opération pilote sur site • Rapport de synthèse
<u>Coordination</u> <ul style="list-style-type: none"> • Gestion de projet • Réunions

Nous avons réalisé une estimation des couts associés à ces travaux, le cout total de l'ensemble de ces étapes est d'environ 500 000 €. Nous rappelons que cette estimation est informative et n'a pas de valeur contractuelle.

7. LISTE DES RAPPORTS TECHNIQUES

- Bourgeois F., Julcour C. (2015) – Rapport bibliographique. Programme «Carboscories ». CNRT « Nickel & son environnement. 43 pages.
- Augé T. et Touzé S. (2015) – Caractérisation des résidus de pyrométallurgie de l'usine de Koniambo. Rapport BRGM/RC-64842-FR
- Benhamed I., Julcour C., Bourgeois F., Cassayre L. et Diouani J. (2015) – Essais de carbonatation et caractérisation des sous-produits - Programme « Carboscories ». CNRT « Nickel & son environnement. 49 pages et 77 pages d'annexes
- Touzé S. (2015) – Bilans matière et énergie du procédé couplé de carbonatation. Programme « Carboscories ». CNRT « Nickel & son environnement. 22 pages.
- Sanna A., Uibu M., Caramanna G., Kuusik R., et Maroto-Valer M.M., 2014. A review of mineral carbonatation technologies to sequester CO₂, *Chem. Soc. Rev.*, 43, 8049-8080.

CNRT "Nickel et son environnement"

Tome Nickel et Technologie

